

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE
DATOS PARA EL REGISTRO DE IRRADIANCIA, TEMPERATURA Y
CÁLCULO DE PRODUCTIVIDAD ENERGÉTICA DE LOS SISTEMAS
FOTOVOLTAICOS CONECTADOS A RED**

Tesis para optar el Título de Ingeniero Electrónico, que presenta el bachiller:

Alejandro Manuel Carhuavilca Vela

ASESOR: Mg. Miguel Angel Cataño Sánchez

Dr. Jan Amaru Palomino Töfflinger

Lima, 2021



Dedicado a mis padres que son ejemplo de superación,
me han brindado su apoyo en todo momento y me
motivaron constantemente para alcanzar mis objetivos.
También a toda mi familia y amigos quienes me ayudan
en la obtención de conocimientos, me brindan apoyo
moral y son mi motor para superarme cada día.



Agradezco por la ayuda a mi familia, maestros, compañeros y a la universidad por los conocimientos otorgados. Asimismo, agradezco a los miembros de los grupos IDEA de la UJA en España, ARViCo en alianza con MatER de la PUCP en Perú por su asesoramiento en este trabajo. El proyecto recibió financiamiento por el Fondo Nacional de Desarrollo Científico, Tecnológico y de Innovación Tecnológica (FONDECYT) mediante el Banco Mundial con el contrato

N° 045-2018-FONDECYT-BM-IADT-MU



Estoy convencido de que la mitad de lo que separa a los emprendedores exitosos de los no exitosos es la perseverancia.

Steve Jobs

Resumen

Los sistemas fotovoltaicos (FV) son aquellos que generan energía eléctrica amigable con el medio ambiente sin uso de combustibles o gases, los cuales para evaluar su funcionamiento y producción energética, se debe instalar un sistema de monitoreo. A partir de las mediciones obtenidas mediante los sistemas de adquisición de datos se puede analizar las pérdidas de producción de estos sistemas ante cualquier anomalía y estos permitirán realizar las evaluaciones tecnico-económicas. Estas evaluaciones permitirán a los instaladores brindar un mayor soporte de diseño e implementación, así los clientes podrán saber el tiempo de retorno de la inversión que realizaron en los sistemas FVs. Por ende, este trabajo presenta el diseño e implementación de un sistema de adquisición, el cual registra los datos meteorológicos que influyen en la producción eléctrica de estos sistemas. Este sistema de monitoreo debe cumplir con los estándares de la norma dada por la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC61724-1). Se realizarán ensayos experimentales de adquisición de datos con diferentes métodos de validación para que pueda cumplirse con la norma IEC. Los principales parámetros que influyen en la producción eléctrica FV son la irradiancia y la temperatura del módulo, por ello, deben medirse mediante sensores que cumplan con este propósito. Estos deberán conectarse al sistema de adquisición de datos diseñado en este trabajo, el cual deberá enviar los mismos hacia un ordenador para su almacenamiento y monitoreo. En este documento, se estará mostrando los resultados de registro en el software de visualización y de la producción energética solar diaria mediante los datos obtenidos del sistema de adquisición diseñado.

Palabras-Clave: Adquisición de datos, sistema fotovoltaico, IEC61724-1, parámetros meteorológicos, irradiancia, temperatura del módulo FV, producción energética

Índice General

Introducción	1
1. Marco problemático: Sistemas de adquisición aplicados a sistemas fotovoltaicos (FV)	3
1.1. Cambio orientado a energías renovables	3
1.2. Avances de la Energía Fotovoltaica en el mundo	4
1.3. Avances en los estudios de Energía fotovoltaica en el Perú	5
1.4. Clasificación de las Tecnologías Fotovoltaicas (FV)	6
1.5. Investigación del grupo MatER-PUCP en Energía Fotovoltaica	8
1.6. Estado del Arte	9
1.7. Objetivos de la Tesis	11
1.7.1. Objetivo general	11
1.7.2. Objetivos específicos	11
2. Fundamentos teóricos: Estándares de medición de parámetros que afectan al comportamiento del SFCR	12
2.1. Conceptos básicos para monitoreo de un SFCR	13
2.1.1. Sistema de adquisición de datos	13
2.1.2. Parámetros a monitorear	13
2.1.2.1. Irradiancia (G_I)	13
2.1.2.2. Temperatura del módulo FV (T_m)	14
2.2. Importancia de la medición de los parámetros para SFCR	15
2.3. Bases Legales para monitoreo de SFCR	17
2.4. Funcionamiento general del sistema de adquisición de datos	18
3. Diseño e implementación del sistema de adquisición de datos y monitoreo en una interfaz visual de usuario	20
3.1. Propuesta de diseño general	21

3.2.	Estándares IEC para implementar sistemas de monitoreo en SFCR y elección del componente usado como unidad de registro de datos	22
3.3.	Diseño de componentes electrónicos para la adquisición de irradiancia	24
3.4.	Diseño de componentes electrónicos para adquisición de temperatura del módulo FV	26
3.5.	Desarrollo de transmisión de datos vía serial	29
3.6.	Elección de fuente de alimentación para energizar los diversos componentes de sistema DAQ	30
3.7.	Programa de la unidad de registro de datos para monitoreo de los parámetros obtenidos	31
3.8.	Diseño de interfaz gráfica para guardado y visualización de datos basado en el software NI LabVIEW	34
4.	Resultados de adquisición del sistema diseñado para los SFCR, cálculo de productividad referencial, final y performance de la instalación	37
4.1.	Funcionamiento de general del circuito de adquisición de datos y diseño mecánico para instalación del sistema DAQ	38
4.2.	Instalación del sistema de monitoreo para medición de Irradiancia y Temperatura	40
4.3.	Resultados preliminares de adquisición de datos	45
4.3.1.	Medición de Irradiancia.	45
4.3.2.	Medición de Temperatura.	47
4.4.	Cálculo de productividad y performance del SFCR con los datos obtenidos del sistema DAQ	50
4.5.	Interfaz de visualización de datos enviados por el sistema de adquisición en tiempo real mediante el software LabVIEW	52
	Conclusiones	57
	Recomendaciones	57
	Bibliografía	58
	Anexos	

Índice de Figuras

1.1. <i>Productividad final</i> de la energía fotovoltaica en el Perú.	6
1.2. Tabla de eficiencias por tecnología de módulos FV	7
1.3. Presencia en el mercado de las tecnologías FV.	8
1.4. Integración de un sistema fotovoltaico conectado a red.	9
2.1. Influencia de la Irradiancia Directa (DNI) sobre la corriente de cortocircuito (I_{SC}) en relación al ($I_{SC,STC}$)	14
2.2. Influencia de la Temperatura ambiental (T_{amb}) sobre el voltaje de circuito abierto (V_{OC}) en relación al ($V_{OC,STC}$)	15
2.3. Diagrama de bloques del flujo de energía eléctrica en los SFCR.	17
2.4. Diagrama de Bloques para sistema de adquisición de datos conectados a sensores	19
3.1. Esquema de funcionamiento del sistema de monitoreo conjuntamente con los Sistemas Fotovoltaicos Conectados a Red (SFCR).	22
3.2. Diagrama de tiempos de operación del ADS1115 para convertir y enviar los datos analógicos	26
3.3. Posición de montaje para los sensores de temperatura PT100.	28
3.4. Diagrama de tiempos para conversión de señal RTD a datos digitales y proceso de transmisión de datos hacia la unidad de registro con el MAX31865.	28
3.5. Diagramas de flujo para el programa principal del sistema de monitoreo y función para registro de irradiancia en la unidad de adquisición.	33
3.6. Diagrama de flujo de la función para medición de temperatura del módulo FV. . .	33
3.7. Diagrama de flujo de la función para medición de temperatura del módulo FV. . .	35
3.8. Interfaz de monitoreo visual de irradiancia mediante diferentes graficas que representa cada sensor medido	36
4.1. Esquema de funcionamiento, conexiones y transmisión de datos hacia la unidad de registro y al computador	39

4.2. Diseño mecánico para implementación y protección de sistema de monitoreo . . .	40
4.3. Montaje de sistema de adquisición de datos en tablero de poliéster	41
4.4. Componentes instalados en el sistema de adquisición de datos	43
4.5. Instalación de piranómetro y módulo calibrado para medición de irradiancia. . . .	44
4.6. Instalación de sensores PT100 para medición de temperatura del módulo FV. . .	44
4.7. Relación y conversión de voltaje de módulo calibrado (mV) vs irradiancia de piranómetro de referencia (W/m^2). (Mediciones: 02/04/2020)	46
4.8. Comparación de irradiancia instantánea del módulo calibrado (W/m^2) vs irradiancia instantánea del piranómetro (W/m^2). (Mediciones: 02/04/2020)	47
4.9. Esquema de sensores para validación de temperatura del módulo FV	48
4.10. Comparación instantánea de la temperatura medida con la temperatura referencial. (Mediciones: 02/04/2020)	49
4.11. Histograma de la diferencia de medidas del sensor RTD con el sensor referencial (Mediciones: 02/04/2020)	50
4.12. Potencia entregada a la red interna del laboratorio durante todo 1 día (Mediciones: 02/04/2020)	51
4.13. Tabla de datos visualizada en tiempo real mediante LabVIEW	53
4.14. Gráficos de sensores analógicos de irradiancia para medición de irradiancia . . .	53
4.15. Gráfica de irradiancia de piranómetro EKO MS80-M	54
4.16. Gráficas de medición de temperatura de módulo para cada tecnología FV	55
4.17. Diagrama esquemático de componentes para la implementación del sistema DAQ.	63

Índice de Tablas

1.1. Comparación de resultados y similitudes en la bibliografía para monitoreo de sistemas fotovoltaicos	10
2.1. Parámetros que serán medidos en tiempo real en los sistemas fotovoltaicos exigidos por IEC61724	17
3.1. Comparación de diferentes microcontroladores para ser usados como unidad de registro de datos en el sistema DAQ	23
3.2. Comparación de diferentes convertidores de 16 bits según las características que se necesitan en el sistema DAQ.	25
3.3. Comparación de diferentes equipos para adquirir datos de sensores RTD según las características que se necesitan en el sistema DAQ.	27
3.4. Diseño de fuente de energía que alimenta al sistema de adquisición de datos y sus sensores	31
3.5. Diseño regulador de voltaje para suministro de componentes electrónicos a 5V DC	31
4.1. RMSE y MBE del módulo calibrado y piranómetro referencial. (Mediciones: 02/04/2020)	46
4.2. Irradiación estimada del minimódulo calibrado comparada con el piranómetro referencial. (Mediciones: 02/04/2020)	47
4.3. RMSE y MBE del sensor RTD comparado con la termocupla referencial. (Mediciones: 02/04/2020)	49
4.4. Cálculo de productividad y funcionamiento del sistema fotovoltaico conectado a red en relación al comportamiento meteorológico del lugar de instalación	52
4.5. Lista de componentes a utilizar para la implementación del sistema de adquisición de datos (Sistema DAQ)	61

Introducción

El presente trabajo de tesis tiene como objetivo principal mostrar el diseño e instalación de un sistema de adquisición de datos en las zonas de instalación para el proyecto de investigación aplicada liderado por el grupo MatER-PUCP. Este sistema de monitoreo permite registrar parámetros meteorológicos que influyen en la producción eléctrica de los Sistemas Fotovoltaicos Conectados a Red (SFCR). A partir de los datos obtenidos mediante este sistema, los clientes quienes compren estos sistemas podrán realizar los cálculos sobre el tiempo de vida de su sistema FV y el período de retorno de la inversión que realizaron.

Los instaladores para diseñar un SFCR necesitan tomar como referencia el comportamiento meteorológico del lugar de instalación. Para ello, existen plataformas virtuales que brindan aproximaciones teóricas y satelitales del clima en la zona donde se planea instalar. Ya que estos datos usados son teóricos, para una mayor precisión en el diseño de los sistemas FV es necesario obtener datos reales mediante sensores especializados en cada lugar de instalación. Con estos datos obtenidos de manera experimental se podrá aproximar un performance esperado respecto al comportamiento meteorológico dado.

Para los clientes que compran estos sistemas de generación energética es importante estar monitoreando la producción energética de sus sistemas y si están correctamente instalados, ya que relacionando la generación eléctrica del sistema con el comportamiento meteorológico de la zona se pueden detectar anomalías que afecten al SFCR.

El sistema de adquisición diseñado para este trabajo permitirá registrar los parámetros meteorológicos a través de sensores de irradiancia y temperatura del módulo FV. Se está realizando el diseño de sus acondicionamientos de señal para obtener mediciones correctas y permitan cumplir con los estándares IEC. Además, se asegura la correcta transmisión de datos hacia una computadora vía serial a largas distancias desde donde se encuentra la instalación FV.

El capítulo 1 aborda sobre las tecnologías FV en el mundo, su uso y cómo tienen el objetivo de abastecer electricidad mediante recursos alternativos no convencionales. En tal sentido, se muestra cómo estas tecnologías se van estableciendo en el Perú mediante proyectos, como al que pertenece este trabajo, los cuales permiten obtener mayor conocimiento sobre el funcionamiento de estas tecnologías en diversas regiones de nuestro territorio. Finalizando se muestran las diversas referencias en las que el trabajo se ha basado para el diseño del sistema de monitoreo y los objetivos de esta tesis para llegar a los resultados finales.

En el capítulo 2 se introducen los fundamentos teóricos del funcionamiento de los SFCRs respecto a los parámetros meteorológicos, los cuales influyen en su producción energética. Se muestran los diversos cálculos que se realizan usando los parámetros eléctricos y meteorológicos para poder estimar el performance deL SFCR de acuerdo con la norma IEC61724-1. Además, se detallan los requerimientos de esta norma, ya que serán tomados como referencia para el diseño del sistema de adquisición de datos en el siguiente capítulo.

En el capítulo 3 realiza el diseño de cada uno de los componentes a utilizar en el circuito de adquisición de datos. Se detallan las conexiones de los sensores que permiten hacer la medición de irradiancia y temperatura del módulo FV. Además, se muestra el dimensionamiento de la transmisión de datos para el registro en un ordenador a largas distancias. Además, se observará el programa que permite realizar este registro y visualizar los datos obtenidos en tiempo real mediante una interfaz gráfica.

El capítulo 4 se observa el funcionamiento general del sistema de adquisición analizando la comunicación de cada uno de los componentes elegidos. Los datos recolectados serán mostrados mediante la interfaz visual diseñada. A partir de estos datos recolectados se evalúa la precisión de la adquisición mediante una comparación con otros sensores externo con el objetivo de cumplir con la norma IEC. Además, se ejemplificará el cálculo de las productividades referencial diaria y final para estimar el performance del SFCR.

Finalmente se muestran las conclusiones, recomendaciones y trabajos futuros, los cuales están relacionados a los objetivos de la tesis. También se muestran las referencias bibliográficas, las cuales respaldan la información empleada en los diferentes capítulos. En los anexos se podrá encontrar el diseño esquemático del circuito de adquisición de datos para su reproducibilidad del prototipo funcional mostrado en este trabajo.

Capítulo 1

Marco problemático: Sistemas de adquisición aplicados a sistemas fotovoltaicos (FV)

1.1. Cambio orientado a energías renovables

Hoy en día el uso de la energía eléctrica es de vital importancia para el desarrollo económico y social de un país debido a que es un insumo esencial para la producción de gran parte de los bienes y servicios de la economía [1]. Asimismo, es un componente básico para la creación de calidad de vida de los ciudadanos en el país.

La electricidad es una forma de energía altamente difundida debido a sus posibilidades de generación y conversión, entre ellas está la energía térmica, mecánica y luminosa. A la vez la energía eléctrica se destaca por tener diversas fuentes de generación como centrales nucleares, termoeléctricas, hidroeléctricas, eólicas y solares (mediante sistemas fotovoltaicos) [2].

Las fuentes de producción energética más usadas en el Perú son las hidroeléctricas y las termoeléctricas a base de gas natural. Usando combustibles fósiles se genera hasta 20.8 TWh, en centrales hidroeléctricas 22.3 TWh y en total [1], se generaba hasta 48 TWh de energía eléctrica en 2015. La generación de energía eléctrica a base de combustibles fósiles es limitada y afecta al medio ambiente. Por este motivo se está cambiando la forma de producir electricidad a través de fuentes renovables que puedan trabajar conjuntamente con la generación de energía usada en el país [3].

Actualmente el Perú se está adaptando al manejo de producción eléctrica mediante recursos renovables que sean respetuosos con el medio ambiente. Existe una propuesta de ley, la cual aún no ha sido aprobada, llamada decreto legislativo No. 1221 que aprueba el reglamento de generación distribuida [4], donde se permite usar la red de distribución eléctrica para trabajar en conjunto con recursos renovables.

Los recursos renovables son fuentes de energía abundante, los cuales vuelven a estar disponibles en un período corto de tiempo. Las hidroeléctricas se consideran recursos renovables porque el ciclo del agua se está renovando constantemente y cuando hay una subida en los ríos se puede aprovechar mejor la energía potencial para transformarla en electricidad. Por otro lado, la energía fotovoltaica (FV) también es una fuente de energía renovable, ya que el nivel de irradiancia del sol varía en el tiempo y se va renovando según las condiciones climáticas del lugar.

1.2. Avances de la Energía Fotovoltaica en el mundo

En vista del aumento en las tarifas eléctricas, es cada vez más atractivo el uso de otras fuentes renovables no convencionales como la energía fotovoltaica. Por ello, muchos países han optado por cambiar su forma de producción energética a estos recursos no convencionales generando más del 30 % de la electricidad del lugar.

La tecnología fotovoltaica (FV) es el recurso para generación de energía eléctrica, el cual ha tenido una tasa de crecimiento significativa en la última década. El precio de estas tecnologías tuvieron una tendencia a la baja en 2016, ya que la oferta en los registros de producción energética renovable bajaron en Latinoamérica, Medio Oriente, al norte de África y la India [3].

Los países como China (48.2 GW), Estados Unidos (10.6 GW) y la India (7.1 GW) son aquellos que fomentan la producción de energía eléctrica a través de recursos FV y en [5] se espera que puedan aumentar el nivel de producción energética de cara al futuro. Esto demuestra que cada vez las instalaciones de gran escala en diferentes zonas van aumentando y así se descentraliza la generación eléctrica mediante múltiples generadores alternativos.

1.3. Avances en los estudios de Energía fotovoltaica en el Perú

En el Perú la Universidad Nacional de Ingeniería de Lima (UNI) en cooperación con la Universidad de Jaén de España realizaron el proyecto “Emergiendo con el Sol”, cuyo objetivo es fomentar investigación sobre la generación de energía eléctrica no convencional a base de recursos FV conectados a red con la tecnología de módulos FV más comercial del mercado.

Entre otros proyectos de distribución de energética FV en el país, el gobierno promueve más esta forma de generación para la población rural aislada [6]. Existe una gran necesidad de usar estos recursos, pero en el país existe desconocimiento y poca experiencia manejando sistemas de generación, lo cual representa otra barrera para aceptar de manera definitiva estas tecnologías y por ello aún no se muestra como una demanda extendida por gran parte de la población.

Con el objeto de evaluar de manera correcta el potencial FV de la zona geográfica del Perú, además de previsiones de producción estimadas se muestra la imagen del atlas solar en la figura 1.1. Este atlas solar muestra un parámetro muy importante para el dimensionamiento e implementación de los sistemas FV llamado índice de **Productividad Final** (inglés: final yield). Este dato depende de las condiciones ambientales del lugar donde se desean implementar los sistemas FV, además permite predecir su producción energética y con esto poder hacer cálculos técnico-económicos.

La **Productividad Final** de la Figura 1.1 indica de manera teórica cuánto de energía (kWh) se puede generar anualmente por cada potencia pico (kWp) instalada. Con esto se puede obtener el tiempo de retorno de la inversión que se hizo al implementar los sistemas FV. Se puede hacer una relación de proporcionalidad con un índice de **Productividad de Referencia** (inglés: referencial yield), comparando la producción de irradiancia solar medida, con la irradiancia ideal a condiciones estándares de medida (STC: 1000 W/m²). A partir de estos dos parámetros de rendimiento se puede realizar el cálculo del performance que se requiere para detectar anomalías en el sistema y este es llamado **Rendimiento Global** (inglés: Performance Ratio) [7].

El **Rendimiento Global** es un parámetro que depende indirectamente de las condiciones ambientales del lugar. Este dato indica cuantitativamente las pérdidas de producción respecto a la generación solar en el lugar de instalación, es decir, se muestra si el sistema FV está aprovechando totalmente el recurso solar dado. Según las pérdidas de rendimiento calculadas

mediante este parámetro, se puede observar si el sistema está correctamente dimensionado e instalado, un **Rendimiento Global** aceptable está en un rango de 80 % a 100 %.

La **Productividad Final** y el **Rendimiento Global** también dependen de las tecnologías de módulos solares que se utilizan para montar los sistemas FV, ya que su eficiencia es distinta de acuerdo al lugar donde se instalen. La irradiancia y la temperatura hacen que se tenga un comportamiento diferenciado por cada tecnología, ya que están compuestos de distintos materiales tratando de mejorar su rendimiento y acortar costos de producción.

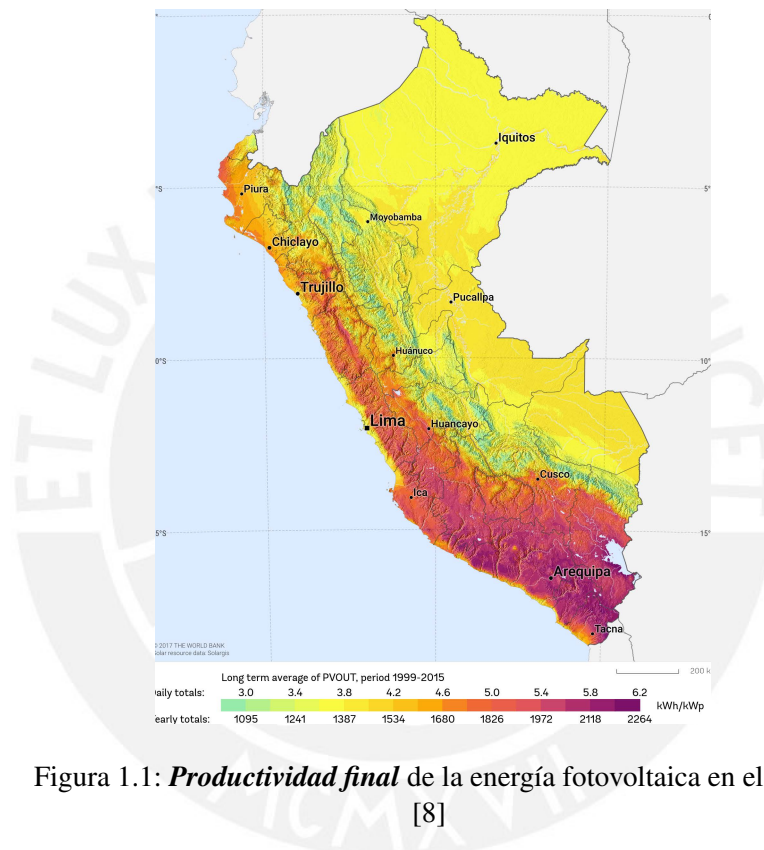


Figura 1.1: **Productividad final** de la energía fotovoltaica en el Perú. [8]

1.4. Clasificación de las Tecnologías Fotovoltaicas (FV)

Existe una amplia gama de módulos FV con diferentes tecnologías, las cuales representan sus características constructivas y eléctricas. Las características más predominantes en estas tecnologías son la eficiencia, voltaje en circuito abierto, voltaje en el punto de máxima potencia, corriente en cortocircuito, voltaje DC en el punto de máxima potencia, corriente DC en el punto de máxima potencia y el porcentaje de pérdida de producción respecto a la temperatura del módulo FV.

La eficiencia depende de las características constructivas del módulo FV y según esto se clasifican en diferentes tecnologías. En la Figura 1.2 se muestra tecnologías cristalinas y no cristalinas clasificándolas según su eficiencia. Las tecnologías más comerciales que se observan son las Passivated Emitter and Rear Contact (PERC), Aluminium Back Surface Field (Al-BSF), Thin film no cristalinos, ya que como su nombre lo indica son de lámina delgada y también están los Heterojunction with Intrinsic Thin layer (HIT) Solar Cell siendo estas de mayor eficiencia.

Hoy en día las tecnologías que tienen una tendencia a ingresar al mercado mundial son las PERC, HIT e inclusive las tecnologías Copper indium gallium selenide (CIGS) Solar Cells de capa delgada donde a pesar de ser menos eficientes que las tecnologías comerciales, tienen una menor pérdida de producción eléctrica por influencia de la temperatura. Esta última se puede aprovechar en lugares donde la temperatura ambiental sobrepasa los 25 °C, ya que la producción eléctrica va a disminuir en menor proporción. En la Figura 1.3, se observa la tendencia de las tecnologías a entrar al mercado con mayor protagonismo en los próximos años. El reporte ITRPV2019 muestra cuál fue el dominio de mercado en 2018 y se vió que es muy aproximado a lo que se predijo [9].

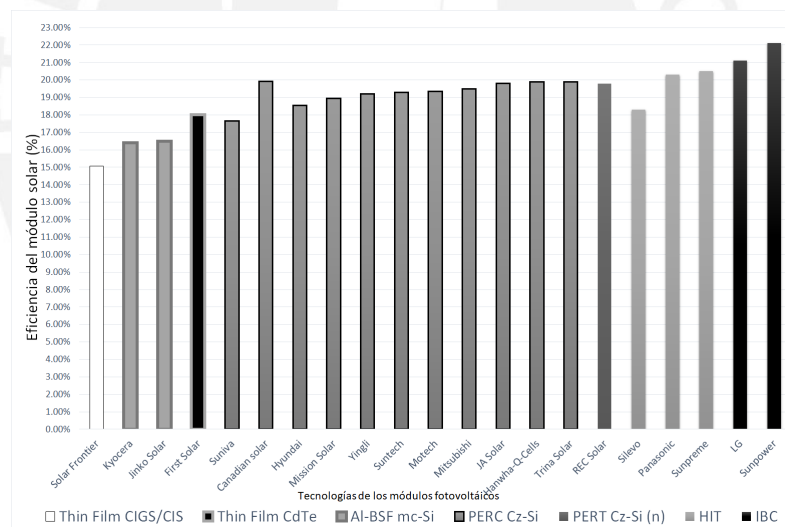


Figura 1.2: Tabla de eficiencias por tecnología de módulos FV

Se puede decir que a raíz del reporte [9] que la tecnología BSF, hasta ahora la más comercial y competitiva, está perdiendo presencia en el mercado. Como todo equipamiento tecnológico se mejora constantemente, las tecnologías FV se mejoran con nuevos materiales para su producción con el objetivo de aprovechar cada vez más el impacto meteorológico de los lugares de instalación aumentando la eficiencia de los mismos. Se estima que las tecnologías PERC, HIT y CIGS puedan dominar el mercado en los próximos años, ya que se ha aumentado su capacidad de producción y se ha mejorado su rendimiento de generación eléctrica.

Trend: share of cell technologies

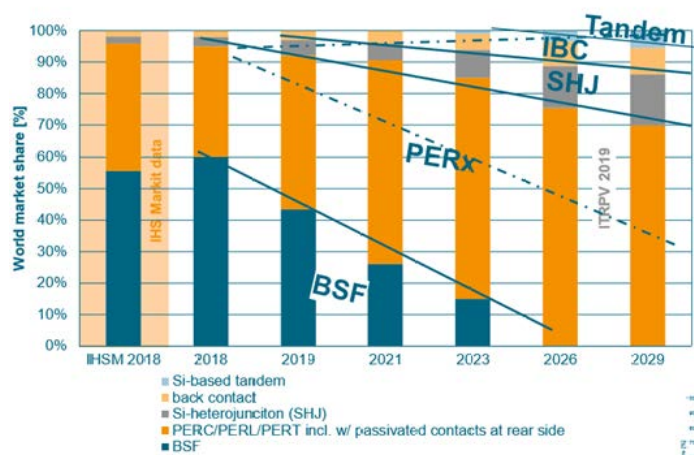


Figura 1.3: Presencia en el mercado de las tecnologías FV.
[9]

1.5. Investigación del grupo MatER-PUCP en Energía Fotovoltaica

El grupo de Ciencia de Materiales y Energías Renovables (MatER-PUCP), es un grupo de investigación dedicado al estudio de las características y propiedades los materiales semiconductores ante distintas condiciones de operación y sus aplicaciones en la ingeniería. En este caso, se tiene como objetivo principal realizar investigaciones en distintas regiones del Perú de las tecnologías FV a condiciones reales de operación.

En el Perú se requiere cada vez más Sistemas Fotovoltaicos Conectados a la Red (SFCR) como el de la Figura 1.4, ya que se vuelve viable financieramente y se ve como una fuente de energía sostenible para el futuro. Al ver esta necesidad de investigación de las diferentes tecnologías de paneles solares comerciales, el grupo de investigación MatER-PUCP propuso un proyecto de investigación aplicada donde se estudiará el comportamiento de estos módulos FV, llamado “Evaluación energética y técnico-económica de la generación de energía eléctrica renovable con nuevas tecnologías fotovoltaicas en diferentes zonas climáticas del Perú”.

A nivel mundial la mayoría de sistemas son SFCR, cuyo principal objetivo es generar energía eléctrica con un alto grado de modularidad con respecto a su potencia que puede ser inyectada a la red comercial de distribución. Esta aplicación, a comparación de otras en el rubro como sistemas aislados e híbridos con batería, tiene mucho éxito a nivel mundial porque es de bajo costo y simplificada, ya que requiere pocos materiales y la instalación se realiza rápidamente.

En las universidades de Lima (Pontificia Universidad Católica del Perú - PUCP y Universidad Nacional de Ingeniería - UNI), Arequipa (Universidad Nacional San Agustín de Arequipa - UNSA), Tacna (Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann - UNJBG), Puno (Universidad Nacional de Juliaca - UNAJ) y Amazonas (Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas - UNTRM) se investigarán el rendimiento energético de las tecnologías PERC, HIT y CIGS. Se instalarán estos tres tipos de sistemas FV en cada una de las universidades con el objetivo de ver su producción energética respecto al comportamiento meteorológico del lugar.

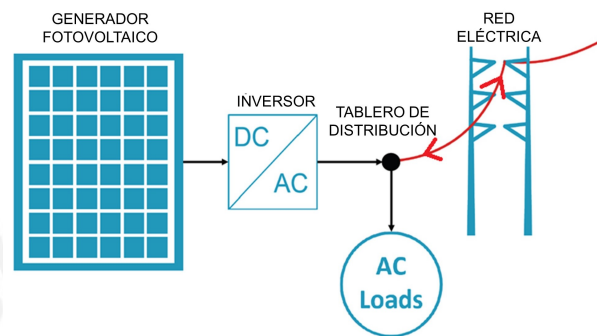


Figura 1.4: Integración de un sistema fotovoltaico conectado a red.
[10]

1.6. Estado del Arte

En el proyecto precedente “Emergiendo con el Sol”, se tuvo como objetivo promover un cambio en la generación energética mediante tecnologías FV. Esto lo hacen obteniendo los parámetros necesarios para definir de manera experimental el rendimiento energético y el performance que tienen las tecnologías comerciales, en este caso Al-BSF.

En el proyecto de investigación aplicada de MatER-PUCP se llevarán a cabo estudios de rendimiento energético y modelamiento para la predicción de productividad energética, por ello se necesita de un sistema que pueda adquirir las mediciones de parámetros medioambientales y eléctricos, con el fin de obtener la **Productividad Final** y el **Rendimiento Global**.

Estos estudios experimentales servirán de comparativa con el atlas solar de la Figura 1.1, ya que este mapa brinda datos de manera teórica y se necesita conocer su veracidad de manera experimental. Por este motivo se tomarán muestras de datos mediante sensores que envíen sus resultados hacia un sistema de adquisición (DAQ).

Existen diferentes sistemas de monitoreo comerciales, los cuales no están integrados todos los parámetros que se exigen en las normas de la comisión eléctrica internacional (IEC). Los parámetros más importantes que se piden registrar son irradiancia, temperatura del módulo FV, voltaje de salida del módulo FV en corriente continua (DC), corriente de salida del módulo FV en corriente continua (DC) y potencia de salida del inversor en corriente alterna (AC).

También se han diseñado diferentes sistemas de monitorización como se muestra en la Tabla 1.1, los cuales se tomarán en cuenta para la implementación del DAQ. Se muestran los parámetros que se miden con los DAQ's y se observa que cada sistema tiene un error en la medición y esto se requiere evaluar, ya que debe cumplir con los estándares de la IEC.

La bibliografía de Fuentes et al. [11] se acerca a lo que se quiere conseguir respecto al cumplimiento de las normas de medición, ya que todos los datos medidos con su DAQ son validados por una referencia de medición y como resultado se brinda un error de medida que se encuentra en el rango establecido por la norma IEC61724-1.

Tabla 1.1: Comparación de resultados y similitudes en la bibliografía para monitoreo de sistemas fotovoltaicos

ESTADO DEL ARTE PARA MONITOREO DE PARÁMETROS EN SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS A RED (SFCR)					
Autores	Nombre / Bibliografía	Valores Muestreados	Calibración/Validación		
			Ajuste de linealidad	Error de irradiancia medida	Ajuste de dispersión
M. Fuentes, M. Vivar, J. M. Burgos, J. Aguilera, J. A. Vacas	Design of an accurate, low-cost autonomous datalogger for PV system monitoring using Arduino™ that complies with IEC standard [11]	Voltaje, Corriente, Temperatura Ambiental, Irradiancia y Temperatura del módulo FV	0.99	RSME <2.7139 %	0.99
López - Vargas, M. Fuentes, M. Vivar y F. J. Muñoz - Rodríguez	Low-Cost Datalogger Intended for Remote Monitoring of Solar Photovoltaic Standalone Systems Based on Arduino™ [12]	Voltaje, Corriente, Temperatura Ambiental, Irradiancia y Temperatura del módulo FV	-	RSME <4.288 %	-
N. Erraissi, M. Raoufi, N. Aarich, M. Akhsassi y A. Bennouna	IMPLEMENTATION OF A LOW-COST DATA ACQUISITION SYSTEM FOR "PROPRE.MA" PROJECT [13]	Voltaje, Corriente, Temperatura Ambiental, Irradiancia, Temperatura del módulo FV y Potencia Alterna (AC)	0.99103	RSME <3.109 %	0.99898

1.7. Objetivos de la Tesis

1.7.1. Objetivo general

Esta tesis tiene como principal objetivo el diseño e implementación de un sistema de adquisición de datos que permita tomar registros de irradiancia y temperatura del módulo FV. Este sistema de monitoreo debe ser instalado junto a un SFCR para medición de parámetros meteorológicos que influyen en su producción energética. Con ayuda de los datos registrados por este sistema, relacionándolos con los parámetros eléctricos que brindan los inversores, se podrá evidenciar el rendimiento de las tecnologías FV en cada una de las regiones de instalación.

1.7.2. Objetivos específicos

- Diseño e implementación de un hardware maestro que adquiera los datos de sensores de irradiancia y temperatura, los envíe hacia un ordenador mediante el protocolo RS485 y permita registrar los datos en tiempo real cumpliendo con estándares de la IEC.
- Diseño e implementación de una interfaz visual, el cual permita el guardado de los datos en un ordenador y pueda mostrar los parámetros en tiempo real mediante tablas y distintos gráficos.
- Ensayos de laboratorio donde se comparen las mediciones realizadas por el sistema de adquisición diseñado con medidas de referencia con sensores externos y poder validar que los parámetros medidos cumplan con la norma IEC61724-1.
- Análisis de los datos obtenidos para el cálculo de la **Productividad Final**, **Productividad Referencial** y el **Rendimiento Global** de manera experimental usando los parámetros obtenidos mediante los inversores y el sistema de adquisición de datos desarrollado.

Capítulo 2

Fundamentos teóricos: Estándares de medición de parámetros que afectan al comportamiento del SFCR

Como se observó en el capítulo 1, para la implementación de los Sistemas Fotovoltaicos Conectados a Red (SFCR) es necesario contar con un sistema de monitoreo, el cual permita registrar los parámetros que influyen en el funcionamiento de estos. A partir de esto se pueden detectar anomalías en el sistema y determinar cuánto de energía eléctrica se está generando respecto al comportamiento meteorológico del lugar. Además, los cálculos de productividad final, referencial y rendimiento global hallados a partir de los datos experimentales servirán para el cálculo del impacto económico real a futuro.

En este capítulo, serán explicados los conceptos más importantes que se deben tomar en cuenta para el monitoreo de un SFCR. Se muestra la importancia de cada uno de los parámetros a ser medidos y la normativa que permite corroborar si el sistema de adquisición está registrando estos datos de manera precisa según sus estándares. Además, se detallará el diagrama de bloques del sistema de adquisición con el objetivo de que se conozca funcionalidad de los componentes elegidos, para luego en el capítulo 3 se muestre cómo se eligieron estos materiales.

2.1. Conceptos básicos para monitoreo de un SFCR

2.1.1. Sistema de adquisición de datos

Un sistema de adquisición de datos es aquel conformado por hardware y software dedicado, el cual permite extraer información a partir de diversas fuentes. En este sentido, estos sistemas tienen una comunicación directa con un servidor o una computadora, el cual permiten mostrar los datos obtenidos en una interfaz visual [14]. En este caso, el sistema registra y muestra en este software de monitoreo los parámetros de irradiancia global (W/m^2) y temperatura del módulo ($^{\circ}C$), los cuales afectan directamente al comportamiento eléctrico de las tecnologías fotovoltaicas (FV) [15].

En las especificaciones técnicas que brindan los fabricantes de módulos solares, ponen a disposición la información de parámetros eléctricos devueltos por un módulos que han estado trabajando a una irradiancia de $1000 W/m^2$, una temperatura de $25^{\circ}C$ y una distribución espectral AM1.5. A estas condiciones ideales se los llama condiciones estándares de medida (STC) y están definidos de acuerdo a la norma IEC60904-3 [16].

Estas condiciones son ideales para el sistema FV y es improbable que suceda a condiciones reales de operación. Por ello, lo que se requiere es obtener registros energéticos en distintas zonas del Perú de manera experimental a través de la adquisición de irradiancia y temperatura del módulo y así determinar el comportamiento real de los sistemas FV.

2.1.2. Parámetros a monitorear

2.1.2.1. Irradiancia (G_I)

La irradiancia global en el plano fotovoltaico es la fuente de energía solar que incide en los sistemas FV y se considera como una de las principales variables atmosféricas que influye en el comportamiento eléctrico de las distintas tecnologías FV [15].

Este parámetro tiene un efecto predominante en los módulos FV respecto a otras variables atmosféricas, ya que de el dato depende la potencia máxima ($P_{m\acute{a}x}$) y la corriente de cortocircuito (I_{SC}) como se muestra en la ecuación 2.1, el cual es la máxima corriente que puede entregar el sistema FV cuando sus terminales están cortocircuitados [17].

Este parámetro es medido mediante sensores de irradiancia como piranómetros o módulos calibrados. Este último es un circuito comprendido entre un módulo solar y una resistencia de precisión, el cual permitirá tener al módulo trabajando en cortocircuito dando una corriente que pasa por la resistencia y varía conforme cambie la irradiancia incidente en el módulo FV.

$$G_I/G_{I,STC} = I_{SC,medido} / I_{SC,STC}(1000 \text{ W/m}^2; \text{AM1.5}) \quad (2.1)$$

Para verificar que el comportamiento eléctrico varía respecto al cambio de irradiancia mostrado en la Figura 2.1, en la tesis [15] se ha estimado la irradiancia directa como si fuera igual a la irradiancia global en el plano FV. Como se observa en esa figura, la relación entre la corriente de cortocircuito medida (I_{SC}) y la corriente de cortocircuito a STC ($I_{SC,STC}$) muestra un incremento proporcional al aumento de la irradiancia.

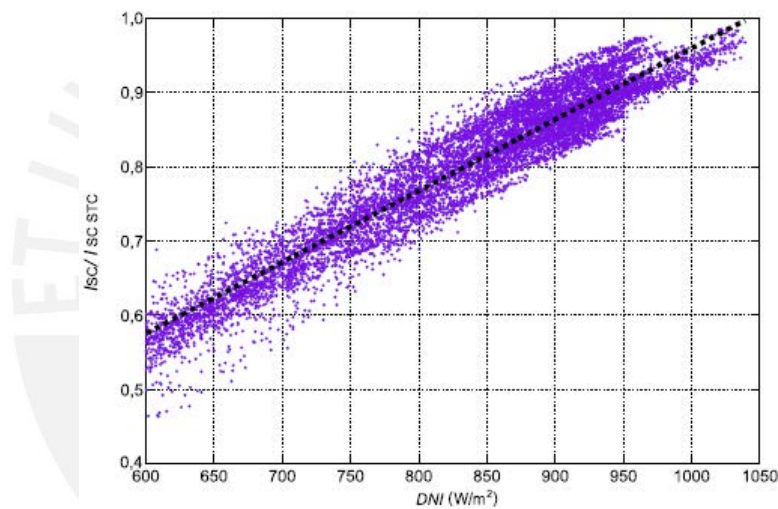


Figura 2.1: Influencia de la Irradiancia Directa (DNI) sobre la corriente de cortocircuito (I_{SC}) en relación al ($I_{SC,STC}$)

[15]

2.1.2.2. Temperatura del módulo FV (T_m)

El comportamiento eléctrico de los módulos FV viene influenciado por su propia temperatura, ya que al aumento de este, tiende a una disminución en su nivel de voltaje que entrega. El aumento de la temperatura en las celdas del módulo FV causan la disminución de la tensión de circuito abierto (V_{OC}), el cual es el voltaje máximo que entrega el sistema FV cuando no está conectado a ninguna carga y se puede verificar a partir de la ecuación 2.2. En esta ecuación se muestra un componente constante beta dado por el fabricante en la hoja de datos del módulo FV, el cual afecta la variación del V_{OC} respecto a la temperatura del módulo (T_m).

Este parámetro está relacionado a la irradiancia, ya que cuando esta aumenta, también se eleva la temperatura del módulo [18]. Para estimar el efecto de la temperatura en la producción eléctrica de los sistemas FV, esta debe ser adquirida mediante sensores que se adhieran a la superficie del módulo FV, ya que es difícil medir dentro de las celdas por el diseño constructivo del panel solar.

$$V_{OC}/V_{OC,STC} = 1 + \beta * [T_m - T_{m,STC}(25^{\circ}C)] \quad (2.2)$$

Para verificar que el comportamiento eléctrico varía respecto al cambio de temperatura mostrado en la Figura 2.2, en la tesis [15] se ha estimado la temperatura ambiental como si fuera igual a la temperatura presentada en el módulo FV. Como se observa en la Figura 2.2, la relación entre el voltaje de circuito abierto medido (V_{OC}) y el voltaje de circuito abierto a STC ($V_{OC,STC}$) muestra una disminución proporcional al aumento de temperatura.

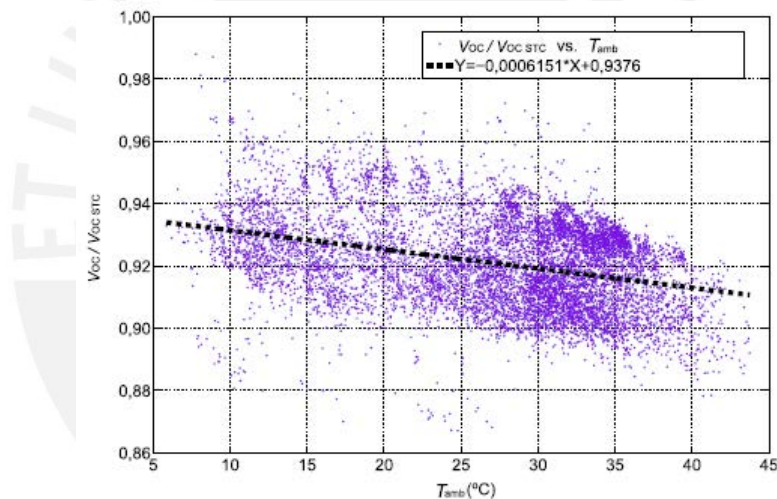


Figura 2.2: Influencia de la Temperatura ambiental (T_{amb}) sobre el voltaje de circuito abierto (V_{OC}) en relación al ($V_{OC,STC}$)

[15]

2.2. Importancia de la medición de los parámetros para SFCR

Cuando se instala un SFCR se requiere conocer cuánto de potencia va a generar el sistema y en cuánto tiempo va a retornar la inversión que se hizo. Para ello, se necesita calcular la productividad final del sistema, el cual depende de los parámetros eléctricos como son Potencia alterna (KW), Energía generada (KWh) y la Potencia instalada (KW_p) que se registra a partir de los datos que envían los inversor. A su vez, estos parámetros eléctricos dependen de los parámetros meteorológicos que se adquieren mediante el sistema de monitoreo.

En 2.3 se muestra la ecuación para el cálculo de la productividad final (inglés: final yield). Este parámetro representa el tiempo en el cual el sistema está funcionando a su máximo rendimiento que se instaló, por ello este depende de la potencia instalada y de la energía que genera el sistema en un intervalo de tiempo. De la Figura 1.1 se puede determinar la productividad final de manera teórica y en este caso se quiere corroborar esta información con datos experimentales [19].

$$Y_f = \frac{\text{Energía generada (KWh)}}{\text{Potencia instalada (KWp)}} \quad (2.3)$$

Por otro lado, se requiere conocer a qué condiciones ambientales va a estar instalado el sistema FV, por ello se necesita calcular la productividad referencial en la zona de instalación, el cual depende de la medición de irradiación (KWh/m²) en un intervalo de tiempo a partir del registro de la irradiancia en el plano FV (KW/m²) dado por el sistema de monitoreo.

En 2.4 se muestra la ecuación de la productividad referencial (inglés: referencial yield), el cual es un parámetro que relaciona la irradiación medida en un intervalo de tiempo y la irradiancia a condiciones estándares de medidas (1000 W/m²). Este dato representa el tiempo en el que el lugar está a una irradiancia a condiciones estándar de medida, para ello es necesario medir la irradiancia real en el plano fotovoltaico.

$$Y_r = \frac{\text{Irradiación (kWh/m}^2\text{)}}{\text{Irradiancia STC (1kW/m}^2\text{)}} \quad (2.4)$$

Para determinar el rendimiento real del SFCR se necesita determinar la productividad final y la referencial relacionando ambos en 2.5. Con esto se obtiene el rendimiento global del SFCR (inglés: Performance Ratio) que brinda información de cómo se ha instalado el sistema y según esto representa si está funcionando como se esperaba en el lugar instalado. Por ello, este parámetro se ve afectado tanto por la irradiancia como por la temperatura, ya que si se mantiene la irradiancia y baja la temperatura el Performance Ratio debería aumentar porque aumenta la energía producida por el SFCR.

$$PR = \frac{\text{Productividad final real}}{\text{Productividad referencial}} = \frac{Y_f}{Y_r} \quad (2.5)$$

2.3. Bases Legales para monitoreo de SFCR

Las aplicaciones de monitoreo en SFCR requieren trabajar a condiciones ambientales hostiles (viento, humedad, polvo entre otros), que se deben tomar en cuenta para el diseño de los equipos. Por ejemplo, las condiciones de temperatura a las que pueden trabajar las aplicaciones FV son de $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $85\text{ }^{\circ}\text{C}$ y el sistema de adquisición debe ser adaptable a diversos sensores que permita el registro preciso de los parámetros exigidos [11]. Asimismo, la precisión de los sensores es esencial para el cumplimiento de los estándares IEC, ya que estos deben ser validados con sensores de referencia que comprueben su correcto funcionamiento.

El diseño de este sistema de monitoreo será respaldado por un procesador de bajo costo en comparación a los sistemas comerciales, este estará limitado a cumplir con las normas IEC. Los parámetros mínimos que se necesitan adquirir para una evaluación precisa de los sistemas FV se presentan en la Tabla 2.1, el cual concuerda con los parámetros y exigencias de precisión que se pide en la norma IEC61724-1 [20].

Tabla 2.1: Parámetros que serán medidos en tiempo real en los sistemas fotovoltaicos exigidos por IEC61724

Parámetros Generales	Parámetros específicos	Simbología	Precisión
Meteoreológicos	Irradiancia global en todo el arreglo FV (Directa + Difusa)	G_I	RMSE $<5\%$
	Temperatura Ambiental	T_{amb}	Temperatura: 2°C o 2K
Generador Fotovoltaico	Voltaje de Salida DC	V_A	RMSE $<1\%$
	Corriente de Salida DC	I_A	RMSE $<1\%$
	Temperatura de módulo FV	T_m	Temperatura: 2°C o 2K
Inversor	Potencia de salida AC	P_{AC}	RMSE $<2\%$

Las normas internacionales establecen los parámetros a ser medidos por un sistema de monitoreo, específicamente la norma IEC61724-1 [20]. La Figura 2.3 muestra el diagrama de bloques de las conexiones del Sistema Fotovoltaico Conectado a Red (SFCR), también se precisan los parámetros que se van a monitorear en el presente trabajo, estos son la irradiancia solar (G_I) y la temperatura del módulo FV (T_m).

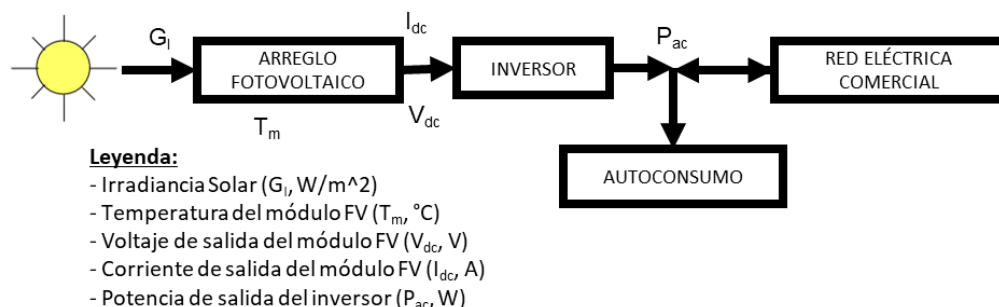


Figura 2.3: Diagrama de bloques del flujo de energía eléctrica en los SFCR.

2.4. Funcionamiento general del sistema de adquisición de datos

El diagrama de bloques presentado en la Figura 2.4 presenta el esquema general de las conexiones de los diversos sensores al circuito de adquisición (circuito DAQ) con sus acondicionadores de señal, los cuales se usarán para medir los parámetros que influyen en la producción eléctrica de los módulos FV. El circuito DAQ registra los datos de salida de los sensores que serán monitoreados y estos serán mandados vía serial mediante conexión alámbrica vía Modbus hacia un ordenador donde se mostrarán los datos en tiempo real a través de una interfaz visual.

Para el monitoreo de irradiancia (G_T) se conectarán dos instrumentos de medición un piranómetro y un módulo calibrado. El piranómetro es un instrumento que mide la irradiancia en el plano fotovoltaico, el cual puede medir en un rango aproximado de 0 a 2000 W/m² en un rango espectral de 300 a 2800 nm. Para disminuir el error de medición el mismo sensor usa una termopila, la cual al medir la temperatura que llega al sensor, logra corregir la irradiancia medida anteriormente [21].

En cambio, el módulo o celda calibrada es un sensor preparado en un laboratorio para medir irradiancia. El sensor es un panel solar que se cortocircuita en sus terminales positivo y negativo con una resistencia semejante a la de un cable, el cual no debe cambiar su resistencia con la variación de temperatura. A pesar de que los módulos calibrados no son sensores que son corregidos por la variación de temperatura y solamente miden a través del módulo como un fotodiodo, este permite medir la irradiancia a iguales condiciones que los módulos FV instalados para inyectar a la red eléctrica.

Para el registro de temperatura del módulo FV (T_m) se conectan dos sensores RTD en la cara posterior del panel (al centro y en la esquina lateral). Estos sensores varían su resistencia cuando varía la temperatura del cuerpo al que se encuentra acoplado. Para calibrarlo se necesita una referencia y para este caso se usa otro sensor con un sistema de adquisición calibrado que mida temperatura, en los mismos puntos que el sensor al calibrar de manera simultánea y se calcula el error por medición.

Para la calibración son calculados el error cuadrático medio (RMSE %) y el error de sesgo medio (MBE %), los cuales ayudan a determinar el error relativo que hay entre los datos medidos por el

DAQ y los datos referenciales. Con el RMSE % se puede calcular el nivel de dispersión y el error promedio de todos los datos registrados. Con el MBE % da información de los dato si están sobre o debajo del ajuste aplicado [18].

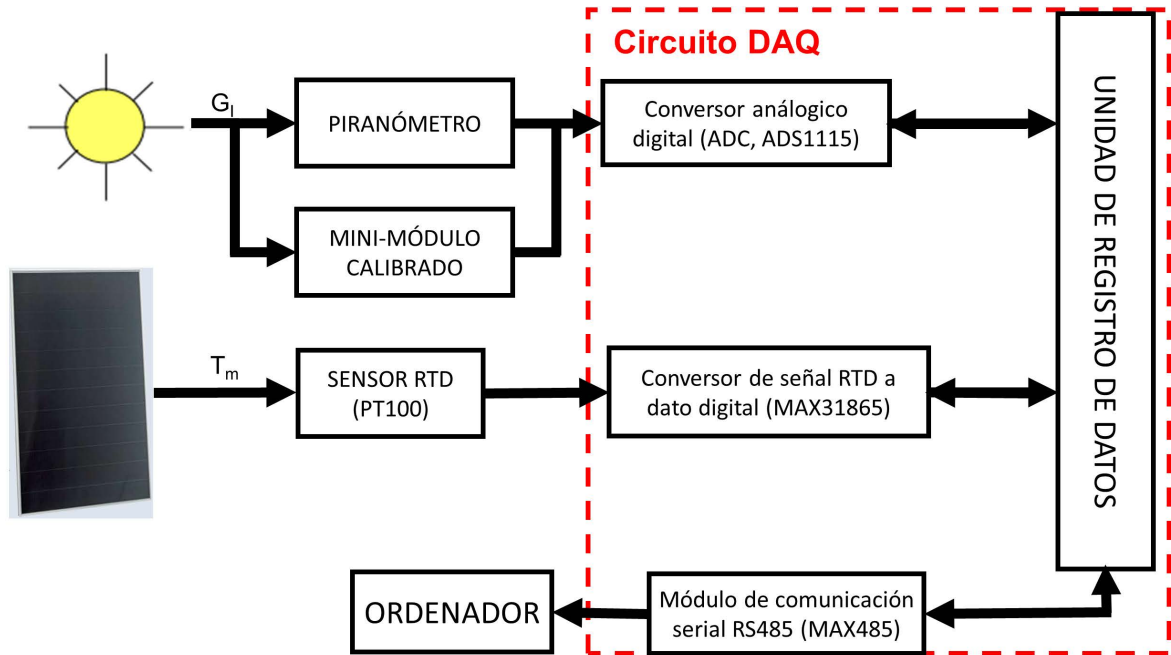


Figura 2.4: Diagrama de Bloques para sistema de adquisición de datos conectados a sensores

Capítulo 3

Diseño e implementación del sistema de adquisición de datos y monitoreo en una interfaz visual de usuario

En el proyecto del grupo MatER-PUCP se han instalado 6 sistemas fotovoltaicos conectados a red (SFCR). Los inversores contenidos en estos sistemas brindan parámetros eléctricos, a través de su interfaz de usuario en una plataforma web, dados por los módulos solares y por ellos mismos. Cada uno de estos sistemas fotovoltaicos (FV) necesitan un dispositivo de monitoreo que permita registrar los parámetros meteorológicos que influyan en su producción eléctrica, el diseño para la construcción de este dispositivo será evaluado en este capítulo.

El capítulo se enfocará en el diseño del hardware maestro para monitoreo de parámetros que influyen en la producción eléctrica del módulo FV, el programa para que la unidad de registro pida los parámetros a los acondicionadores de señal y el diseño del software de monitoreo para visualización de datos en tiempo real. Este sistema de adquisición de datos (DAQ) se usará para registro de irradiancia y temperatura de módulos FV. Se mostrarán los cálculos y detalles de diseño que cumplan con los estándares que exige la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC) en monitoreo de sistemas FV.

Asimismo, se estará desarrollando cada bloque presentado en la Figura 2.4, donde se muestra cómo funcionará el sistema DAQ en conjunto con los SFCR y sus conexiones; así como las características de los sensores y los acondicionadores de señal a utilizar. Los estándares de la norma IEC61724-1 ayudarán en el diseño de los diferentes componentes acondicionadores de

señal, donde se necesitarán cálculos que validen el cumplimiento de la norma ayude al registro de irradiancia y temperatura con mayor precisión. Serán elegidos los componentes necesarios para la transmisión de datos hacia el ordenador.

El contenido de este capítulo se publicó por primera vez en el artículo “Monitoring system based on IEC standards for irradiance and module temperature measurements in photovoltaic systems” en IOPSCIENCE Journal of Physics: Conference Series 2021 [22].

3.1. Propuesta de diseño general

La Figura 3.1 expone las conexiones de los 3 SFCRs que se están instalando en el proyecto liderado por el grupo MatER-PUCP funcionando en junto al sistema DAQ. Este sistema de monitoreo estará registrando de manera continua los parámetros meteorológicos. En la misma figura se muestra la conexión de los piranómetro y mini-módulos calibrados, los cuales son sensores de irradiancia. Además, se observa la conexión de los sensores de temperatura de los módulos FV. Estos parámetros serán mandados a la unidad de registro por los acondicionadores de señal para cada sensor, para luego ser enviados hacia el ordenador que permitirá su guardado en un fichero online y visualización en tiempo real mediante un software de monitoreo.

Los SFCRs instalados cuentan con módulos solares de las 3 tecnologías que tendrán un mayor dominio en el mercado mundial FV, como se observó en el capítulo 1 las tecnologías a usarse en este proyecto son HIT, PERC y CIGS. El arreglo FV de cada una de las tecnologías están conectados a un inversor, el cual convierte su tensión de entrada en corriente continua (DC), a una tensión en corriente alterna (AC); tanto para su conexión a la red comercial de distribución, como para su autoconsumo.

Los inversores proporcionan los parámetros eléctricos provenientes del arreglo FV en DC y generados por sí mismo que inyecta a la red eléctrica en AC. Estos son datos necesarios para el cálculo de la productividad final, ya que este permite conocer la producción real del sistema FV instalado respecto a su capacidad máxima de la instalación. Asimismo, se transmiten los datos generados por su sistema de comunicación a través de un router como se observa en la Figura 3.1 mediante el protocolo RS485, el cual permite enviar los datos vía alámbrica hasta 1200 metros de distancia y ser visualizados en el software del inversor online.

Mediante los inversores instalados para el proyecto se están adquiriendo los datos de tensión, corriente y potencia DC proveniente del arreglo FV. También se registran las mediciones en AC como lo son tensión, corriente, frecuencia, factor de potencia, potencia activa, potencia reactiva y potencia aparente de generación energética mediante los inversores.

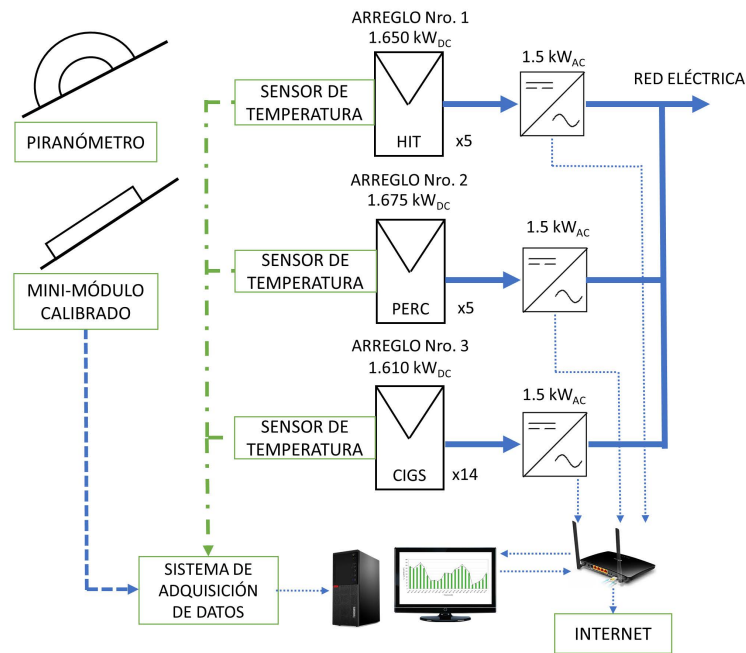


Figura 3.1: Esquema de funcionamiento del sistema de monitoreo conjuntamente con los Sistemas Fotovoltaicos Conectados a Red (SFCR).

3.2. Estándares IEC para implementar sistemas de monitoreo en SFCR y elección del componente usado como unidad de registro de datos

Para la medición de los parámetros físicos con mayor influencia en el funcionamiento de los sistemas fotovoltaicos conectados a red (SFCR) se debe cumplir con las exigencias que especifica la norma IEC61724-1 [20]. En esta, se exige recolectar los datos de los valores de irradiancia y temperatura de los módulos FV con restricciones de precisión y frecuencia de registro de datos.

Asimismo, la norma recomienda que para la medida de parámetros eléctricos y meteorológicos se debe guardar en un período de medición menor a 1 minuto. Para el registro de irradiancia se debe contar con una resolución menor a 1 W/m^2 y en el caso de la temperatura del módulo, la misma debe ser menor a $0.1 \text{ }^\circ\text{C}$. Estos valores se utilizarán para la elección de los acondicionadores de señal que permitirán el envío de datos de los sensores hacia la unidad de registro.

Como se observó en la Tabla 2.1 del capítulo 2, la norma indica los errores permitidos para cada parámetro que se registrará. La adquisición de datos de Irradiancia debe tener un error de medida menor al 5% respecto a una referencia calibrada, para la adquisición de temperatura se debe asegurar que la medición comparada con una referencia calibrada brinde un error de $\pm 2^{\circ}\text{C}$. Según esto, en el capítulo 4 se deberá mostrar el cumplimiento de la norma comparando los resultados medidos con otros datos de sensores referenciales calibrados.

Según lo mencionado anteriormente, la elección de los acondicionadores de señal para realizar las distintas mediciones será tomando como referencia las exigencias planteadas por la norma IEC. Pero, antes de realizar dicho diseño, se debe elegir una unidad de registro que comande los distintos componentes para recepción de datos de los sensores y envío de la trama hacia el ordenador de manera continua.

En la Tabla 3.1 se presentan diferentes módulos para control y monitoreo de sensores que se podrán usar como unidad de registro. Estos son similares y tienen las especificaciones necesarias para formar parte del sistema DAQ, pero el ATMEGA328P tiene la ventaja de ser el componente menos costoso de los 3 y de menor tamaño. Esto permitirá que el sistema desarrollado en este trabajo pueda ser de bajo costo, fácil instalación, mantenimiento y producción, ya que este será implementado en diversas regiones del Perú.

Tabla 3.1: Comparación de diferentes microcontroladores para ser usados como unidad de registro de datos en el sistema DAQ

	ATMEGA328P	ATMEGA2560	STM32H7
Ancho de bus de datos	8 bits	8 bits	32 bits
Protocolos de comunicación para periféricos externos	I ² C UART SPI	I ² C UART SPI	I ² C UART SPI CAN
Resolución conversor analógico digital (ADC)	10 bits	10 bits	16 bits
Números de canales digitales I/O	14/14	54/54	168/168
Disponible en el mercado local	Sí	Sí	Sí
Costo en el mercado local	30 soles (incluyendo ADC externo)	90 soles (incluyendo ADC externo)	60 soles
Empaque y dimensión (ancho x largo)	Empaque: PDIP 8.25 x 34.59 mm	Empaque: SMD 16.25 x 16.25 mm	Empaque: SMD en tarjeta de desarrollo 134.97 x 184.96 mm

3.3. Diseño de componentes electrónicos para la adquisición de irradiancia

Uno de los parámetros más importantes para la producción eléctrica de los SFCR es la irradiancia en el plano FV, ya que esta pasa a ser transformada en energía eléctrica para su utilización. Este parámetro se medirá mediante un módulo calibrado, el cual está conformado por un panel FV cortocircuitado en sus terminales positivo y negativo por una resistencia de precisión semejante a un cable de baja resistencia.

Con lo anteriormente mencionado, se permite que el módulo se encuentre mandando una corriente de cortocircuito a través de sus bornes con la resistencia, esta varía con la irradiancia inducida en el plano FV. Por ello, se debe medir la diferencia de potencial en la resistencia donde pasa la corriente de cortocircuito y amplificar ese voltaje para enviarlo hacia la unidad de registro de datos. La corriente máxima es dada por el fabricante del módulo FV cuando se llega a una irradiancia de 1000 W/m^2 .

Para construir el módulo calibrado se está utilizando una resistencia de precisión con un valor de 0.1Ω con $1/4 \text{ W}$ de potencia y una tolerancia de $\pm 1\%$. Con la resistencia escogida se cortocircuitarán los bornes de un módulo FV de 5W con un voltaje de circuito abierto de 21.6 V y una corriente de cortocircuito de 0.33 A a condiciones estándares de medida (STC: 1000W/m^2 y 25°C). El sensor consruído brinda mediciones analógicas, por ende es necesario convertir las mediciones análogas en registro digitales que puedan ser enviados hacia la unidad de registro. Los conversores analógicos-digitales (ADC) permiten realizar lo anteriormente expuesto, pero es necesario elegir uno adecuado que cumpla con los estándares IEC.

Luego es necesario calcular la resolución necesaria del ADC con el valor máximo que debe llegar el sensor y los pasos que se tiene que dar por cada cambio de voltaje para llegar al valor máximo. El fabricante indica que los parámetros máximos del módulo FV se dan a STC (1000W/m^2), por ende se tomará ese valor como el mayor que se podría llegar con el panel solar. La norma IEC61724-1 establece que se deben tomar pasos de medición de irradiancia por cada 1 W/m^2 . Usando estos datos se resuelve la ecuación 3.1, el cual permite obtener la resolución mínima necesaria para el ADC, obteniendo una resolución de 10 bits.

$$1\text{W}/\text{m}^2 = 1000(\text{W}/\text{m}^2)/2^n \quad (3.1)$$

Otro de los sensores utilizados para medición de irradiancia son los piranómetros, los cuales tiende a relizar sus sensado a través de la temperatura que le llega al sensor y un lente óptico que permite la entrada de la luz solar que aumenta la temperatura interna del mismo. Esto permite obtener un registro más amplio de la irradiancia solar por si se refleja este a través de un cuerpo y se amplifica en un período corto de tiempo llegando a poder registrar una irradiancia de hasta 2000 W/m^2 .

De igual manera que con el módulo calibrado, para realizar el cálculo de la resolución del ADC que se usará para el registro de las mediciones piranómetro, se necesita conocer el valor máximo del sensor y los pasos que se deben dar por cambio de voltaje para llegar al valor máximo, este es dado por la norma IEC. Por ello, a partir de la ecuación 3.2 se obtiene que la resolución mínima necesaria para el ADC es 11 bits.

$$1 \text{ W/m}^2 = 2000(\text{W/m}^2)/2^n \quad (3.2)$$

Se usará un mismo ADC para registrar los valores de salida de los piranómetros y módulos calibrados, el cual se usará como referencia la mayor resolución calculada (11 bits). Esta tendrá múltiples entradas para conectar múltiples sensores de irradiancia y realizar comparaciones de performance entre cada uno de ellos. Además, para evitar bits errados que distorcionen totalmente la medición, se está sobredimensionando 5 bits por encima de la resolución mínima calculada.

Tomando en cuenta las consideraciones dadas anteriormente, para medir la irradiancia en el plano FV se elige un ADC con una resolución de 16 bits que contiene un amplificador de ganancia programable, el cual permitirá ahorrar otro acondicionamiento que amplifique la señal de entrada dada en milivoltios (mV) hasta un máximo de 5V. A continuación, en la Tabla 3.2 se muestra una comparación entre los acondicionadores de señal que pudieran cumplir con los requerimientos dados y así elegir el adecuado para el sistema DAQ.

Tabla 3.2: Comparación de diferentes conversores de 16 bits según las características que se necesitan en el sistema DAQ.

	ADS1115	AD8319	AD9652
Resolución de 16 bits	Sí	Sí	Sí
Protocolo de comunicación I ² C	Sí	Sí	No
Compatibilidad con ATMEGA328P	Sí	No	No
Disponibilidad en el mercado nacional	Sí	No	No
Rango de conversión	0 - 4.096 V	0 - 5.5 V	-0.3 - 3.6 V

El componente llamado ADS1115 es un conversor análogo digital que cuenta con 16 bits de resolución. Mediante este componente se estará permitiendo la conexión de 4 entradas al sistema DAQ para medición de irradiancia (piranómetros analógicos o módulos calibrados). Cada una de las entradas se deben calibrar con un sensor de referencia para que se adquieran los datos cumpliendo con el error mínimo establecido en la norma IEC61724-1 [20].

La norma recomienda registrar parámetros que influyen en el comportamiento de los SFCR con un período de muestreo menor o igual a 3 segundos. Por ello, se debe conocer los períodos de operación de los componentes elegidos para acondicionar las señales de irradiancia. El ADS1115 es un ADC con un período de conversión de 1.16 milisegundos, este proceso se mantiene constante para que se manden los datos digitales a la unidad de registro de datos (ATMEGA328p) como se observa en la Figura 3.2. La comunicación de datos lo realiza después de la conversión en 4.5 us, por ende cumple con lo establecido por el estándar IEC.

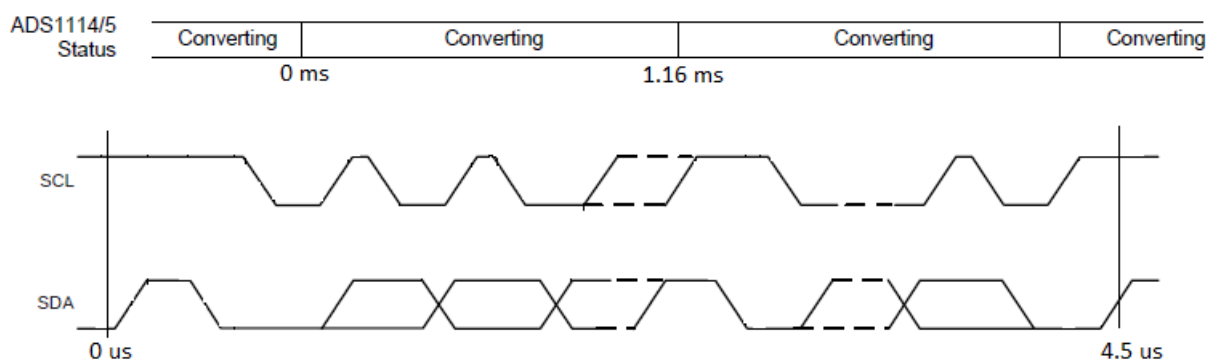


Figura 3.2: Diagrama de tiempos de operación del ADS1115 para convertir y enviar los datos analógicos

3.4. Diseño de componentes electrónicos para adquisición de temperatura del módulo FV

La temperatura en el módulo FV se está midiendo a través de dos sensores RTD montados en la parte trasera del mismo. Uno de estos sensores se encuentra al centro del módulo y el otro sensor a 2/3 de la esquina del panel FV como se muestra en la Figura 3.3. Estos tienen 4 puntas para evitar el efecto de la caída de tensión y tienen un rango de medición de -50 °C a 150 °C.

Para obtener la medición de estos sensores, se debe inducir una corriente donde se permita obtener el valor de voltaje a partir de la variación de resistencia que hace variar el sensor por el efecto de la temperatura. Este valor de voltaje puede ser adquirido mediante un conversor analógico-digital (ADC) donde se manden los datos digitales hacia la unidad de registro.

Para la elección del ADC se realiza el cálculo de la resolución necesaria para el registro de temperatura, donde se toma en cuenta la medida máxima que se puede obtener a través del sensor RTD (PT100: 150 °C) y los pasos que se debe variar por cada cambio de resistencia. Este último es dado por la norma IEC, el cual establece registrar temperatura como máximo cada 0.1 °C. Mediante la ecuación 3.3 obtenemos una resolución mínima de 11 bits para el ADC y para evitar pérdida de información por bits errados se podrá sobredimensionar esta resolución. Para una adecuada elección del acondicionador de señales para sensores RTD, en la Tabla 3.3 se ha realizado una comparación de diferentes módulos o equipos con los requerimientos especificados para la adquisición de temperatura en el sistema DAQ.

$$0,1^{\circ}C = 150^{\circ}C/2^n \quad (3.3)$$

Tabla 3.3: Comparación de diferentes equipos para adquirir datos de sensores RTD según las características que se necesitan en el sistema DAQ.

	MAX31865	ACT20P	AKOS203P
Salida del equipo	Digital	Digital	4-20 mA
Protocolo de comunicación SPI	Sí	No	No
Compatibilidad con ATMEGA328P	Sí	No	Sí
Disponibilidad en el mercado nacional	Sí	No	No
Configuración de PT100 admitido	2 - 4 hilos	2 - 4 hilos	2 -3 hilos
Rango de medición	-40 – 300 °C	-200 – 850 °C	-200 – 850 °C

Para el registro de este parámetro se utilizará el módulo MAX31865 que permite convertir la señal RTD a un valor digital, ya que contiene un ADC de 15 bits donde se cumple con el criterio mínimo obtenido de la ecuación 3.3. El MAX31865 es un módulo que permite tener una entrada para RTD de 4 puntas generando una corriente de 5.75 mA en el sensor; y según la resistencia que tenga el PT100 a cierta temperatura se enviará una señal de voltaje hacia su ADC interno.

El período de muestreo máximo que la norma recomienda para registrar parámetros meteorológicos debe ser no mayor a 3 segundos. En el caso del registro de temperatura con el módulo conversor de señal RTD a valor digital MAX31865 según su hoja de datos el ADC de 15 bits tiene un tiempo de conversión constante de hasta 66 milisegundos como se observa en la

Figura 3.4. Después de realizar la conversión, este acondicionador de señal permite la comunicación de datos mediante el protocolo SPI que demora hasta 0.6 ms para enviar los datos hacia la unidad de registro, por ende se cumple con lo establecido en el estándar IEC.

Como se observó en la Figura 3.1, en el proyecto se están evaluando 3 arreglos FVs de tecnologías distintas. Por ello, es necesario realizar la medición de temperatura para 1 de los módulos correspondiente a cada arreglo y esto quiere decir que en el circuito diseñado para este trabajo se deben adquirir datos de hasta 6 sensores de temperatura.

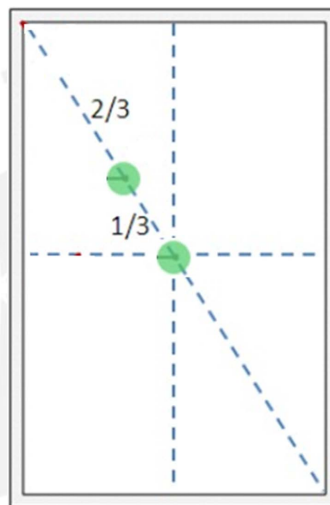


Figura 3.3: Posición de montaje para los sensores de temperatura PT100.

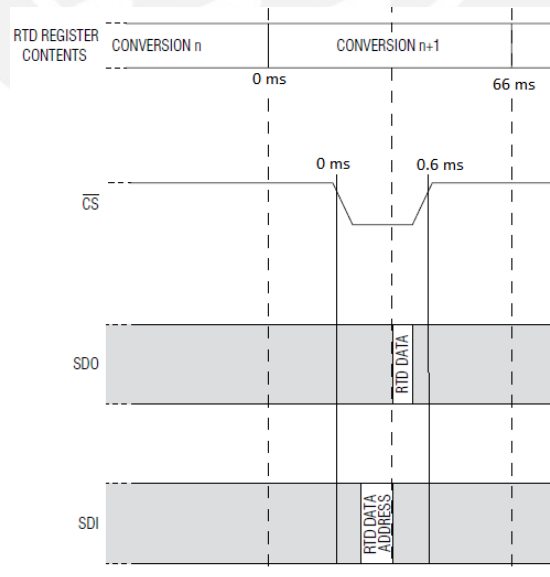


Figura 3.4: Diagrama de tiempos para conversión de señal RTD a datos digitales y proceso de transmisión de datos hacia la unidad de registro con el MAX31865.

3.5. Desarrollo de transmisión de datos vía serial

El sistema de adquisición de datos estará instalado en el mismo lugar que los arreglos FV en el exterior. Asimismo, estos estarán a cierta distancia de un laboratorio, donde se encuentra un ordenador, el cual estará guardando los datos en un fichero online y permitirá visualizar los mismos en tiempo real. Esta distancia afecta al correcto envío de los datos y a la velocidad de transmisión, por consiguiente, es necesario saber las condiciones de distancia máxima a la que se encontrará el ordenador y la velocidad de transmisión mínima que se necesita para enviar todos los parámetros requeridos.

El sistema de adquisición de datos diseñado a través de la unidad de registro estará enviando hasta 4 datos de irradiancia de 16 bits cada uno y 7 datos de temperatura de 15 bits cada uno, a esto se le añade 2 bits de inicio y parada, también se le añaden como factor de seguridad de 4 bits como sobredimensionamiento para evitar pérdida de bits. Por lo tanto, se deberán transmitir un máximo de 175 bits para cada período de muestreo, el cual, considerando un período mínimo de 100 ms se obtendrá una velocidad de transmisión de 1.75 kbps.

La distancia máxima de uno de los laboratorios donde se hará la instalación será de 75 metros medido del ordenador al SFCR. La comunicación serial del ATMEGA328p puede alcanzar una velocidad máxima de 2 Mbps hasta 15 metros de distancia (no se asegura una correcta transmisión a mayor distancia). La comunicación mediante el protocolo RS485, es la más utilizada en el sector industrial, ya que este permite conectarse con múltiples sensores, por ejemplo, piranómetros que tienen integrado este protocolo de comunicación. Por ello, este sistema tendrá la ventaja de poder funcionar conjuntamente con estos equipos mediante un mismo programa.

El protocolo Modbus o RS485 permite transmitir datos hasta una distancia máxima de 1200 metros. Esto afecta a su velocidad de transmisión, ya que para distancias menores a 12 metros se puede contar con una tasa de transmisión máxima de 2.5 Mbps. En cambio, para distancias mayores a la anteriormente mencionada hasta 1200 metros se cuenta con una tasa de 100 kbps y esto es compensa las necesidades anteriormente planteadas (distancia = 75 metros y velocidad de transmisión = 1.75kbps).

Además, el proceso de entrega de datos desde la unidad de registro hacia el módulo que contiene el protocolo RS485 (MAX485) es de 67.6 microsegundos. En consecuencia, esto no afecta al período de transmisión de datos, ya que es un tiempo muy pequeño comparado al período de muestreo que recomienda la norma IEC61724-1.

3.6. Elección de fuente de alimentación para energizar los diversos componentes de sistema DAQ

El sistema de adquisición de datos (DAQ) será instalado al exterior del laboratorio, por ello este mismo circuito estará montado en un tablero de poliester siguiendo las normas IEC de protección en exteriores, teniendo un índice de protección mínimo IP65 donde se esté totalmente aislado de partículas de polvo y este protegido contra chorros de agua.

En este tablero también se instalará un interruptor termomagnético para control de encendido del sistema y protección contra fallas de cortocircuito en la conexión alterna. El interruptor permitirá la conexión entre la línea de 220 V de la red interna con una fuente de alimentación de 24 V_{DC}, ya que se tienen múltiples sensores que funcionan con este nivel de tensión. Uno de estos son los piranómetros usados en este trabajo y lo ideal es que se pueda usar una única fuente de alimentación para todos los dispositivos cercanos al sistema de adquisición.

El sistema de monitoreo podrá recibir dicho nivel de voltaje, ya que tendrá incorporado un circuito regulador de tensión DC que permita reducir el nivel de voltaje a 5 V, para la energizar los diversos componentes como se observa en la Figura 4.17. Con el fin de dimensionar la fuente de alimentación se conoce la tensión que se necesita introducir al sistema y se debe conocer la corriente máxima que consumen cada uno de los componentes del sistema DAQ brindando un factor de diseño para que este cálculo no se encuentre al límite de la corriente necesaria.

El dimensionamiento de la corriente que se necesita para alimentar el sistema se observa en la Tabla 3.4, donde se muestra que el consumo total con los sensores conectados al sistema de DAQ es de 1.3 A. Para este valor se le aplica un factor de sobredimensionamiento de 1.25 respecto a lo requerido, en este caso el sistema DAQ consumiría un total de 1.6 A. Por ello, se usará una fuente de alimentación de 24 V y 3.2 A DC que permita ser montado en un tablero hermético. El regulador escogido puede brindar una corriente máxima de 500mA para 5V como se observa en la Tabla 3.5 y esto abastece el consumo de los componentes conectados al mismo.

Tabla 3.4: Diseño de fuente de energía que alimenta al sistema de adquisición de datos y sus sensores

Componentes	Cantidad	Voltaje aplicado (V)	Consumo de corriente (mA)	Consumo total (mA)
0-5V or 4-20mA Piranómetro Analógico BGT-TBQ	4	24	62.5	250
LM2574-ADJ Regulador de voltaje 5V	1	24	8.5	8.5
EKO MS80 Piranómetro Analógico	1	24	500	500
EKO MS80M Piranómetro Digital	1	24	500	500
Consumo máximo del sistema				1258.5
Con un factor de diseño de 1.25				1573.13

Tabla 3.5: Diseño regulador de voltaje para suministro de componentes electrónicos a 5V DC

Componentes	Cantidad	Voltaje aplicado (V)	Consumo de corriente (mA)	Consumo total (mA)
LM2574-ADJ DIP-8 5V regulador	Corriente máxima que suministra el regulador			500 mA
BL-B5134 led color rojo 6 mcd	2	5	50	100
Convertor ADC 16 bits ADS1115	1	5	0.2	0.2
MAX485-TTLxRS485 Convertor TTL a ModBUS	1	5	0.5	0.5
ADAFRUIT PT100 MAX31865	7	5	3.5	24.5
SN74LS138N Digital Decoder	1	5	10	10
ATMEGA328P-PU con oscilador externo de 16 MHz	1	5	12	12
Se está por debajo del consumo máximo que se le puede exigir al regulador				147.2

3.7. Programa de la unidad de registro de datos para monitoreo de los parámetros obtenidos

En este subcapítulo se muestra el programa diseñado para que la unidad de registro adquiriera las diferentes mediciones de irradiancia y temperatura enviadas por los acondicionadores de señal. En primer lugar, se observa la Figura 3.5 que muestra 2 diagramas de flujo que representan al programa principal del sistema DAQ y a una de las funciones para obtener los registros de irradiancia. Esta última está contenida en el diagrama de flujo principal, ya que es llamada por el mismo junto con la función para registro de temperatura del módulo mostrado en la Figura 3.6.

La función principal del software de monitoreo se encarga de leer las variables inicializadas antes de que inicie su operación. Las variables `Habilitador_Temperatura` y `Arreglo_Decoder` permiten inicializar la medición de temperatura. En cambio, la variable `Transmisor_Modbus` permite conocer si está habilitado el puerto para enviar los datos hacia el ordenador.

Para empezar el proceso de pedido de datos el programa principal pregunta si hay disponibles, esto quiere decir que el programa puede empezar a realizar las mediciones o tiene que esperar a que termine de enviar la última medición. Si se puede empezar a realizar las mediciones, se pasa a la función `Medicion_Irradiancia`, el cual lee 4 registros enviados por los sensores de irradiancia y una variable de ganancia que será diferente para cada medición realizada. Esta variable permitirá amplificar las mediciones adquiridas y estas puedan ser enviadas hacia la unidad de registro.

Después de adquirir los datos de irradiancia, el programa principal llamará a la función `Medicion_Temperatura_moduloFV`. El diagrama de flujo para esta última se muestra en la Figura 3.6, este usa una variable `Habilitador_Temperatura` para acceder a la comunicación de cada uno de los módulos MAX31865. Esto debido a que su protocolo de comunicación exige un habilitador para realizar el envío de datos de temperatura, pero deben ser habilitados de manera consecutiva. Para ello, el programa está enviando un arreglo de 3 bits a través de un decoder, el cual de acuerdo a la secuencia de bits recibida, habilitará de manera secuencial cada módulo para que envíe los datos hacia la unidad de registro.

Finalmente, cuando se terminen de enviar los datos de irradiancia y temperatura hacia la unidad de registro se preguntará si está habilitada el puerto para el envío de datos seriales. En el caso de que este habilitado, se envía el arreglo de datos hacia el ordenador para su guardado y visualización en una interfaz de visual en tiempo real. Si no está habilitado, vuelve a realizar las mediciones en el período de adquisición y guardado establecido por la norma IEC (1 minuto).

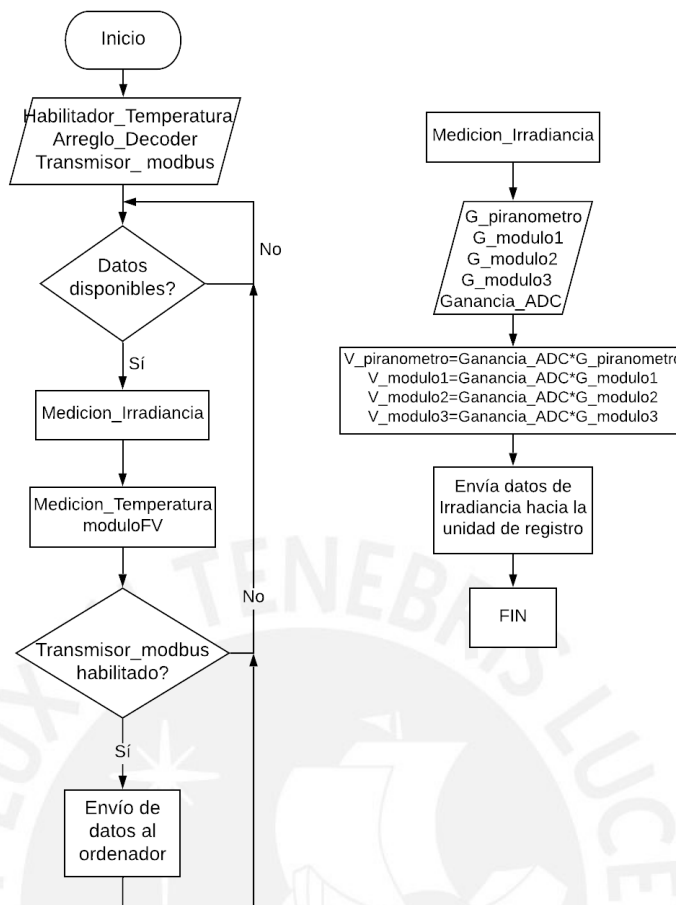


Figura 3.5: Diagramas de flujo para el programa principal del sistema de monitoreo y función para registro de irradiancia en la unidad de adquisición.

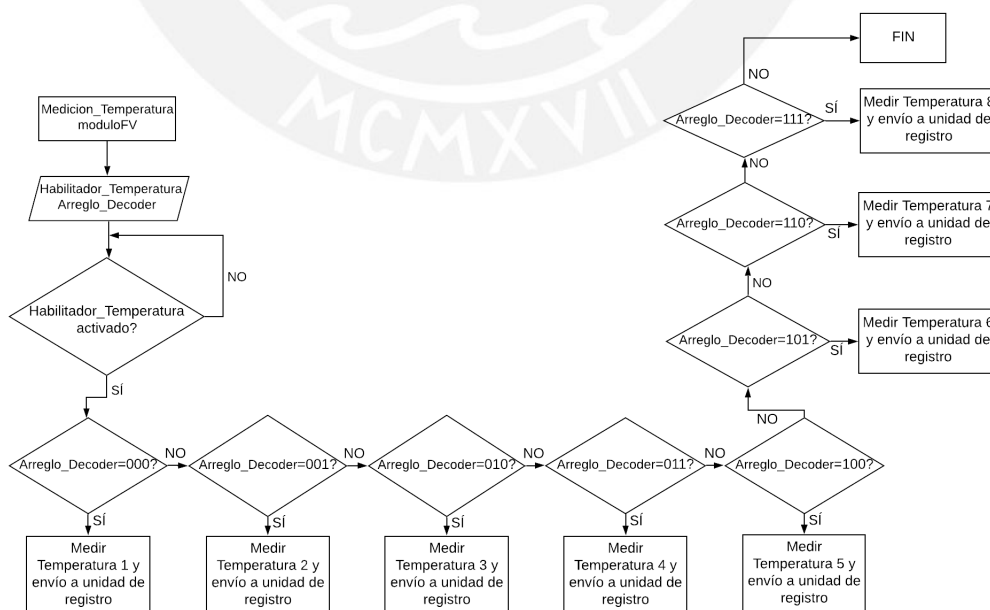


Figura 3.6: Diagrama de flujo de la función para medición de temperatura del módulo FV.

3.8. Diseño de interfaz gráfica para guardado y visualización de datos basado en el software NI LabVIEW

Las mediciones realizadas por el sistema DAQ son enviadas de manera serial hacia el ordenador mediante el protocolo Modbus. Estos datos deben ser almacenados y visualizados en tiempo real, por ello, se ha desarrollado un programa que estará en operación continua en el ordenador instalado para monitoreo de datos de los SFCR. El computador recibe los datos y los guarda usando un programa desarrollado en el software LabVIEW, el diseño del programa de visualización se muestra en la Figura 3.7.

Los diagramas de flujo mostrado representa el funcionamiento del software de visualización. Este empieza con la apertura de los puertos del ordenador por donde están ingresando las mediciones del sistema DAQ. Luego se pregunta si el puerto está activo u operativo para enviar los datos requeridos, entonces si no es el caso, el software pasa a cerrar los puertos para no utilizarlos hasta que se reinicie el programa y vuelva a hacer la consulta. En el caso de que el puerto de comunicación este operativo, se pasa a una función llamada PRINCIPAL, el cual permitirá realizar el proceso de registro y visualización de datos en dicho programa. Sin embargo, si detecta símbolos no numéricos o datos faltantes, reinicia la función para que se envíe una nueva trama de datos sin errores.

La función PRINCIPAL se encarga directamente de la recolección de los datos provenientes del sistema DAQ. Este contiene un botón de parada manual, el cual permite detener el software inmediatamente y con ello se pudieran hacer actualizaciones en el mismo o realizar mantenimientos en el ordenador. Si no se encuentra presionado ese boton de parada, el software pregunta si la hora del ordenador se encuentra entre las 6 am - 7 pm, esto con el objetivo de tener datos en las horas del día donde los sistemas FVs están operando. Después se lee un período de registro colocado manualmente en la pantalla del software y se pregunta si se ha cumplido con ese tiempo dado.

El tiempo de adquisición permite versatilidad para que el usuario pueda colocar el período que requiere para guardar sus medidas, en el caso de este trabajo, se ha colocado un tiempo de 1 minuto cumpliendo con el estándar IEC. Por ende, el sistema DAQ estará enviando registros constantemente cada 0.5 segundos, pero el software de visualización guardará en sus ficheros la trama de datos recibida en el período de adquisición dado. Cuando se culmina de adquirir los

datos, estos son almacenados en un fichero con extensión .csv, el cual se creará diariamente y se actualizará por cada trama de datos recibidos.

Por último, el software de adquisición permite la visualización de las mediciones almacenadas en los ficheros mediante gráficas y tablas que se actualizan en tiempo real. En la Figura 3.8, se muestra la pantalla principal como resultado del diseño anteriormente visto, desde donde se visualizan los datos de irradiancia y temperatura adquiridos a través del sistema DAQ. En el siguiente capítulo se podrá detallar el funcionamiento de esta plataforma junto con los resultados de medidas obtenidas desde el software y cómo pueden ser utilizados para monitorear el funcionamiento de los SFCR.

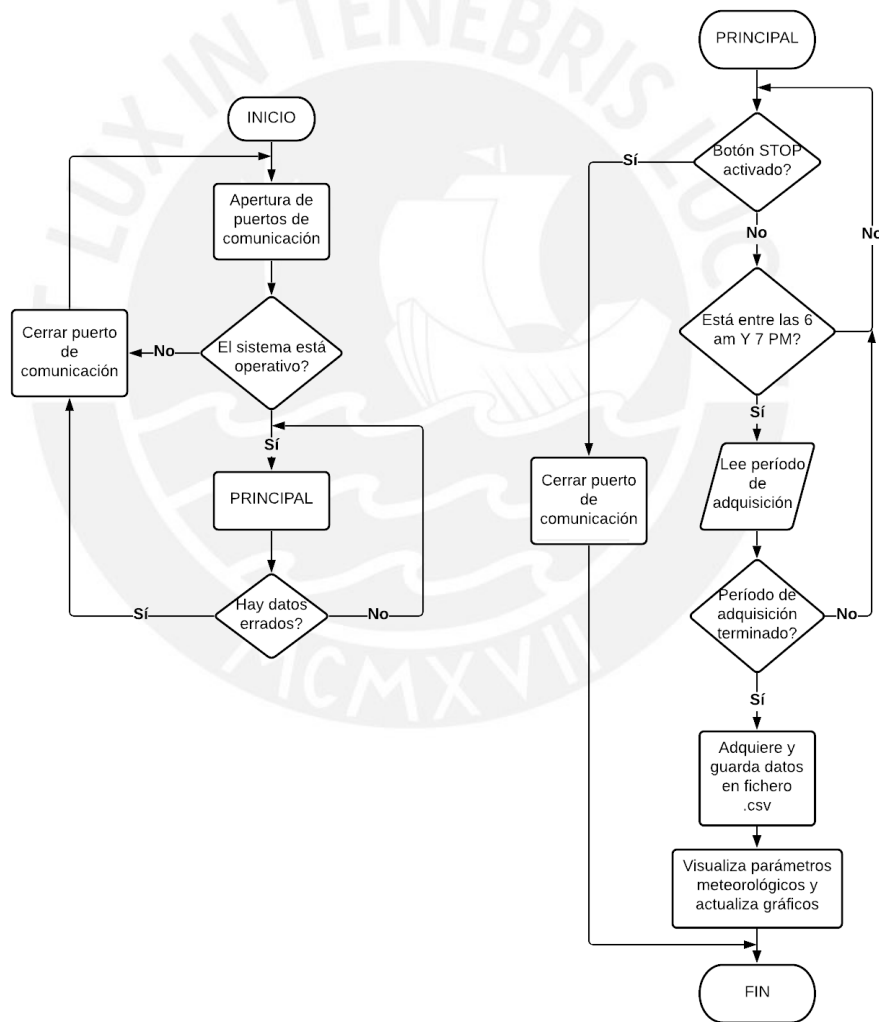


Figura 3.7: Diagrama de flujo de la función para medición de temperatura del módulo FV.

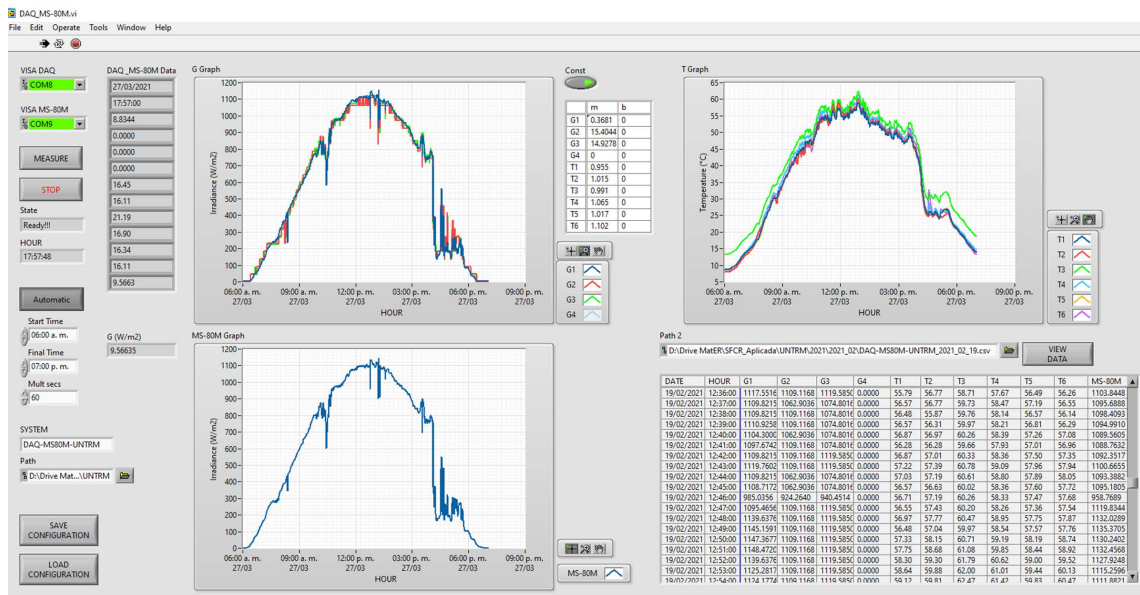


Figura 3.8: Interfaz de monitoreo visual de irradiancia mediante diferentes graficas que representa cada sensor medido

Capítulo 4

Resultados de adquisición del sistema diseñado para los SFCR, cálculo de productividad referencial, final y performance de la instalación

Después de haber realizado el diseño del sistema de adquisición de datos, se ha implementado un prototipo inicial que permite registrar los parámetros meteorológicos conectándose al computador vía serial, registrándolos y realizando gráficas en tiempo real. Además, se cuenta con una computadora que servirá solamente para el monitoreo de los sistemas fotovoltaicos conectados a red (SFCR). Este computador tiene un programa donde se guardan los parámetros eléctricos que envían los inversores y a su vez, tiene otro programa ejecutable para registrar los datos que envía el sistema de adquisición implementado.

En este capítulo se analizará de manera detallada cómo cada uno de los componentes diseñados ayudan en la transmisión de datos hacia la unidad de registro y este mismo los envía hacia el ordenador. Con estas medidas registradas se podrán realizar experiencias de validación y relación de datos usando sensores de referencia funcionando de manera síncrona con el sistema DAQ, a partir de estas validaciones preliminares obtenidas se analizará el cumplimiento de la norma IEC61724-1 calculando los errores de medición.

Asimismo, se realizará un cálculo inicial de la productividad final a partir de los parámetros eléctricos, productividad referencial a partir de los parámetros meteorológicos que envían los

sensores de referencia y los sensores conectados al sistema DAQ. Relacionando la productividad final y referencial, se podrá realizar el cálculo del rendimiento global como ejemplo de que a partir de estos datos adquiridos, se puede realizar el monitoreo de los SFCR.

4.1. Funcionamiento de general del circuito de adquisición de datos y diseño mecánico para instalación del sistema DAQ

Como se explicó en el capítulo anterior, se está utilizando módulos integrados para adquirir y acondicionar la señal de los sensores que se están utilizando. La temperatura del módulo FV está siendo adquirida mediante el módulo MAX31865, el cual se comunica con el microcontrolador mediante el protocolo SPI teniendo hasta 4 conexiones hacia el controlador ATMEGA328P y cada módulo se debe conectar a la misma línea de reloj serial (SCK), entrada de datos seriales (SDI) y salida de datos seriales (SDO), pero la entrada selector de chip (CS) se debe conectar por separado a un pin digital del controlador.

El ATMEGA328P no contiene la cantidad suficiente de entradas digitales para los 7 módulos que se requieren instalar, ya que se necesitarían hasta 7 pines digitales para CS y en total con las demás entradas se necesitaría 10 entradas digitales de 14 que tiene ese microcontrolador. Por ello, como se muestra en la Figura 4.1, se está utilizando un decodificador llamado 74LS138, el cual requiere 3 pines digitales del microcontrolador para generar un arreglo de 3 bits con el objetivo de habilitar cada CS secuencialmente dependiendo de este arreglo con 8 posibles casos de las cuales se usarán 7.

Los sensores utilizados para el registro de irradiancia envían una señal de salida analógica y como se mostró en el capítulo anterior, se está utilizando un conversor de señal analógica a dato digital llamado ADS1115, el cual usa el protocolo I²C para transmitir estos datos hacia el microcontrolador. Las conexiones se muestran en la Figura 4.1, donde se necesitan 2 pines digitales para la señal de reloj (SCL) y para la señal de datos seriales del módulo (SDA) que permite mover los datos digitales entre el módulo y el microcontrolador.

Para enviar los datos del sistema DAQ hacia la computadora, es necesario usar un módulo que permita transmitir información a largas distancias. El módulo que se muestra en la Figura 4.1 contiene un integrado llamado MAX485 que usa el protocolo RS485 para comunicación serial hasta 1200 metros de distancia. Este módulo usa los puertos de comunicación serial del

microcontrolador para recepción (RX) y transmisión de datos (TX), además en la figura, se utiliza un pin digital para configurar el módulo y que funcione como emisor o receptor de señal, este pin es llamado habilitador de línea de datos (DE). Para conectarse al ordenador se usan los pines del bus 485 (A y B), conectándolos a un adaptador USB con el objetivo de que lleguen las señales a uno de sus puertos y el programa llame directamente a ese puerto elegido.

En el sistema de adquisición de datos se está usando al módulo de comunicación como transmisor, ya que se requiere enviar los datos al puerto USB del ordenador y este mismo se encarga de guardarlos a través del software Labview, el cual le pide los parámetros adquiridos al puerto, este los guarda en un fichero que se actualiza diariamente y los muestra en su interfaz gráfica, donde el usuario podrá monitorear el funcionamiento del sistema y detectar cualquier anomalía.

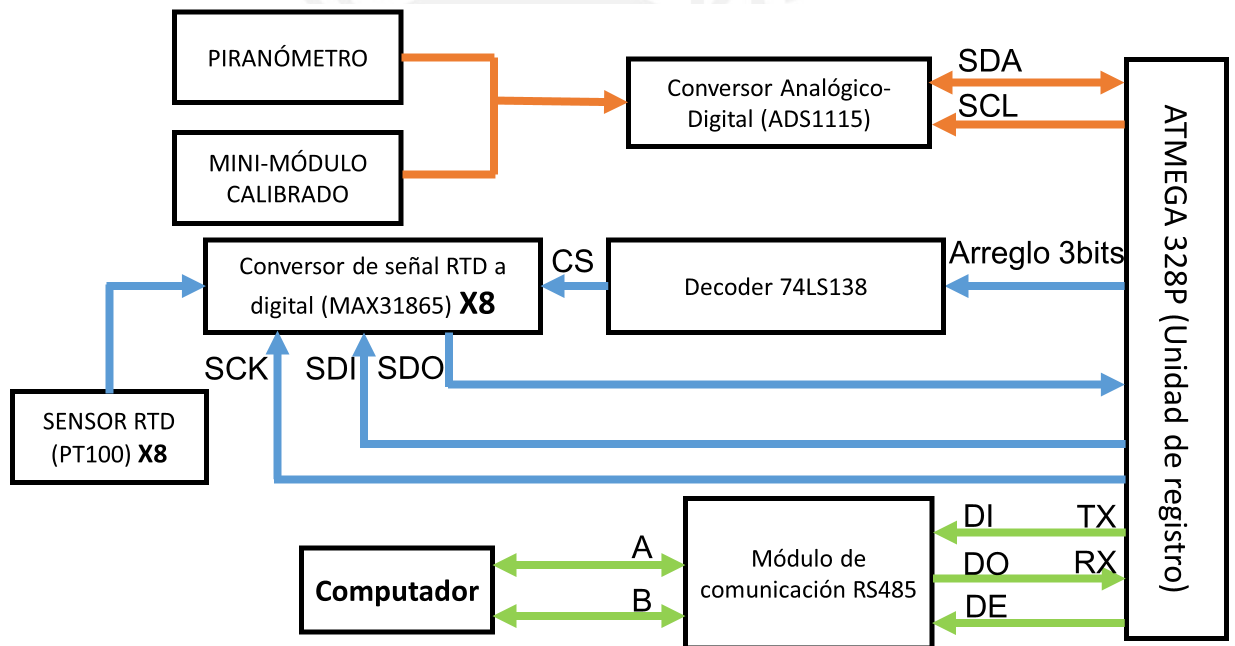


Figura 4.1: Esquema de funcionamiento, conexiones y transmisión de datos hacia la unidad de registro y al computador

Luego de realizar el diseño y ver el funcionamiento de los componentes que conforman al sistema DAQ, se debe diseñar el alojamiento de este dispositivo. Este circuito de adquisición será instalado en un tablero de poliéster, el cual se presenta el diseño mecánico de esta implementación en la Figura 4.2. Este diseño se realizó para la instalación del circuito DAQ y a su vez poder instalar su fuente de alimentación de 24 V 3.2 A que alimentará el circuito y los sensores que serán adquiridos por este mismo.

En este tablero se colocará la protección eléctrica del sistema de adquisición mediante un interruptor termomagnético que permitirá el encendido y apagado del mismo si existiera alguna falla de cortocircuito en la línea AC que alimenta a la fuente de 24V. Además, se ha instalado las conexiones para cada uno de los sensores para medición de irradiancia y temperatura, llegando directamente a las conexiones del circuito de adquisición mediante borneras.

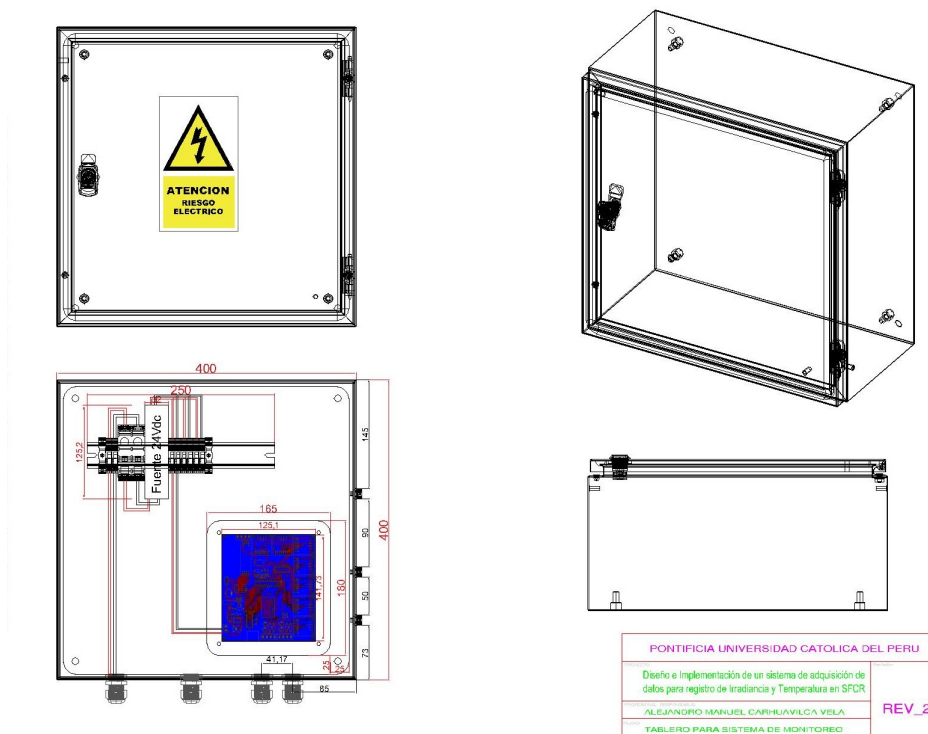


Figura 4.2: Diseño mecánico para implementación y protección de sistema de monitoreo

4.2. Instalación del sistema de monitoreo para medición de Irradiancia y Temperatura

En este subcapítulo se muestra la instalación del sistema de monitoreo efectuada en cada una de las estaciones donde se encuentran los sistemas FVs para este proyecto. Como se mostró anteriormente en la Figura 4.2 este sistema de adquisición va instalado en un tablero de poliéster en el exterior para que sea protegido del ingreso de polvo y humedad.

Este tablero está debajo de los paneles para que actúen como techo de este mismo y sea protegido de la radiación solar y la lluvia que puede deteriorar el tablero. Además, este es auto soportado con un pedestal metálico que permita su fácil montaje, traslado y paso de cables dentro del tablero.

Según lo mencionado anteriormente, en la Figura 4.3 se muestra la instalación física del sistema de adquisición en el tablero de poliéster. Esta contiene una protección, mediante un interruptor termomagnético, contra fallos de cortocircuitos en la línea AC que pudiera dañar la fuente de 24 V 3.2 A mostrada en el símbolo 1 de la misma figura, también es utilizado para encendido del mismo.

También se puede observar en la misma figura las conexiones de la fuente de alimentación y de los sensores de irradiancia y temperatura hacia el circuito DAQ mostrado en el símbolo 2. Este mismo está acoplado a la base metálica del tablero mediante una plancha de acrílico que funciona como aislamiento entre ellos para evitar cortocircuito entre los componentes que lo conforman.

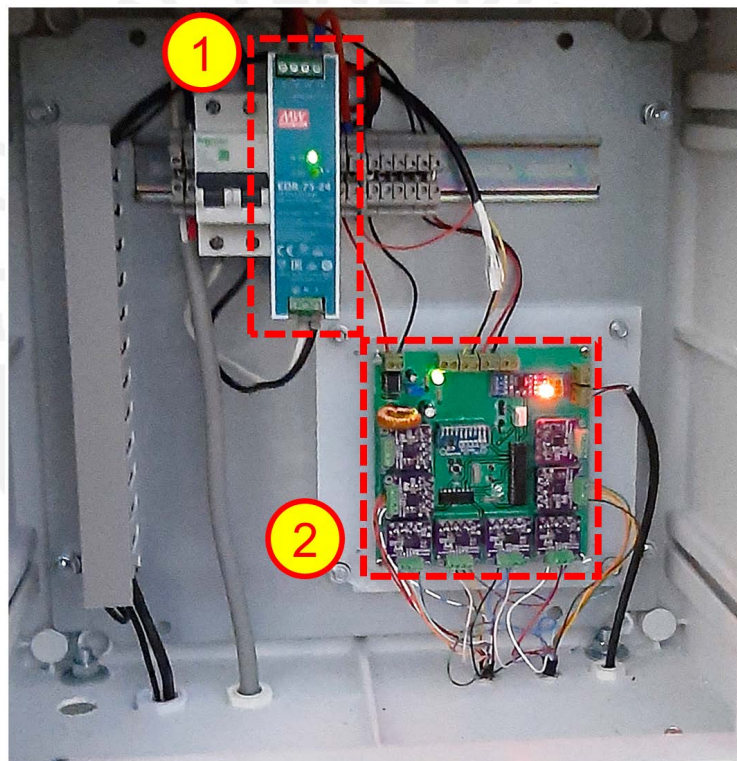


Figura 4.3: Montaje de sistema de adquisición de datos en tablero de poliéster

A continuación, se muestra en la Figura 4.4 el circuito DAQ describiendo cada uno de los bloques de componentes que se está usando para ensamblar el mismo. Como se tiene una fuente de alimentación, que se utiliza para energizar los sensores, también puede ser usado para alimentar el circuito DAQ mediante un regulador de voltaje que lleve la tensión hacia los otros componentes. En tal caso, el símbolo 1 muestra un circuito regulador de voltaje de 24 a 5 V para la alimentación de todos los componentes que conforman el circuito.

Como se observó en el subcapítulo de diseño del circuito DAQ, este realiza la comunicación de datos hacia el ordenador mediante el protocolo RS485 o Modbus. Para lograr esta comunicación de datos, se necesita el componente del símbolo 2 llamado MAX485, el cual permite convertir la comunicación serial interna de la unidad de registro de datos (ATMEGA328p) en comunicación Modbus a distancias de hasta 1200 metros.

Para registrar los datos de los sensores de irradiancia se requiere un conversor analógico digital, ya que estos tienen una salida analógica para cada valor de irradiancia. Para ello, el símbolo 3 muestra el conversor ADS1115, el cual permite convertir cada valor de voltaje en datos digitales para ser enviados hacia la unidad de registro (ATMEGA328p). Este conversor contiene un amplificador de ganancia programable, el cual permite amplificar los valores de voltaje registrados sin necesidad de un circuito amplificador externo.

En el símbolo 4 se muestra al ATMEGA328P usado como unidad de registro de datos, el cual pide a cada componente los datos de irradiancia y temperatura; y se juntan en esta unidad para ser enviados hacia el ordenador.

Con respecto a la medición de temperatura se necesita registrar como mínimo 6 sensores, para ello se está utilizando el decoder 74LS138 mostrado en el símbolo 5. Este componente permite habilitar de manera secuencial hasta 8 componentes para medición de temperatura que se muestran en el símbolo 6, el cual convierte la señal RTD enviada por los PT100, acoplados al módulo FV, en una señal digital que se pueda mandar hacia la unidad de registro de datos.

Para finalizar el subcapítulo se muestran en las Figuras 4.5 y 4.6 la instalación de los sensores que serán monitoreados por el sistema de adquisición de datos diseñado en este trabajo. Para registrar los datos de irradiancia se usan los sensores de los símbolos 1 y 2, los cuales se conocen como piranómetro y módulo calibrado respectivamente.

Estos sensores brindan datos analógicos que deben ser relacionados con resultados de irradiancia real mediante una comparación de mediciones entre estos mismos y un sensor de irradiancia calibrado. Este procedimiento permite obtener una ecuación para convertir los datos de voltaje a irradiancia.

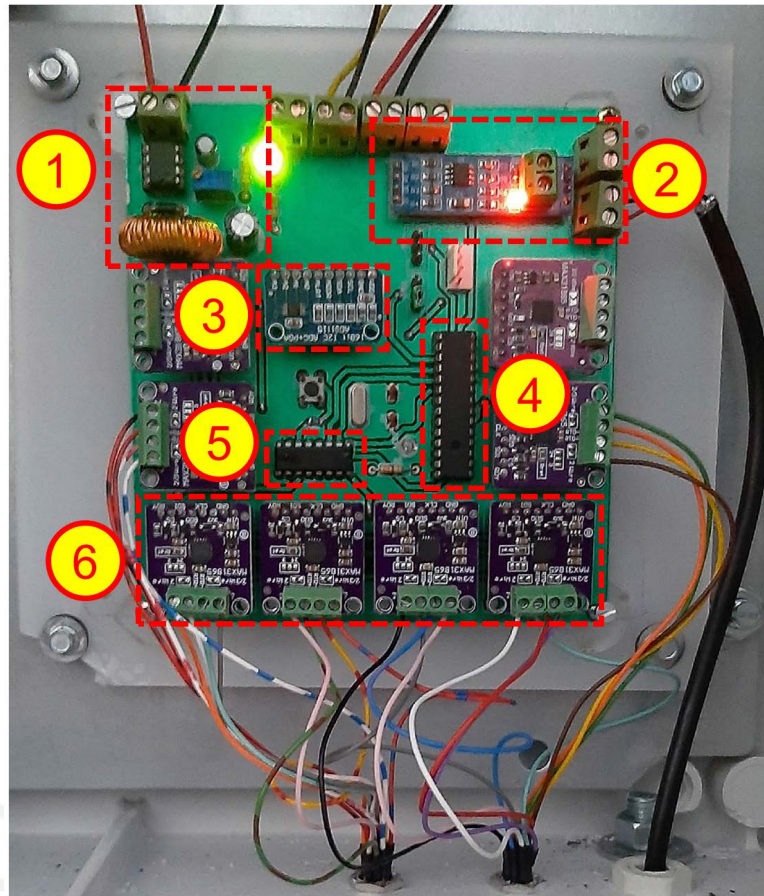


Figura 4.4: Componentes instalados en el sistema de adquisición de datos

Para la medición de temperatura se utilizan 2 sensores PT100 por cada tecnología de módulos FVs. Como se muestra en la Figura 4.6 estos sensores son colocados en la cara posterior del módulo solar, uno de ellos se encuentra al centro del módulo FV representado por el símbolo 3 y el que se muestra con el símbolo 4 está ubicado en una esquina a $2/3$ de distancia del centro del módulo.

A comparación de los sensores de irradiancia, los sensores de temperatura envían los datos de temperatura directamente al sistema de adquisición. Esto es debido a que el conversor MAX31865 se encarga de transformar el dato de resistencia RTD a medida de temperatura y este es enviado directamente hacia la unidad de registro de datos.

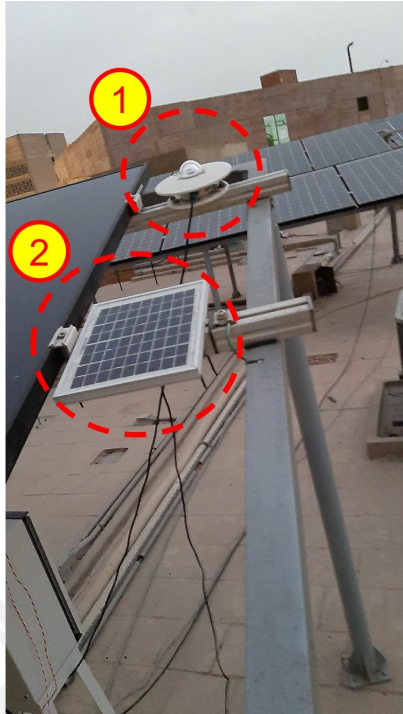


Figura 4.5: Instalación de piranómetro y módulo calibrado para medición de irradiancia.

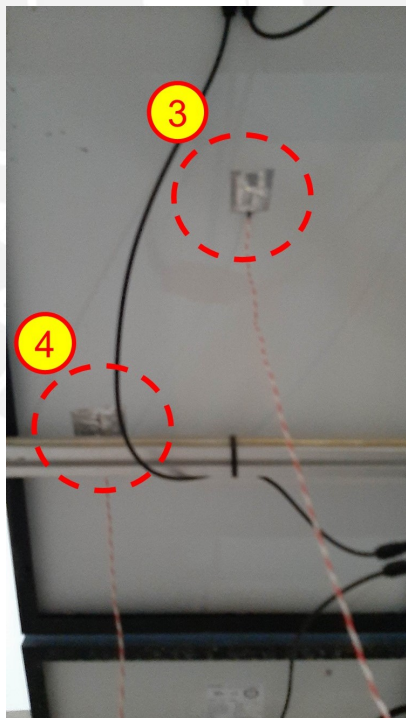


Figura 4.6: Instalación de sensores PT100 para medición de temperatura del módulo FV.

4.3. Resultados preliminares de adquisición de datos

A partir del funcionamiento e instalación de cada uno de los componentes explicados en los subcapítulos anteriores, se mostrarán las pruebas iniciales para registro de parámetros meteorológicos y cómo se validan estos datos del sistema DAQ, relacionándolos con una referencia calibrada a similares condiciones de operación. Con este proceso se podrán corregir los datos adquiridos por el sistema DAQ y se podrán analizar los errores de medición.

4.3.1. Medición de Irradiancia.

Este parámetro se mide en el mismo plano en el que se instalan los módulos FV, ya que deben estar a las mismas condiciones de instalación. Se están realizando las mediciones de irradiancia mediante los sensores vistos en la Figura 4.6 los datos recolectados se envían hacia la unidad de registro y este se encarga de mandarlos al ordenador.

Las medidas obtenidas se deben contrastar con un piranómetro calibrado EKO MS-80M, perteneciente a un sistema independiente, el cual envía sus registros al ordenador usando el mismo software que el sistema de adquisición y se guardan sus datos de manera síncrona.

El ordenador inicialmente guarda la salida de irradiancia como voltaje por parte del módulo calibrado y al mismo tiempo se guardan los datos que envía el piranómetro calibrado. Con estos registros se relaciona cada medida de voltaje con cada valor de irradiancia adquirido en un mismo instante de tiempo.

Para ajustar los datos del módulo calibrado con la irradiancia del piranómetro, se debe estimar un comportamiento lineal cuando se relacione la salida de ambos sensores, como se observa en la Figura 4.7. A partir de esta relación lineal se convierten los valores del voltaje a medidas de irradiancia usando la ecuación de calibración que representa a una recta con pendiente y offset teniendo una dispersión aproximadamente unitaria.

En el caso de la Figura 4.7 la ecuación usada es $G = 13.81 V + 7.24$, siendo V el valor de voltaje y G la medida de irradiancia. La segunda relación lineal se realiza para validar la salida de irradiancia convertida del módulo calibrado comparándola nuevamente con el valor de irradiancia del piranómetro referencial y se observa que tiene el mismo comportamiento, pero las medidas coinciden teniendo una pendiente unitaria y un offset casi cero.

La norma IEC indica que la medida de irradiancia no debe sobrepasar el 5 % de error, para ello se calcula el error cuadrático medio (RMSE %) y el error de desviación media (MBE %) como se muestra en la Tabla 4.1 [19]. Se observa que en promedio de los resultados obtenidos respecto a la referencia se tiene un error de 2 %, lo cual cumple con el estándar IEC y a su vez representa la dispersión de datos que existe en fit lineal, para este caso no existe dispersión porque el R-square se aproxima al valor unitario y lo máximo que se alejan de la relación lineal es 2 %. La desviación media obtenida es 0.01 %, lo cual representa que los datos tienden a estar por encima del fit lineal calculado, ya que es un valor positivo y en promedio el 0.01 % de datos se alejan por encima de esa relación lineal.

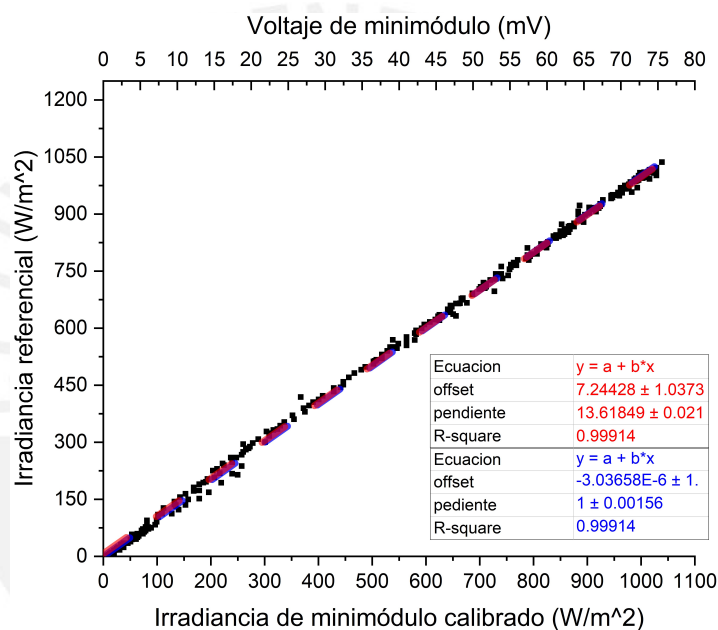


Figura 4.7: Relación y conversión de voltaje de módulo calibrado (mV) vs irradiancia de piranómetro de referencia (W/m^2). (Mediciones: 02/04/2020)

Tabla 4.1: RMSE y MBE del módulo calibrado y piranómetro referencial. (Mediciones: 02/04/2020)

RMSE (%)	MBE (%)
2.00	0.01

Otra forma de evaluar el error de medida que se tiene registrando irradiancia en el sistema de adquisición es calculando la irradiación en todo 1 día de medición. Este valor se obtiene mediante la integración bajo la curva de irradiancia para todo instante. En la Figura 4.8, se toman los datos de 1 día para el piranómetro referencial y la medida del módulo calibrado conectado al sistema DAQ. A partir de ambas mediciones, se calcula la irradiación de ambas curvas y se puede observar

en la Tabla 4.2 que ambos resultados son similares, teniendo un error de diferencia de 0.003 %. El resultado de irradiación permite tener una estimación más acertada de la productividad referencial, el cual ayuda a conocer el performance solar del lugar de instalación.

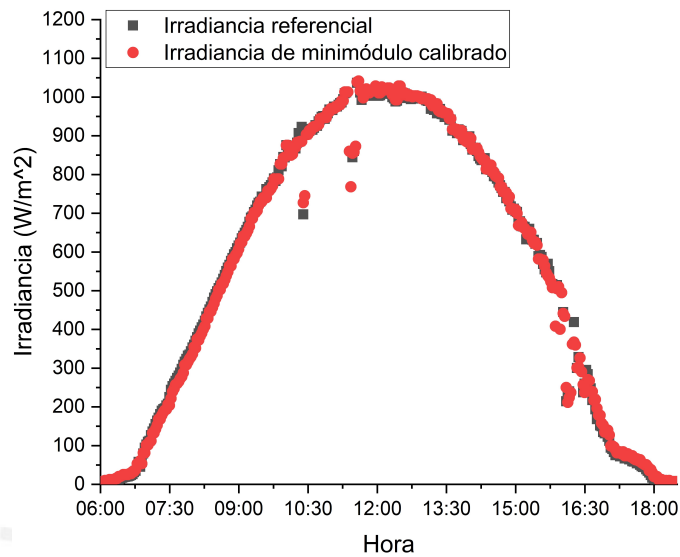


Figura 4.8: Comparación de irradiancia instantánea del módulo calibrado (W/m^2) vs irradiancia instantánea del piranómetro (W/m^2). (Mediciones: 02/04/2020)

Tabla 4.2: Irradiación estimada del minimódulo calibrado comparada con el piranómetro referencial. (Mediciones: 02/04/2020)

Irradiación de piranómetro de referencia (Wh/m^2)	Irradiación de mini-módulo calibrado (Wh/m^2)	Error de diferencia de irradiación
6626.56	6626.34	0.003 %

4.3.2. Medición de Temperatura.

En el sistema de adquisición de datos se estará registrando los valores de temperatura del módulo FV, con el objetivo de observar su comportamiento eléctrico respecto a la variación de este. Por ello, se necesitan corregir los valores obtenidos mediante la comparación con una referencia calibrada. Es necesario un correcto registro de este valor, ya que permite la corrección del cálculo de la productividad global para una mejor estimación del correcto funcionamiento del sistema [23].

Mediante esta comparación se debe asegurar que los datos se encuentran en el rango de error que indica el estándar IEC (2°C), por ello se está validando uno de los sensores conectados al sistema DAQ con una referencia calibrada externa a esta, asumiendo que los demás sensores inicialmente tienen el mismo comportamiento.

Este parámetro será adquirido mediante dos sensores RTD (PT100), como los vistos en la Figura 4.6, los cuales son instalados en el centro de la cara posterior de cada módulo FV y a $1/3$ de distancia del mismo. Como se observa en la Figura 4.9, para validar los resultados de temperatura registrados por el sistema DAQ se utilizó como referencia una termocupla tipo J puntual ubicada en el mismo lugar que el PT100 y mediante un multímetro calibrado se registran sus datos enviándolos al ordenador de manera síncrona al período de muestreo del sistema de adquisición.

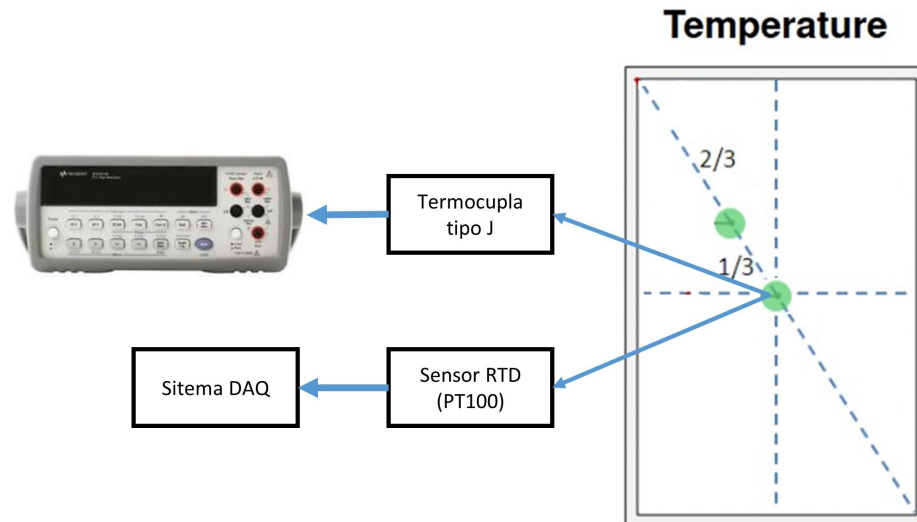


Figura 4.9: Esquema de sensores para validación de temperatura del módulo FV

Mediante el registro de los resultados de ambos sensores se obtiene la comparación que se observa en la Figura 4.10, donde los datos que se adquieren de los sensores RTD tienden a ser similares en promedio a los de la medición de referencia. Con esta comparación se pueden realizar evaluaciones de error como se observa en la Tabla 4.3 donde se observa un error cuadrático medio (RMSE %) de 1.95 %, el cual representa que los datos medidos por el sistema DAQ lo máximo que se alejan de la referencia es ese valor de error obtenido. Además, se obtiene el valor de desviación (MBE %) que es casi 0 % donde cada uno de los datos sigue el patrón de la referencia en el promedio total de ellos.

Para los parámetros de temperatura se tiene una medida de error absoluta, la cual no debe sobrepasar 2°C entre los valores entregados por el DAQ y las mediciones del sensor de referencia. La Figura 4.11 muestra la diferencia de temperatura de ambas medidas mediante un histograma, el cual permite observar la cantidad de valores que se encuentran en el rango de error exigido por la norma IEC61724-1.

El 99.5 % de los resultados vistos en el histograma cumplen con lo exigido en la norma, pero existen datos que sobrepasan el error permitido y llega a tener una diferencia de hasta 2.5°C, donde se debe analizar si es un error sistemático o si hay alguna anomalía en el sistema que lo pudiera causar.

Con estos ensayos de verificación y validación de datos se hace difícil el análisis e identificación de las causas de errores que se pudieran presentar en el sistema de adquisición. Por ello, es necesario usar un sistema de calibración conectado al sistema de adquisición diseñado que pueda simular las salidas necesarias para medir irradiancia y temperatura.

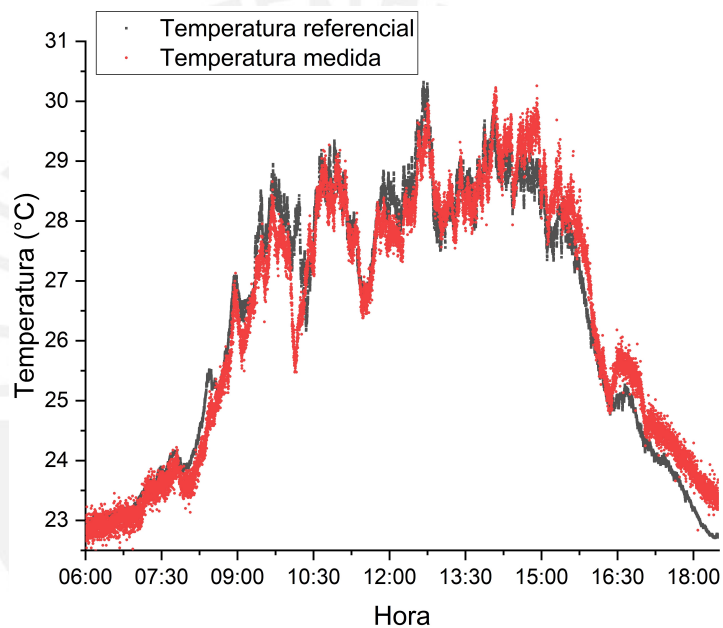


Figura 4.10: Comparación instantánea de la temperatura medida con la temperatura referencial. (Mediciones: 02/04/2020)

Tabla 4.3: RMSE y MBE del sensor RTD comparado con la termocupla referencial. (Mediciones: 02/04/2020)

RMSE (%)	MBE (%)
1.95	-0.0004

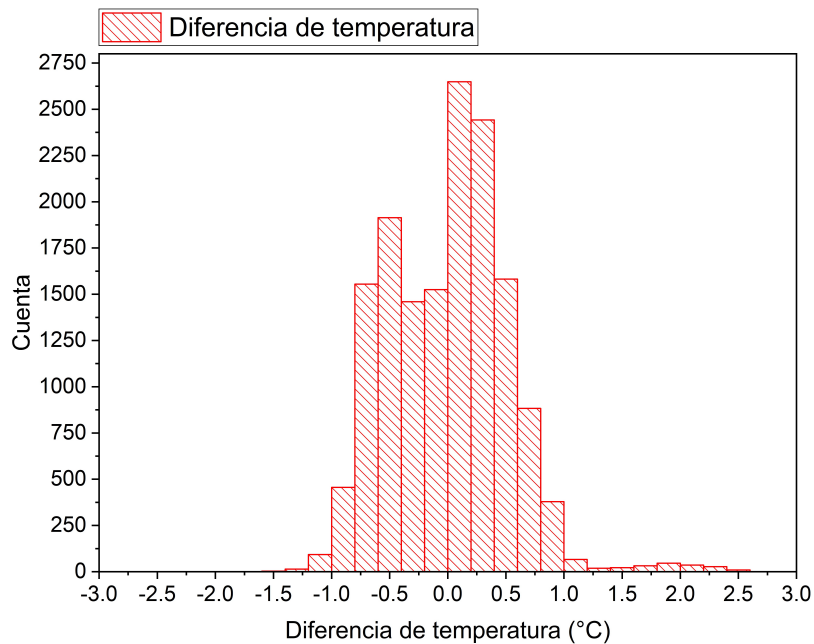


Figura 4.11: Histograma de la diferencia de medidas del sensor RTD con el sensor referencial (Mediciones: 02/04/2020)

4.4. Cálculo de productividad y performance del SFCR con los datos obtenidos del sistema DAQ

Uno de los objetivos de la adquisición de datos eléctricos y meteorológicos es la evaluación del comportamiento de los sistemas fotovoltaicos conectados a red, pero es necesario que este comportamiento sea similar al de la actividad solar de la zona. Por ello, se realiza el cálculo de la productividad final, productividad referencial y productividad global especificados en el segundo capítulo del presente trabajo.

En primer lugar, para el cálculo de la productividad final se utiliza la ecuación 2.3, el cual representa el número de horas en que el SFCR está entregando la potencia eléctrica máxima para la que fue instalada. En esta ecuación se necesitan los datos eléctricos de energía total entregada (Wh) y la potencia pico instalada (W_p). Para este cálculo se utilizaron los parámetros eléctricos enviados desde el inversor del SFCR hacia el ordenador, estos se muestran en la Figura 4.12.

A partir de los datos tomados para 1 día, se realiza la integración bajo la curva y se obtiene la energía total entregada en todo ese período de tiempo. Este valor se divide entre la potencia pico instalada y da como resultado la productividad final del SFCR instalado, según la Tabla 4.4, el sistema FV instalado está entregando su potencia máxima en 5.77 horas de todo ese día.

El cálculo de la productividad referencial se realiza usando los valores de irradiancia registrados por el sistema de adquisición de datos a través del minimódulo calibrado mostrado en la Figura 4.8. Hallando la integral bajo la curva de irradiancia instantánea se obtiene la irradiación de la zona de instalación, dividiendo este entre la irradiancia a condiciones estándares de medida (STC) usando la ecuación 2.4 se obtiene este valor de productividad, el cual representa el período de tiempo en el que existe una irradiancia a STC de 1000W/m^2 . En la Tabla 4.4 se ha obtenido un valor de irradiación de 6626.34 Wh/m^2 y dividiendo este valor entre 1000 W/m^2 se obtiene una productividad de 6.63 horas en el lugar de instalación.

Relacionando los valores obtenidos de productividad final con productividad referencial se obtiene la productividad global más conocido como el Performance Ratio de la ecuación 2.5. Este parámetro indica si el SFCR se encuentra correctamente instalado, ya que su comportamiento eléctrico concuerda con los datos meteorológicos del lugar de instalación, donde un resultado aceptable para considerar que el sistema está correctamente instalado es a partir de 80 % a más.

Como se observa en la Tabla 4.4, se ha realizado la división entre ambos parámetros y se ha obtenido un performance global de 87.15 %, lo cual indica una correcta instalación y un correcto funcionamiento del SFCR. Si bien para el cálculo se considera directamente la influencia de la irradiancia, pero la temperatura del módulo FV influye indirectamente en el resultado de la productividad final, ya que este afecta al comportamiento energético de los módulos.

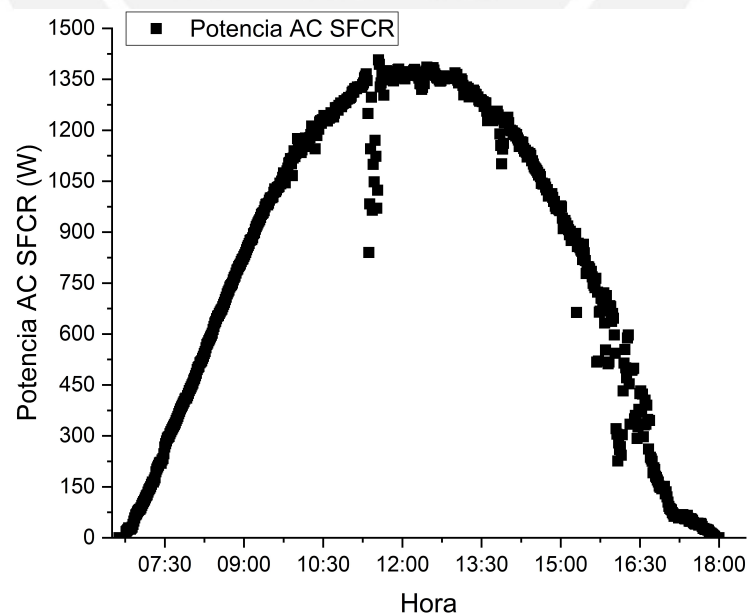


Figura 4.12: Potencia entregada a la red interna del laboratorio durante todo 1 día (Mediciones: 02/04/2020)

Es importante monitorear los resultados de estas productividades constantemente, con el objetivo de detectar si existen anomalías en el sistema, si algún módulo está fallando o se ha degradado físicamente. Por ello, es necesario monitorear los parámetros meteorológicos expuestos en este trabajo, ya que brindan información valiosa al instalador y al cliente sobre los diferentes cambios del clima en la zona de instalación.

Estos resultados de preferencia se deben obtener de manera diaria, mensual y anual para tener registro del monitoreo para el sistema FV y si se necesita realizar algún cambio en la instalación por causa de alguna anomalía, se puedan identificar rápidamente y hacer los cambios respectivos.

Tabla 4.4: Cálculo de productividad y funcionamiento del sistema fotovoltaico conectado a red en relación al comportamiento meteorológico del lugar de instalación

Energía Total Generada(Wh)	Potencia instalada(Wp)	Productividad final(Wh/Wp)	Irradiación del día(Wh/m ²)	Irradiancia a STC(W/m ²)	Productividad de Referencia(Wh/W)
9297.35	1610	5.77	6626.34	1000	6.63
Productividad Global del SFCR (Performance Ratio)					87.15 %

4.5. Interfaz de visualización de datos enviados por el sistema de adquisición en tiempo real mediante el software LabVIEW

En este subcapítulo se muestra de manera detallada el software de guardado y visualización de datos basado en el programa LabVIEW, el cual fue mostrado en la Figura 3.8. Estos parámetros son mostrados en dicho programa, ya que el sistema de adquisición los envía constantemente vía serial hacia uno de los puertos del ordenador a través del protocolo RS485. La computadora adquiere las mediciones, luego estas son las almacenadas en su memoria interna y en otro almacenamiento web (Google Drive), esto con el fin de contar con un repuesto de datos registrados por si alguno de los ficheros se pierde o no es almacenado.

En dicha figura se observa que el software realiza gráficas en tiempo real de los parámetros para los distintos sensores de irradiancia y temperatura instalados. Además, contiene una tabla, como se observa en la Figura 4.13, el cual permite ver puntualmente los datos registrados cada minuto y de esa misma manera cada resultado adquirido se guarda en los ficheros del ordenador. Además, mediante la entrada de texto llamada Path 2 colocada encima de dicha tabla, se puede elegir uno de los ficheros guardados en el ordenador y realizar la visualización de los datos en la tabla y los gráficos para el día escogido.

Path 2
D:\Drive MatER\SFCR_Aplicada\UNTRM\2021\2021_02\DAQ-MS80M-UNTRM_2021_02_19.csv VIEW DATA

DATE	HOUR	G1	G2	G3	G4	T1	T2	T3	T4	T5	T6	MS-80M
19/02/2021	12:36:00	1117.5516	1109.1168	1119.5850	0.0000	55.79	56.77	58.71	57.67	56.49	56.26	1103.8448
19/02/2021	12:37:00	1109.8215	1062.9036	1074.8016	0.0000	56.57	56.77	59.73	58.47	57.19	56.55	1095.6888
19/02/2021	12:38:00	1109.8215	1109.1168	1074.8016	0.0000	56.48	55.87	59.76	58.14	56.57	56.14	1098.4093
19/02/2021	12:39:00	1110.9258	1109.1168	1074.8016	0.0000	56.57	56.31	59.97	58.21	56.81	56.29	1094.9910
19/02/2021	12:40:00	1104.3000	1062.9036	1074.8016	0.0000	56.87	56.97	60.26	58.39	57.26	57.08	1089.5605
19/02/2021	12:41:00	1097.6742	1109.1168	1074.8016	0.0000	56.28	56.28	59.66	57.93	57.01	56.96	1088.7632
19/02/2021	12:42:00	1109.8215	1109.1168	1119.5850	0.0000	56.87	57.01	60.33	58.36	57.50	57.35	1092.3517
19/02/2021	12:43:00	1119.7602	1109.1168	1119.5850	0.0000	57.22	57.39	60.78	59.09	57.96	57.94	1100.6655
19/02/2021	12:44:00	1109.8215	1062.9036	1074.8016	0.0000	57.03	57.19	60.61	58.80	57.89	58.05	1093.3882
19/02/2021	12:45:00	1108.7172	1062.9036	1074.8016	0.0000	56.57	56.63	60.02	58.36	57.60	57.72	1095.1805
19/02/2021	12:46:00	985.0356	924.2640	940.4514	0.0000	56.71	57.19	60.26	58.33	57.47	57.68	958.7689
19/02/2021	12:47:00	1095.4656	1109.1168	1119.5850	0.0000	56.55	57.43	60.20	58.26	57.36	57.54	1119.8344
19/02/2021	12:48:00	1139.6376	1109.1168	1119.5850	0.0000	56.97	57.77	60.47	58.95	57.75	57.87	1132.0289
19/02/2021	12:49:00	1145.1591	1109.1168	1119.5850	0.0000	56.48	57.04	59.97	58.54	57.57	57.76	1135.3705
19/02/2021	12:50:00	1147.3677	1109.1168	1119.5850	0.0000	57.33	58.15	60.71	59.19	58.19	58.74	1130.2402
19/02/2021	12:51:00	1148.4720	1109.1168	1119.5850	0.0000	57.75	58.68	61.08	59.85	58.44	58.92	1132.4568
19/02/2021	12:52:00	1139.6376	1109.1168	1119.5850	0.0000	58.30	59.30	61.79	60.62	59.00	59.52	1127.9248
19/02/2021	12:53:00	1125.2817	1109.1168	1119.5850	0.0000	58.64	59.88	62.00	61.01	59.44	60.13	1115.2596
19/02/2021	12:54:00	1124.1774	1109.1168	1119.5850	0.0000	59.12	59.81	62.47	61.42	59.83	60.47	1111.8821

Figura 4.13: Tabla de datos visualizada en tiempo real mediante LabVIEW

En la Figura 4.14 se visualizan 2 gráficos de irradiancia adquiridas mediante el sistema DAQ con los sensores anteriormente vistos en la Figura 4.5. Las medidas que brinda el piranómetro de bajo costo sin certificado de calibración se ven en el gráfico azul y esta es llamada G1. Los datos medidos mediante módulos calibrados se muestran en las gráficas roja y verde, estas son llamadas G2 y G3. En la gráfica y en la tabla se observan unas medidas de valor 0 para G4, esto se debe a que no hay sensor conectado a ese canal. La entrada anteriormente mencionada será utilizada como reserva para conectar otro sensor que tenga una salida analógica. Además, en esta figura se observa una tabla, el cual permite colocar constantes de calibración de manera manual para que el usuario pueda corregir los datos que se adquieran mediante el sistema diseñado.

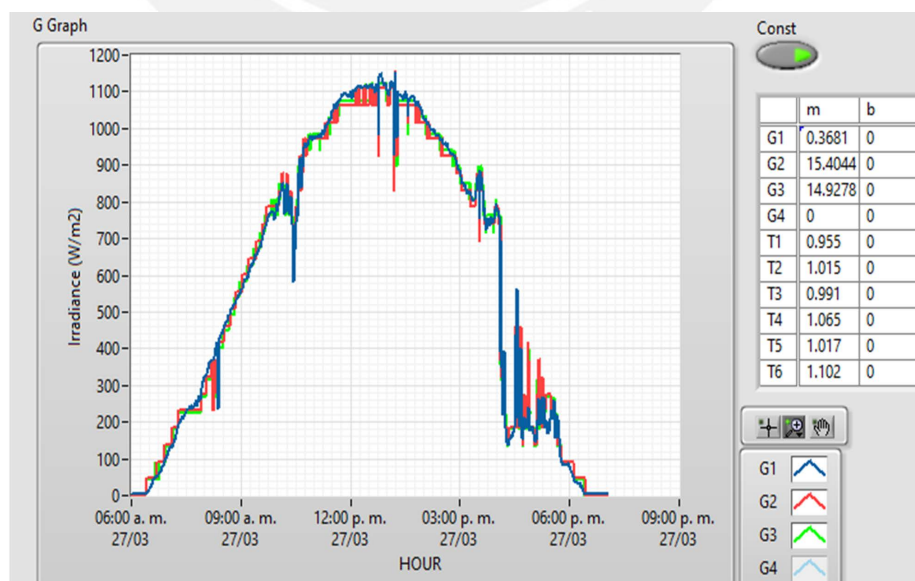


Figura 4.14: Gráficos de sensores analógicos de irradiancia para medición de irradiancia

En la Figura 4.15 se observan las medidas de irradiancia brindado por un piranómetro digital con certificado de calibración. Este es usado como referencia para relacionar los datos de los sensores análogos y convertirlos en parámetros de irradiancia. Con esta comparación se podrán obtener las constantes de calibración para colocarlas en la tabla de la Figura 4.14 para corregir los datos de los sensores de irradiancia. El usuario puede realizar este procedimiento cuando añade sensores de irradiancia al sistema o cuando culmine su período de calibración (recomendación: 1 año).

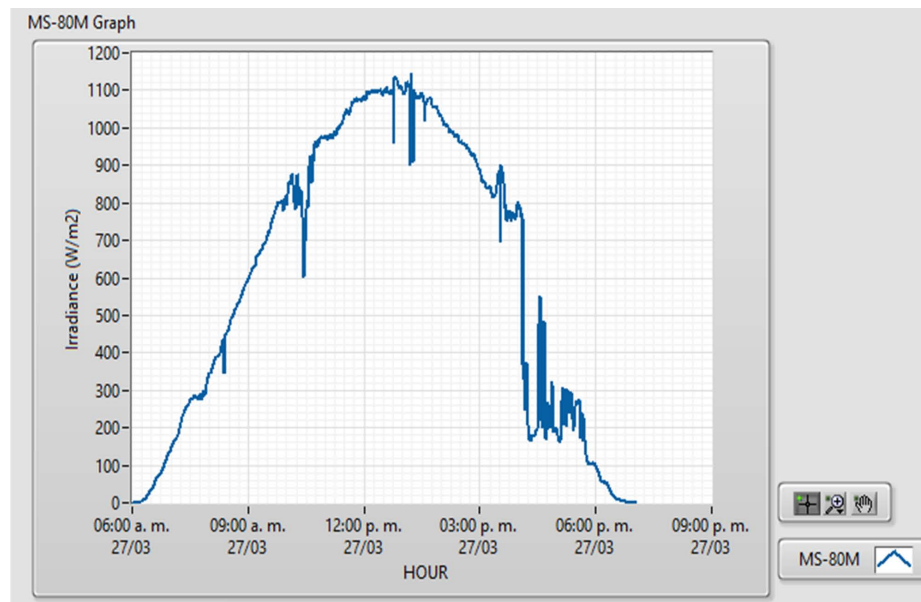


Figura 4.15: Gráfica de irradiancia de piranómetro EKO MS80-M

Otro de los parámetros que se puede visualizar en el software de monitoreo es la temperatura de los módulos FVs, los cuales son medidos mediante 2 sensores por cada tecnología. Con ello, como se muestra en la Figura 4.16, se está graficando hasta 6 mediciones de temperatura de módulo FV. Siendo T1 la gráfica azul (Temperatura central CIGS), T2 la gráfica roja (Temperatura lateral CIGS), T3 la gráfica verde (Temperatura central HIT), T4 la gráfica celeste (Temperatura lateral HIT), T5 la gráfica naranja (Temperatura central PERC) y T6 la gráfica morada (Temperatura lateral PERC).

De igual forma que para los datos de irradiancia en la Figura 4.14, se utilizan las constantes de calibración y son colocadas en la tabla de la figura para corregir estos parámetros. Esto se realiza mediante la comparación de datos entre los adquiridos por el circuito DAQ y otro sistema externo calibrado con una temperatura de referencia mostrada en la Figura 4.9. Estas correcciones se utilizan con el fin de que el usuario pueda contrastar los datos adquiridos con medidas referenciales calibradas y se cumpla con la precisión especificada en la norma IEC61724-1.

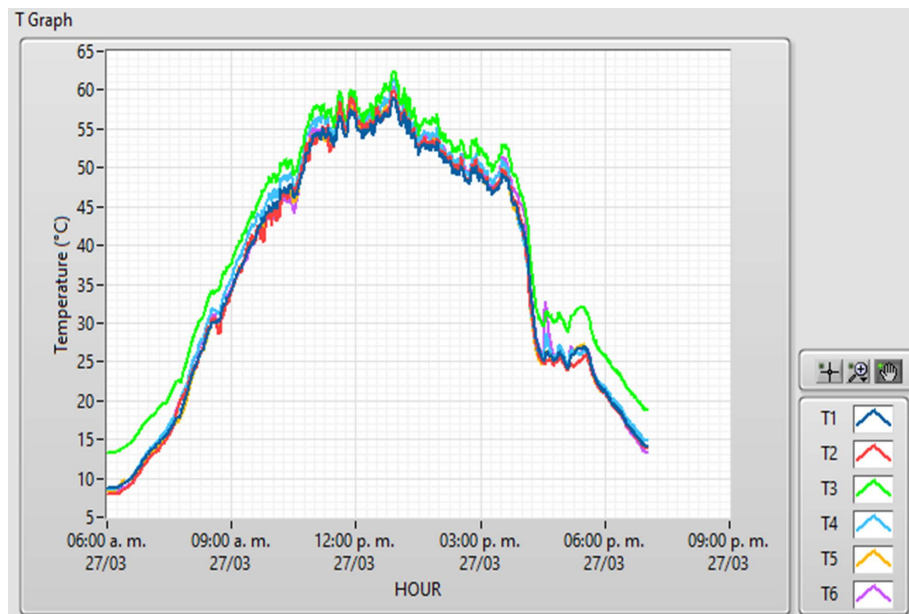
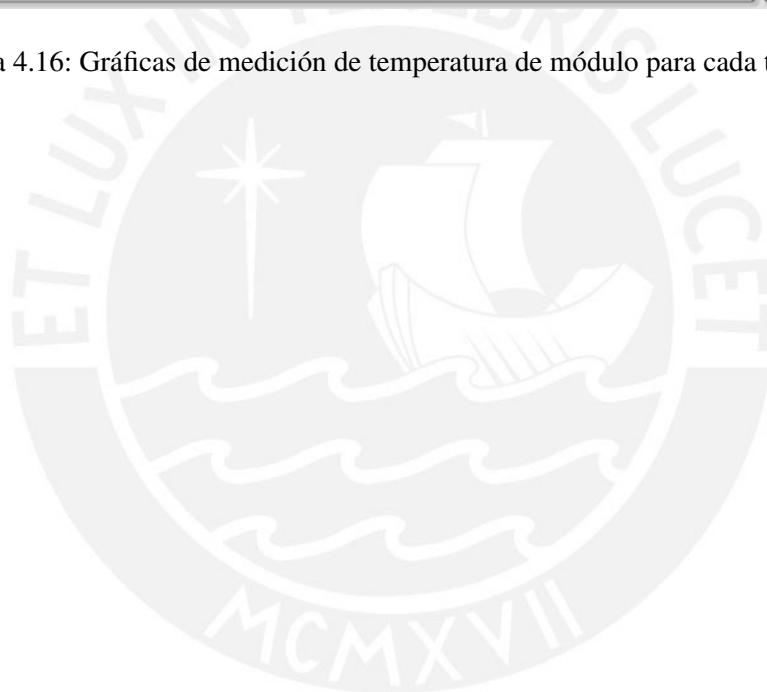


Figura 4.16: Gráficas de medición de temperatura de módulo para cada tecnología FV



Conclusiones

- En este trabajo se ha realizado el diseño del sistema de adquisición de datos, el cual cumple con los estándares establecidos por la norma IEC61724-1. Para ello, se mostró la elección de cada uno de los componentes que conforman el sistema, con el objetivo de poder enviar mediciones de irradiancia y temperatura del módulo FV. Este envío de datos se realiza usando el protocolo RS485 para distancias largas y con la tasa de transmisión requerida. Además, se ha mostrado la implementación de este sistema y su funcionamiento a condiciones reales de operación.
- Se ha realizado el diseño de una interfaz visual para monitoreo de datos en tiempo real mediante el programa LabVIEW. Este sistema permite el registro y visualización de las mediciones adquiridas en un ordenador mediante una tabla y gráficos que se actualizan constantemente. Con la ayuda de este software, el usuario podrá monitorear constantemente los sensores instalados y analizar el performance del SFCR para detectar anomalías.
- Se han realizado ensayos experimentales comparando las mediciones del sistema DAQ con equipos de medición externos antes de instalar el mismo. Esto se hizo con el fin de corregir las mediciones adquiridas a partir de sensores no calibrados y alcanzar la precisión requerida por la norma IEC. Luego de realizar estas calibraciones, se puede analizar el error de medida al adquirir los datos con el sistema DAQ. Los resultados que se obtuvieron demuestran que el 99 % de datos obtenidos cumplen con el error requerido por dicho estándar.
- Se realizó el análisis del rendimiento de uno de los sistemas FVs instalados mediante las productividades calculadas usando los datos que envía el sistema DAQ y el inversor. Estos resultados se pueden observar en la Tabla 4.4 y con ellos se puede comprobar el correcto funcionamiento e instalación del SFCR y del sistema de adquisición de parámetros meteorológicos. Estos resultados muestran la importancia de tener un sistema de monitoreo continuo en los sistemas FV, ya que estos brindarán información sobre el comportamiento de la instalación en tiempo real.

Recomendaciones y trabajos futuros

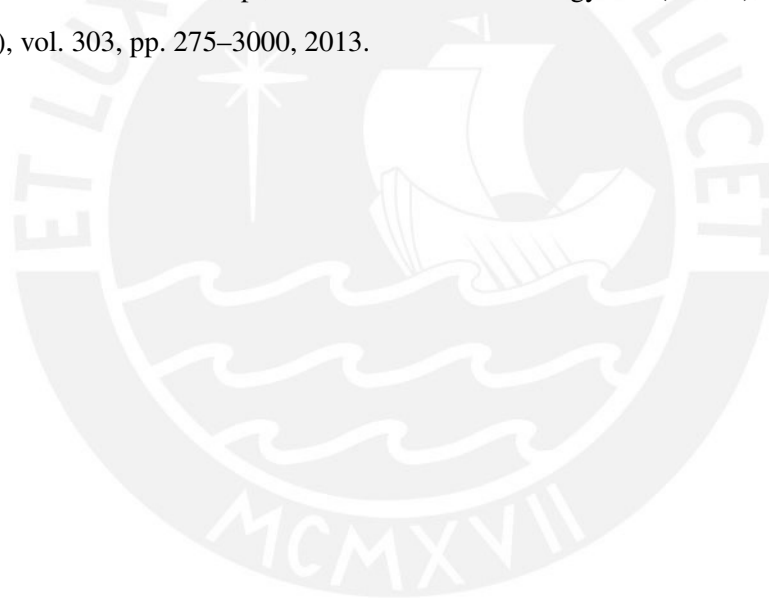
- Para el caso de la medición de irradiancia si se van a utilizar módulos calibrados y piranómetros sin certificación es recomendable tener un sensor referencial calibrado con su sistema de monitoreo para poder calibrar los datos recibidos en el sistema de adquisición. Además, la instalación de los sensores depende del requerimiento, ya que si se quiere medir la irradiancia global se recomienda tener piranómetros y para la irradiancia en el plano FV se recomienda la instalación de módulos calibrados de similares características a los módulos del SFCR, esto sirve para ver la irradiancia que aprovechan los módulos instalados.
- En el análisis del comportamiento de los SFCRs, se recomienda realizar el cálculo diario, mensual y anual de los parámetros de productividad energética (Productividad final, productividad referencial y productividad global). Para usar los datos del sistema de adquisición diseñado y los inversores, los cálculos se deben automatizar en el programa de monitoreo. Como trabajo futuro, se implementarán estos en el software de visualización para monitorear la producción eléctrica del SFCR en relación al efecto meteorológico.
- Para no depender totalmente del registro de datos hacia la computadora, se utilizará una memoria de reserva que permita guardar el registro de los datos sin importar que la computadora este encendida. Esta memoria deberá ser extraíble, de fácil acceso para el usuario y no debe afectar al comportamiento de los distintos componentes para registro de datos meteorológicos.
- El sistema de adquisición diseñado en este trabajo registra los parámetros meteorológicos que influyen en el comportamiento eléctrico de los sistemas FVs. Para un próximo trabajo se estará diseñando un sistema de adquisición que permita registrar los parámetros eléctricos del SFCR que pueda funcionar en conjunto con el monitoreo de datos meteorológicos y se pueda implementar en la interfaz de visualización diseñada.

Bibliografía

- [1] J. Tamayo, J. Salvador, A. Vásquez, and C. Vilches, “La industria de la electricidad en el Perú: 25 años de aportes al crecimiento económico del país,” *Osinergmin*, Lima, Perú, 2016.
- [2] J. Rosero, L. Garza, L. Minchala, D. Pozo, and L. Morales, “Fuentes de generación de energía eléctrica convencional y renovable a nivel mundial,” *Revista Politécnica*, vol. 33, no. 1, 2014.
- [3] A. Vásquez, J. Tamayo, and J. Salvador, “La industria de la energía renovable en el Perú: 10 años de contribuciones a la mitigación del cambio climático,” *Osinergmin*, Lima, Perú, 2017.
- [4] “Proyecto de Decreto Supremo que aprueba el Reglamento de Generación Distribuida.” *Ministerio de Energía y Minas*, 2018. [En línea]. Disponible en: http://www.minem.gob.pe/_prepublicacion.php?idSector=6&idPrepublicacion=240, [Accedido: 20-ene-2020].
- [5] J. A. Roca, “Las 20 mayores plantas fotovoltaicas del mundo: India manda en el ranking y España entra en el top 20.” *elperiodicodelaenergia.com*, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://elperiodicodelaenergia.com/las-10-mayores-plantas-fotovoltaicas-del-mundo/>, [Accedido: 12-jun-2020].
- [6] “Energía solar fotovoltaica.” *Delta Volt SAC*, 2010. [En línea]. Disponible en: <https://deltavolt.pe/energia-renovable/energia-solar>, [Accedido: 12-jun-2020].
- [7] A. M. Khalid, I. Mitra, W. Warmuth, and V. Schacht, “Performance ratio—crucial parameter for grid connected pv plants,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 65, pp. 1139–1158, 2016.
- [8] “Solar resource maps of World.” *The World Bank*, Source: *Global Solar Atlas 2.0*, Solar resource data: *Solargis*, 2019. [En línea]. Disponible en: <https://solargis.com/maps-and-gis-data/download/world>, [Accedido: 07-oct-2019].

- [9] M. Fischer, “International technology roadmap for photovoltaic (itrpv) 2018 results,” in *PV CellTech conference*, vol. 14, no. 10, pp. 1–38, 2019.
- [10] “PV3x Types of PV system.” *MicroMasters Programme: Solar Energy Engineering/Solar Energy: Photovoltaic (PV) Systems*, 2019. [En línea]. Disponible en: <https://www.edx.org/es/course/solar-energy-photovoltaic-pv-systems>, [Accedido: 10-ago-2019].
- [11] M. Fuentes, M. Vivar, J. Burgos, J. Aguilera, and J. Vacas, “Design of an accurate, low-cost autonomous data logger for pv system monitoring using arduinoTM that complies with iec standards,” *Solar Energy materials and solar cells*, vol. 130, pp. 529–543, 2014.
- [12] A. López-Vargas, M. Fuentes, M. V. García, and F. J. Muñoz-Rodríguez, “Low-cost datalogger intended for remote monitoring of solar photovoltaic standalone systems based on arduinoTM,” *IEEE Sensors Journal*, vol. 19, no. 11, pp. 4308–4320, 2019.
- [13] N. Erraissi, M. Raoufi, N. Aarich, M. Akhsassi, and A. Bennouna, “Implementation of a low-cost data acquisition system for “propre. ma” project,” *Measurement*, vol. 117, pp. 21–40, 2018.
- [14] R. A. N. Calle, “Diseño de un sistema de adquisición de datos utilizando el protocolo usb en un microcontrolador avr,” trabajo de fin de grado, Pontificia Universidad Católica del Perú. Facultad de Ciencias e Ingeniería, 2014.
- [15] B. G. Domingo, D. D. J. A. TEJERO, and D. D. M. F. CONDE, *Análisis, caracterización y modelado del comportamiento en exterior de módulos de concentración fotovoltaica*. PhD thesis, Universidad de Jaén, 2014.
- [16] “Measurement principles for terrestrial pv solar devices with reference spectral irradiance data (iec 60904-3),” *International Electrotechnical Commission, Geneva, Switzerland*, 2011.
- [17] M. Á. N. Martínez, “Metodología y análisis comparativo de equipos solares prefabricados indirectos por termosifón,” pp. 8–9, 2010.
- [18] E. Lorenzo, *Electricidad solar fotovoltaica: Ingeniería fotovoltaica*, vol. 3, pp. 256–297. Progensa, 2014.
- [19] J. Muñoz, G. Nofuentes, M. Fuentes, J. De la Casa, and J. Aguilera, “Dc energy yield prediction in large monocrystalline and polycrystalline pv plants: Time-domain integration of osterwald’s model,” *Energy*, vol. 114, pp. 951–960, 2016.

- [20] “Photovoltaic system performance–part 1: Monitoring (iec 61724-1),” *International Electrotechnical Commission, Geneva, Switzerland*, 2017.
- [21] “SMP3 Smart Pyranometer.” *OmniInstruments*, 2018. [En línea]. Disponible en: <https://www.omniinstruments.co.uk/weather-stations-and-instruments/pyranometers-solar-irradiance/smp3-smart-pyranometer.html>, [Accedido: 15-ago-2020].
- [22] A. M. Carhuavilca, L. A. Conde, A. E. Berastain, J. Montes-Romero, W. Gosgot, J. D. la Casa, J. A. Töfflinger, and M. A. Cataño, “Monitoring system based on iec standards for irradiance and module temperature measurements in photovoltaic systems,” *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1841, p. 012002, 3 2021.
- [23] T. Dierauf, A. Growitz, S. Kurtz, J. L. B. Cruz, E. Riley, and C. Hansen, “Weather-corrected performance ratio,” tech. rep., National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States), vol. 303, pp. 275–3000, 2013.



Anexos

Tabla 4.5: Lista de componentes a utilizar para la implementación del sistema de adquisición de datos (Sistema DAQ)

ITEM	Descripción	Tipo	Empaque	Cantidad
1	Regulador de voltaje ajustable a 5 V	LM2574-ADJ	PDIP (8) 6.35x9.81mm	1
2	Capacitor 50V	Electrolítico de aluminio 10 x 20 mm 330uF tolerancia 20 %	ESW337M050AH4(1)	1
3	Diodo rectificador Schottky de barrera	1N5819 28V 1A	DO-41 Moldeado plástico	1
4	Capacitor 50V	Electrolítico de aluminio 8 x 11 mm 100uF tolerancia 20 %	ESW107M050AG3(1)	1
5	Inductancia 330uH 1A	Tipo toroide 20x9 mm	DPO-1.0-330	1
6	Resistencia 1/4W	Orificio pasante 2kohms 1/4W tolerancia 10 %	Cinta cortada 2.30x6.00mm	1
7	Trimmer Resistencia variable 1/2W	Orificio pasante 20kohms 1/2W tolerancia 10 %	Tubo 3.8 pulgadas	1
8	LED indicador color rojo	Orificio pasante 6 mcd 20mA 2.6 V	T-1 3/4 5.7mm	2
9	Pulsador reset de microcontrolador	Pulsador 6x6x6.5 mm Plastic head,260G	0.25mm, Straight line	1
10	Interruptor SPDT doble sentido	SWITCH SLIDE SPDT 100MA 12V	OS102011MS2QN1	2
11	Microcontrolador 8 bits	ATMEGA328P-PU	IC MCU 8BIT 32KB FLASH 28DIP	1
12	Resistencia 1/4W	Orificio pasante 330ohms 1/4W tolerancia 10 %	Cinta cortada 2.30x6.00mm	5
13	Capacitor 50V	Cerámico 22pF tolerancia 20 %	Cinta cortada 4.00x2.60mm	2
14	Cristal oscilador	Orificio pasante 16MHz	XO estándar THHF-49S3	1
15	Capacitor 25V	Electrolítico de aluminio de orificio pasante 10uF tolerancia 20 %	Cinta cortada 8 x 11 mm	1

ITEM	Descripción	Tipo	Empaque	Cantidad
16	Capacitor 25V	Electrolítico de aluminio de orificio pasante 100nF tolerancia 20 %	Tipo masa 4x2.50mm	1
17	Regulador de voltaje fijo a 3.3 V	LD1117V33	TO-220	1
18	Convertor dato RTD a señal Digital	ADAFRUIT PT100 MAX31865	20 SSOP	7
19	Decodificador lineal de 3 entradas a 8 salidas	SN74LS138N	DIP-16	1
20	Convertor analógico digital de 16 bits	ADS1115 Resolución 16 bits 3.00 mm 3.00 mm	VSSOP	1
21	Resistor 1/2W	Orificio pasante 6.8kohms 1/2W tolerancia 5 %	Cinta cortada Axial 2.30x6.50mm	4
22	Capacitor 25V	Electrolítico de Aluminio Orificio pasante 47uF tolerancia 20 %	Cinta Cortada 5 x 11 mm	4
23	Piranómetro Analógico	BGT-TBQ Salida: 0-5V		1
24	Resistencia 1/4W	Orificio Pasante 0.1 ohms 1/4W tolerancia 1 %	Cinta cortada 2.30x6.00mm	3
25	Módulo solar	Monocristalino 5W		1
26	Módulo solar	Policristalino 5W		2
27	Buffer 3 estados	SN74HC125N 14DIP	Orificio Pasante	1
28	Socket MicroSD	Montaje superficial 16.1x14.5x1.85mm	Carrete (Digi-Reel)	1
29	Resistor SMD 1/16W	Montaje superficial 3.3kOhms tolerancia 1 %	Cinta cortada 0402	4
30	Resistor SMD 1/16W	Montaje superficial 10kOhms tolerancia 5 %	Cinta cortada 0402	1
31	Convertor de datos TTL a RS485 (ModBUS) y transmisor de datos transformados vía serial	Módulo MAX485 máxima transmisión 2.5Mbps 45x15mm	MAX485CUA	1
32	Adpatador USB RS485 CH340	Chip CH340G Convertor USB a RS485 Dimensiones: 61.81.4cm	SO-16	1
33	Bloques terminales	Conector de bloques verde de 2 pines 5mm		7
34	Conector Cabezal	Molex 4 pines 2.54 mm	KF2510-4A	1
35	Fuente de alimentación switching	24V 3.2A RIEL DIN MEANWELL	NDR75-24	1
36	Interruptor termomagnético	Interruptor bipolar 2x16A 9x3.5cm	Easy9	1
37	Cable de alimentación externa	Cable vulcanizado 2 hilos 14AWG 10m		1
38	Cable para comunicación de datos	Apantallado 22AWG 80m	C228	1

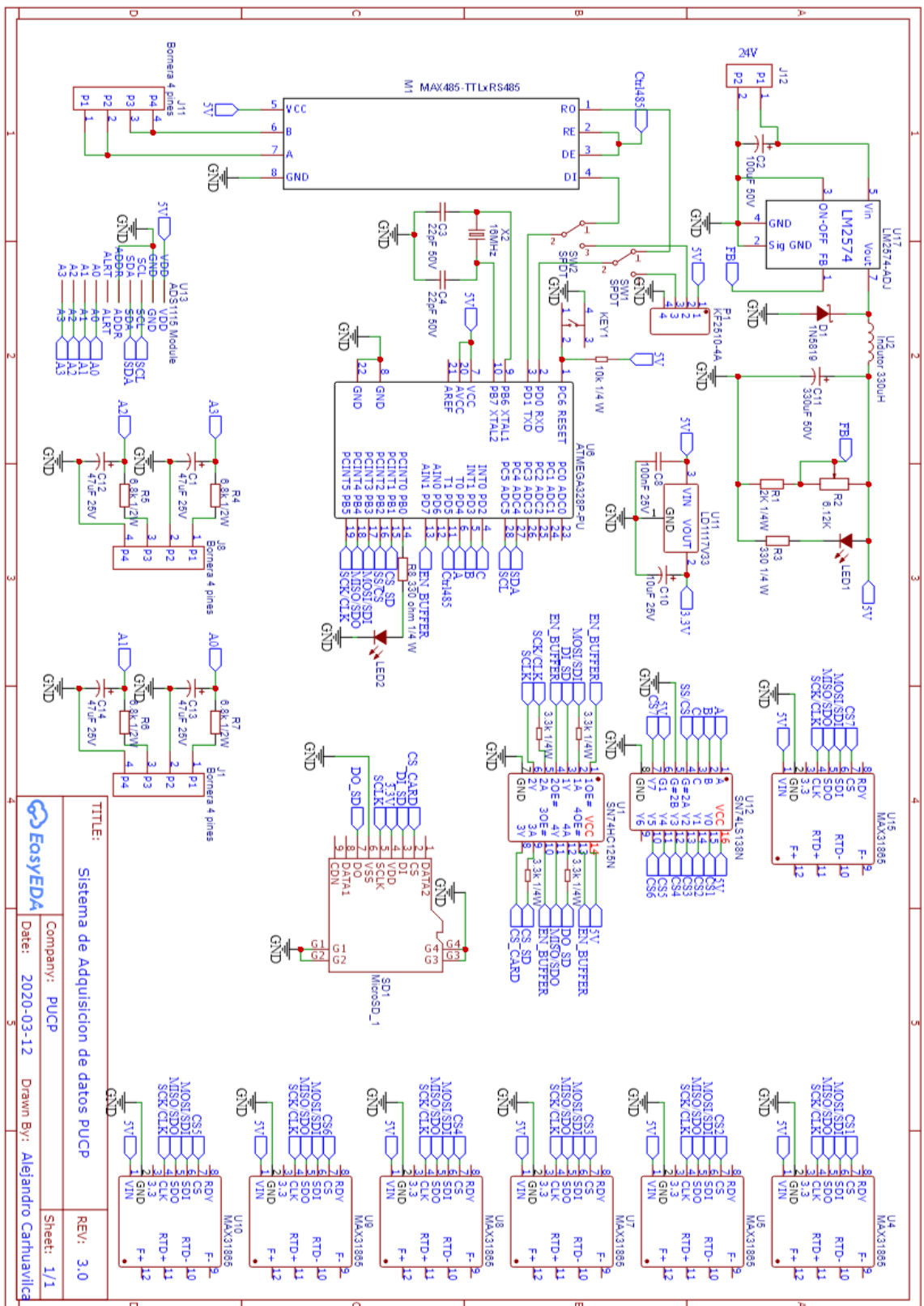


Figura 4.17: Diagrama esquemático de componentes para la implementación del sistema DAQ.