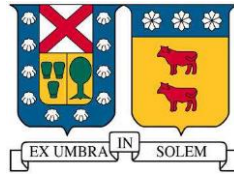


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
SEDE VIÑA DEL MAR JOSÉ MIGUEL CARRERA



**DISEÑO DE UN SISTEMA DE MONITOREO Y COMUNICACIÓN PARA LOS
INVERSORES EN LA INSTALACIÓN FOTOVOLTAICA DE LA SEDE JOSÉ
MIGUEL CARRERA.**

Trabajo de Titulación para optar al
Título de Ingeniero de Ejecución en
CONTROL E INSTRUMENTACIÓN
INDUSTRIAL.

Alumno:

Felipe Nicolás Valdivia Villaseca

Profesor Guía:

Ing. Franz Max Yurjevic Perin



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): ☒ Memoria o trabajo de título; ☐ Tesis de Postgrado;

Título del trabajo: DISEÑO DE UN SISTEMA DE MONITOREO Y COMUNICACIÓN PARA LOS INVERSORES EN LA INSTALACIÓN FOTOVOLTAICA DE LA SEDE JOSÉ MIGUEL CARRERA.

Nombre del candidato(a): Felipe Nicolás Valdivia Villaseca

Carrera / Grado: Ingeniero de Ejecución en CONTROL E INSTRUMENTACIÓN INDUSTRIAL.

Campus: Viña del Mar ; Departamento: ELINF

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Franz Yurjevic Perin, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL

☒ El trabajo **NO** contiene información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

☐ El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (embargo) por:

☐ 6 meses; ☐ 12 meses; ☐ 2 años; ☐ 3 años; ☐ 5 años; ☐ 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 07-Ago-2025

; Firma:

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 07-Ago-2025

; Firma:

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.

RESUMEN

KEYWORDS: FRONIUS, INVERSOR SOLAR, VISUALIZACIÓN, MONITOREO, ENERGÍA SOLAR.

Este trabajo de título presenta una propuesta de mejora para la planta fotovoltaica instalada en la Sede José Miguel Carrera de la Universidad Técnica Federico Santa María. El objetivo principal es implementar un sistema de monitoreo que permita visualizar en tiempo real los parámetros eléctricos entregados por los inversores solares Fronius ECO 25.0-3-S, mejorando la supervisión operativa y facilitando acciones de mantenimiento. La solución considera el uso de herramientas provistas por el fabricante, integradas a una estación de monitoreo local o remota, con el fin de centralizar la información generada por la instalación. Esta propuesta busca contribuir a la eficiencia energética de la universidad y fortalecer el uso académico y tecnológico de la infraestructura fotovoltaica.

ÍNDICE

RESUMEN

ÍNDICE DE FIGURAS

ÍNDICE DE TABLAS

INTRODUCCIÓN - 1 -

1 PRESENTACIÓN DE LOS ANTECEDENTES DE LA
INSTALACIÓN Y LOS EQUIPOS - 3 -

1.1 LA INSTITUCIÓN..... - 3 -

1.2 LA INSTALACIÓN FOTOVOLTAICA..... - 4 -

1.3 LOS INVERSORES - 5 -

1.3.1 Inversor Fronius Eco - 5 -

1.3.2 Disposición de inversores - 8 -

1.4 LOS PANELES FOTOVOLTAICOS - 10 -

1.4.1 Panel solar HIT 325 W - 11 -

1.4.2 Distribución de los paneles - 12 -

1.5 CAJAS STRINGS..... - 14 -

1.6 Tableros de conexión - 15 -

1.6.1 Unilíneal de conexión de los inversores..... - 17 -

1.7 RECONOCIMIENTO DE LA PROBLEMÁTICA - 19 -

1.7.1 Importancia de resolverlo..... - 19 -

1.8 OBJETIVOS..... - 20 -

1.8.1 Objetivo general - 20 -

1.8.2 Objetivos específicos - 20 -

2 COMUNICACIÓN DE LOS EQUIPOS INVERSORES Y
VISUALIZACIÓN DE PARÁMETROS. - 22 -

2.1 REDES Y PROTOCOLOS DE COMUNICACIÓN..... - 23 -

2.1.1 Hardware y software..... - 23 -

2.1.2 Protocolos de comunicación..... - 23 -

2.2 CONECTIVIDAD DE LOS INVERSORES - 25 -

2.3 PLATAFORMA DE MONITOREO Y VISUALIZACIÓN. - 26 -

2.3.1 Fronius Solar Web..... - 27 -

2.3.2	Fronius Modbus Card.	- 28 -
2.4	SOLUCIÓN TÉCNICA.	- 29 -
2.5	CRITERIOS DE SELECCIÓN.....	- 30 -
2.5.1	Mantenimiento	- 30 -
2.5.2	Costo.....	- 31 -
2.5.3	Uso pedagógico:	- 31 -
2.6	EVALUACIÓN Y PONDERACIÓN.	- 31 -
2.7	POSIBLES SOLUCIONES.	- 33 -
2.8	MEJOR SOLUCIÓN.....	- 35 -
3	INGENIERÍA BÁSICA Y EVALUACIÓN ECONÓMICA DEL PROYECTO	- 38 -
3.1	DESCRIPCIÓN DEL FUNCIONAMIENTO.	- 39 -
3.2	PARÁMETROS Y EQUIPOS CRÍTICOS DE LA INSTALACIÓN.	- 40 -
3.3	FRONIUS DATAMANAGER.....	- 42 -
3.3.1	Conexión de los equipos:	- 42 -
3.4	CABLEADO DEL SISTEMA.	- 43 -
3.4.1	Red LAN para conexión del Datamanager a internet:	- 44 -
3.4.2	Fronius Solar Net:	- 45 -
3.5	DIRECCIONAMIENTO Y CONEXIÓN A RED.	- 47 -
3.6	ESTACIÓN DE TRABAJO.....	- 49 -
3.6.1	Configuración de la plataforma Fronius Solar Web:	- 50 -
3.7	COSTOS DEL PROYECTO.	- 54 -
3.7.1	Costos hora hombre:	- 54 -
3.7.2	Costos materiales:.....	- 56 -
3.7.3	Costos totales del proyecto:	- 57 -
3.8	EVALUACIÓN ECONÓMICA DEL PROYECTO.	- 58 -
3.8.1	Análisis al rendimiento del panel:	- 59 -
3.8.2	Análisis a la tasa de fallas de la PFV:	- 63 -
3.8.3	Análisis del Retorno sobre la Inversión (ROI)	- 66 -
	CONCLUSIONES	- 69 -

BIBLIOGRAFÍA - 70 -

ANEXOS - 71 -

ÍNDICE DE FIGURAS

Figuras 1-1 Mapa sede JMC de la UTFSM.....	- 5 -
Figuras 1-2 Inversor Fronius Eco 25.0-3-S.....	- 6 -
Figuras 1-3 Batería de inversores acceso oeste edificio C.....	- 8 -
Figuras 1-4 Inversor instalado en edificio W	- 9 -
Figuras 1-5 Par de inversores en el edificio G y D1	- 9 -
Figuras 1-6 Batería de inversores en el ingreso de Departamento de Mecánica.....	- 10 -
Figuras 1-7 Celda solar Panasonic HIT	- 11 -
Figuras 1-8 Disposición de paneles en los techos de la USM JMC (mapa editado) ...	- 12 -
Figuras 1-9 Paneles en techo de edificio C	- 13 -
Figuras 1-10 Paneles en techo de edificio G y su acceso.....	- 14 -
Figuras 1-11 Cajas strings.....	- 15 -
Figuras 1-12 Tablero de conexión edificio C.....	- 16 -
Figuras 1-13 Tablero de conexión edificio B.....	- 16 -
Figuras 1-14 Tablero de conexión subestación	- 17 -
Figuras 1-15 Diagrama unilineal grupo de inversores tablero C.....	- 18 -
Figuras 1-16 Diagrama unilineal grupo de inversores tablero B.....	- 18 -
Figuras 2-1 Esquema de conexión y comunicación de instalación fotovoltaica.	- 22 -
Figuras 2-2 Protocolos divididos según capas	- 24 -
Figuras 2-3 Esquema del protocolo Modbus/TCP.....	- 25 -
Figuras 2-4 Visualización de la plataforma.....	- 27 -
Figuras 2-5 Diagrama de conexión para funcionamiento de la plataforma.	- 28 -
Figuras 2-6 Tarjeta Fronius ModBus-Card.	- 29 -
Figuras 3-1 Etapas de la ingeniería en un proyecto.	- 39 -
Figuras 3-2 Fronius Datamanager.	- 42 -
Figuras 3-3 Ejemplo de conexión String de inversores.	- 43 -
Figuras 3-4 Cable Cat6A STP.....	- 45 -
Figuras 3-5 Esquema del sistema de monitoreo y visualización propuesto.....	- 46 -
Figuras 3-6 Menú CONFIG, AP WIFI	- 47 -
Figuras 3-7 Interfaz de bienvenida al asistente de configuración Fronius Solar.web. -	- 48 -
Figuras 3-8 Estado de configuración de red en interfaz web Fronius Datamanager. ...	- 49 -
Figuras 3-9 Ejemplo de estación de trabajo.	- 50 -
Figuras 3-10 Registro de usuario Fronius Solar Web.....	- 51 -
Figuras 3-11 Pantalla principal de la plataforma Fronius Solar.web.....	- 52 -
Figuras 3-12 Ejemplo de parámetros mostrados en la plataforma Fronius Solar.web.-	- 53 -

Figuras 3-13 Ejemplo de gráficos entregados por Fronius Solar.web.- 53 -

Figuras 3-14 Grafico de eficacia del panel sin monitoreo.- 60 -

Figuras 3-15 Formula tasa de falla.- 64 -

Figuras 3-16 Formula ROI.- 66 -

Figuras 3-17 Análisis ROI.....- 66 -

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1 Datos técnicos DC del inversor - 7 -

Tabla 1-2 Datos técnicos AC del inversor - 7 -

Tabla 1-3 Dimensiones del panel solar- 12 -

Tabla 2-1Ficha técnica ModbusCard.- 29 -

Tabla 2-2 Matriz de ponderación.....- 33 -

Tabla 2-3 Ponderación de las opciones.....- 35 -

Tabla 3-1 Parámetros críticos monitoreados en la planta fotovoltaica.- 41 -

Tabla 3-2Distribución de las HH.....- 55 -

Tabla 3-3 Valores HH por etapa del proyecto.....- 55 -

Tabla 3-4 Valores totales de las HH.- 56 -

Tabla 3-5 Cubicación de materiales.....- 56 -

Tabla 3-6 Costo total de los materiales.- 57 -

Tabla 3-7 Costo total del proyecto.....- 57 -

Tabla 3-8 Valores auxiliares.....- 60 -

Tabla 3-9 Costos de no generación sin monitoreo.....- 62 -

Tabla 3-10 Costos de no generación con monitoreo.....- 62 -

Tabla 3-11 Análisis de la proyección de ahorros por monitoreo.....- 63 -

Tabla 3-12 Tasa de falla supuestos.- 64 -

Tabla 3-13 Análisis de tasa de fallas.....- 65 -

Tabla 3-14 Casos de disminución en la tasa de falla.- 65 -

Tabla 3-15 Análisis de los flujos de caja proyectados.- 67 -

SIGLA Y SIMBOLOGÍA

A. SIGLAS

P&ID	: Diagrama de tuberías e instrumentación.
PLC	: Controlador lógico programable.
CPU	: Unidad central de procesamiento.
UF	: Unidad de fomento.
USD	: Dólar.
CC	: Corriente continua.
AC	: Corriente alterna.
UTFSM	: Universidad técnica Federico Santa María.
PFV	: Planta fotovoltaica.

B. SIMBLOGÍA

Ω	: Ohm, unidad de medida de resistencia eléctrica.
HP	: Unidad de medida de potencia.
dBa	: Decibelios ajustados, de medida de sonido.
ms	: Mili-segundos.
W	: Watts.
kW/h	: Kilowatts por hora.
Hz	: Hertz, unidad de medida de frecuencia.
GHz	: Giga-Hertz.
mA	: Mili Amperios.
V	: Volts.
A	: Amper.
Mbps	: Megabit por segundo.
kWp	: Kilowatts peak.

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo de tesis corresponde a la implementación de un sistema de monitoreo y visualización para la planta fotovoltaica ubicada en la Sede José Miguel Carrera de la Universidad Técnica Federico Santa María, en Viña del Mar.

El documento se organiza en tres capítulos. El capítulo 1 describe la composición de la instalación fotovoltaica, incluyendo la distribución de los paneles y los inversores, así como el acuerdo legal que regula su operación. Además, se abordan aspectos técnicos como el levantamiento de los paneles, la instalación de los inversores y las cajas de conexión, junto con los objetivos del proyecto.

El capítulo 2 presenta las propuestas de solución para el sistema de monitoreo, analizando las opciones de comunicación entre los inversores y evaluando tres alternativas según un criterio ponderado. La solución seleccionada incluye el uso de la tarjeta Datamanager y la plataforma Fronius Solar Web, que facilita la integración de los inversores y centraliza el acceso a los datos operacionales.

Finalmente, el capítulo 3 aborda el cableado y los accesorios necesarios para la conexión de los equipos, la visualización de los datos en la estación de trabajo remota y la configuración de la plataforma Solar Web para el monitoreo. También se realiza un análisis económico que proyecta los beneficios, costos y ahorros asociados con la implementación del sistema de monitoreo.

Objetivo general

Implementar un sistema de monitoreo para los inversores de la instalación fotovoltaica de la Sede José Miguel Carrera de la UTFSM, que permita la comunicación de los equipos y la recopilación y visualización de datos a través de estaciones de trabajo.

Objetivos específicos

1. Describir el estado actual de la instalación fotovoltaica y sus características.
2. Establecer un sistema de comunicación entre los inversores.
3. Implementar la visualización en tiempo real de los parámetros de generación de la instalación.
4. Realizar un análisis económico de la viabilidad del proyecto, proyectando beneficios, costos y ahorros.

**CAPÍTULO 1: PRESENTACIÓN DE LOS ANTECEDENTES DE LA
INSTALACIÓN Y LOS EQUIPOS**

1 PRESENTACIÓN DE LOS ANTECEDENTES DE LA INSTALACIÓN Y LOS EQUIPOS

En este capítulo se realiza una reseña de la institución, las instalaciones fotovoltaicas. Se describe la instalación, diferenciando, ¿Cuáles son sus componentes?, ¿Cuántos son?, ¿Cuáles son los proveedores?, ¿Cómo están conectados?, ¿Cuál es su distribución?, ¿Cuánta es la potencia instalada?

Se menciona el acuerdo legal establecido entre la Universidad y la empresa propietaria de la instalación, que regula y rige el uso y el cobro de la energía generada por la instalación. Se detalla el estado actual y la operatividad del sistema, de manera de conocer los requerimientos y las condiciones que se deben tener en consideración para establecer las propuestas de solución de la problemática, ajustándose a las normas y los criterios de evaluación para ponderar cada una.

1.1 LA INSTITUCIÓN

La Universidad Técnica Federico Santa María (UTFSM) es una universidad tradicional privada, perteneciente al Consejo de Rectores de las Universidades Chilenas. La UTFSM busca convertirse en la primera universidad chilena certificada en eficiencia energética. Como una forma de sistematizar y dar una dirección clara a las diferentes iniciativas que se realizan al interior de su comunidad, la universidad está implementando un sistema de gestión energética, que podría convertirla en la primera Casa de Estudios chilena en certificarse bajo la norma ISO 50001, un estándar internacional que reconoce a las organizaciones que trabajan para mejorar continuamente la eficiencia y los costos relacionados con energía, además de reducir la emisión de gases de efecto invernadero.

Por lo anterior, la UTFSM inició el desarrollo de uno de los proyectos fotovoltaicos más ambiciosos de Sudamérica al interior de una Casa de Estudios, instalando paneles solares que, en su conjunto —considerando todas sus sedes y campus— alcanzan una potencia total de 1 MW. En particular, para la sede Viña del Mar, donde se enfoca la presente propuesta de mejora, se cuenta con una capacidad instalada de 507 kW, lo que representa aproximadamente el 80% de su demanda energética. Este proyecto fue posible gracias a un acuerdo de cooperación entre la empresa MGM Innova Chile y el gobierno de Japón.

1.2 **LA INSTALACIÓN FOTOVOLTAICA**

La energía solar fotovoltaica es una fuente de energía renovable que produce electricidad a partir de la radiación solar, mediante un dispositivo semiconductor denominado célula fotovoltaica.

La instalación solar presente en la universidad se realizó bajo un contrato de leasing (arrendamiento financiero), un acuerdo en el que una parte (el arrendador) proporciona el uso de un bien a otra parte (el arrendatario) durante un período determinado, con la opción de compra al finalizar el contrato. En este caso, la empresa MGM Innova actúa como arrendadora y propietaria de la instalación. Este acuerdo, con un plazo de 20 años, establece que MGM Innova se encarga de la inversión y la instalación del sistema fotovoltaico, mientras que la UTFSM, como arrendataria, paga por la energía generada a un costo inferior al de la empresa distribuidora. Al finalizar el período de leasing, la universidad tiene la opción de adquirir la instalación solar.

La planta fotovoltaica ubicada en la Sede Viña del Mar comenzó a operar en abril de 2020. Tiene una capacidad instalada de 507 kW y una generación máxima anual de 819,0 MWh. Esta planta cubre aproximadamente el 80% del consumo energético de la sede, mientras que el excedente de energía generado se inyecta a la red bajo el régimen PMGD (Pequeños Medios de Generación Distribuida), lo que contribuye tanto a la eficiencia energética de la universidad como al aprovechamiento de fuentes renovables en su infraestructura.

La instalación está compuesta por 1560 paneles PANASONIC HIT de 325 W, distribuidos en los techos de los edificios C, C1, C2, G y W, y alimenta a 20 inversores FRONIUS ECO 25.0-3-S, los cuales, una vez operativos, se abastecerán completamente de energía renovable.

La distribución de los edificios y sus ubicaciones se puede observar en la Figura 1-1.



Fuente: Biblioteca Sede JMC UTFSM

Figuras 1-1 Mapa sede JMC de la UTFSM

1.3 LOS INVERSORES

Un inversor solar o inversor fotovoltaico es un dispositivo electrónico capaz de transformar la corriente continua (CC) procedente del panel fotovoltaico en corriente alterna (AC) para su aprovechamiento en las instalaciones. Estos se subdividen en: inversores aislados (Off Grid) e inversores conectados a la red (On Grid). Los inversores se utilizan en sistemas fotovoltaicos aislados (autónomos) para alimentar dispositivos eléctricos en instalaciones aisladas. En el caso de ser un sistema fotovoltaico conectado a la red o de cogeneración, el inversor será el encargado de decidir cuándo se hace uso de la energía solar, cuándo es necesaria la red, y también de inyectar la energía generada por la instalación a la red de distribución

1.3.1 Inversor Fronius Eco

Fronius International GmbH es una empresa austriaca con sede en Pettenbach, Alta Austria. Fronius está presente en los campos de la tecnología de soldadura, energía fotovoltaica y tecnología de carga de baterías.

El Fronius Eco trifásico es una línea de inversores con rangos de potencia entre 25,0 y 27,0 kW. Este inversor, sin transformador, ligero y compacto, permite una instalación sencilla y rápida tanto en interiores como en exteriores, ya que cuenta con índice de protección IP66. En la Figura 1-2 se muestra el modelo Fronius Eco 25.0-3-S, utilizado en el sistema fotovoltaico de la sede Viña del Mar de la UTFSM.

Una característica destacada de este equipo es que incluye un paquete de comunicaciones integrado, con registro de datos, conexión inalámbrica (WLAN), Ethernet, gestión de energía, servidor web y múltiples interfaces. Esto permite la conexión a Internet mediante red cableada o inalámbrica sin requerir cableado adicional, ofreciendo así una visualización clara y en tiempo real del funcionamiento de la planta fotovoltaica.

Además, los inversores Fronius pueden integrarse con componentes de terceros gracias a sus interfaces de comunicación abiertas, como Modbus TCP SunSpec, protocolo basado en Modbus que facilita la integración con sistemas externos; Modbus RTU SunSpec, que permite la comunicación maestro-esclavo de forma amigable; y finalmente, el protocolo propio Fronius Solar API (JSON). Todas estas opciones permiten una amplia compatibilidad y flexibilidad en proyectos de monitoreo y control.



Fuente: [https://www.fronius.com /](https://www.fronius.com/)

Figuras 1-2 Inversor Fronius Eco 25.0-3-S

A continuación, se presentan las especificaciones técnicas más relevantes del inversor Fronius Eco 25.0-3-S, tanto en su etapa de entrada (DC) como de salida (AC). Estos parámetros son fundamentales para comprender el comportamiento operativo del inversor dentro del sistema fotovoltaico, permitiendo una integración eficiente del equipo en el conjunto de la instalación. Además, estos datos facilitan el análisis de su rendimiento, garantizando que el sistema de monitoreo y control pueda gestionar de manera adecuada las distintas variables operativas del inversor. La Tabla 1.1 muestra los parámetros eléctricos correspondientes al lado de corriente continua (DC), que incluyen información sobre la corriente de entrada y el rango de tensión. Por otro lado, la Tabla 1.2 detalla las características eléctricas de salida en corriente alterna (AC), proporcionando los valores

de potencia nominal y otros parámetros de salida, necesarios para evaluar la eficiencia de conversión del inversor en la planta fotovoltaica.

Tabla 1-1 Datos técnicos DC del inversor

Parámetro	Valor
Número de seguidores MPP	1
Máxima corriente de entrada (Idc max)	44,2 A
Máxima corriente de cortocircuito por serie FV	71,6 A
Rango de tensión de entrada CC (Vcc mín. - Vcc máx.)	580 - 1000 V
Tensión CC mínima de puesta en marcha (Vdc arranque)	650,0 V
Tensión de entrada nominal (Vdc,r)	580,0 V
Rango de tensión MPP (Vmpp mín. - Vmpp máx.)	580 - 850 V
Rango de tensión de punto de rendimiento máximo utilizable	580 - 850 V
Número de entradas CC	6
Máxima salida del generador FV (Pcc máx.)	37,8 kWpeak

Fuente: Elaboración propia basada en DATASHEET FRONIUS ECO25.0-3-S

Tabla 1-2 Datos técnicos AC del inversor

Parámetro	Valor
Potencia nominal CA (Pac,r)	25,0 kW
Máxima potencia de salida (Pac máx)	25,0 kVA
Corriente de salida CA (Ica nom)	37,9 / 36,2 A
Rango de tensión CA (Vmín. - Vmáx.)	150 - 275 V
Frecuencia (fr)	50 / 60 Hz
Rango de frecuencia (fmín - fmáx)	45 - 65 Hz
Factor de potencia (cos φac,r)	0 - 1 ind./cap.
Acoplamiento a la red (Vca,r)	3~ 400/230 V // 3~ 380/220 V

Fuente: Elaboración propia basada en DATASHEET FRONIUS ECO25.0-3-S.

1.3.2 Disposición de inversores

Los inversores que forman parte de la instalación solar de la sede José Miguel Carrera, descritos anteriormente, están distribuidos en cinco edificios de dicha sede. Cada edificio está equipado con una cantidad determinada de inversores, ubicados en puntos estratégicos para optimizar la eficiencia del sistema.

Como se observa en la Figura 1-3, la mayor concentración de inversores se encuentra en el acceso oeste del edificio C1, con un total de 11 equipos instalados en terreno, lo que permite aprovechar de manera óptima la radiación solar disponible.



Fuente: Elaboración propia, LG Stylo 3

Figuras 1-3 Batería de inversores acceso oeste edificio C

En contraste, en el edificio W, perteneciente a la carrera de Mecánica Automotriz, se encuentra instalado un único inversor, el cual opera de manera independiente respecto del resto del sistema. Esta configuración se muestra en la Figura 1-4.



Fuente: Elaboración propia, LG Stylo 3

Figuras 1-4 Inversor instalado en edificio W

Por otro lado, los edificios D (sector terraza de estudio) y G (colindante con el edificio de Profesores) albergan dos inversores cada uno. La disposición de estos equipos puede apreciarse en la Figura 1-5.



Fuente: Elaboración propia, LG Stylo 3

Figuras 1-5 Par de inversores en el edificio G y D1

Finalmente, los inversores restantes se encuentran ubicados junto al acceso principal del edificio C, específicamente al costado de la entrada del Departamento de Mecánica. En este sector están instalados los equipos rotulados desde el inversor 5 al 8, como se muestra en la Figura 1-6.



Fuente: Elaboración propia, LG Stylo 3

Figuras 1-6 Batería de inversores en el ingreso de Departamento de Mecánica.

Del análisis comparativo entre la información contenida en la documentación técnica disponible y la inspección realizada en terreno —mediante la apertura de las cajas string—, se constató que no existe una descripción formal de los strings conectados a cada inversor. El término string se refiere a agrupaciones de módulos fotovoltaicos conectados en serie, concepto que será abordado con mayor profundidad en el apartado 1.5. A partir del levantamiento realizado en la sede José Miguel Carrera, se determinó que los grupos de entrada están conformados por 3 o 6 strings por inversor, según su ubicación dentro de la instalación.

1.4 LOS PANELES FOTOVOLTAICOS

Un panel solar es una estructura de aluminio compuesta por múltiples células fotovoltaicas de silicio, encargadas de convertir directamente la radiación solar en energía eléctrica mediante el efecto fotovoltaico.

Este efecto se produce cuando la radiación solar incide sobre los electrones de los átomos presentes en las células, otorgándoles suficiente energía para liberarse de su posición original y desplazarse, generando así una corriente eléctrica dentro de un circuito cerrado.

En la sede José Miguel Carrera de la Universidad Técnica Federico Santa María, se utilizan paneles solares de la marca Panasonic. Estos paneles incorporan la tecnología HIT (Heterounión con capa delgada intrínseca), desarrollada por la empresa en

colaboración con la organización japonesa NEDO (Organización para el Desarrollo de Nuevas Energías y Tecnologías Industriales de Japón). Esta tecnología se basa en la combinación de silicio monocristalino con una capa ultrafina de silicio amorfo, lo que permite reducir significativamente las pérdidas por recombinación superficial y mejorar la eficiencia energética, incluso en condiciones de alta temperatura. La Figura 1-7 ilustra una celda solar con esta tecnología.



Fuente: [Panasonic.com/panel_solar_HIT](https://panasonic.com/panel_solar_HIT)

Figuras 1-7 Celda solar Panasonic HIT

1.4.1 Panel solar HIT 325 W

El modelo de panel solar utilizado en la instalación fotovoltaica de la sede corresponde al Panasonic HIT 325 W, el cual está conformado por un conjunto de 96 células fotovoltaicas protegidas mediante encapsulado y montadas sobre una estructura de aluminio. Este modelo logra una eficiencia cercana al 20 %, superando ampliamente los valores típicos de paneles convencionales, que usualmente no superan el 17 %.

Gracias a su diseño compacto y a la menor pérdida de eficiencia por temperatura (coeficiente de $-0,258 \text{ } \%/^{\circ}\text{C}$), este panel permite optimizar el uso del espacio disponible, obteniendo mayor potencia instalada por metro cuadrado. Además, al no poseer partes móviles ni generar ruido, contribuye a una solución energética limpia y de bajo mantenimiento.

A continuación, en la Tabla 1.3, se resumen las principales características físicas de este modelo:

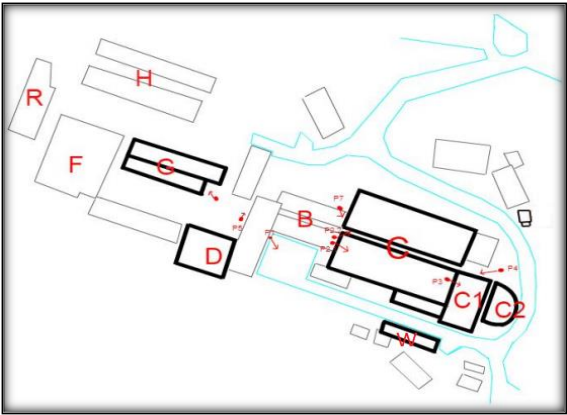
Tabla 1-3 Dimensiones del panel solar

Parámetro	Valor
Voltaje máx. (Vpm)	57,6 V
Voltaje máx. del sistema	600 V
Voltaje máx. Circ.abierto (Voc)	69,6 V
Corriente máx. (Ipm)	5,65 A
Corriente de corto circuito (Isc)	6,03 A
Potencia nominal (P.Máx.)	325 W

Fuente: Elaboración propia basada en DATASHEET PANASONIC HIT N325.

1.4.2 Distribución de los paneles

Las células fotovoltaicas presentes en la instalación están distribuidas en los techos de seis edificios de la sede José Miguel Carrera de la Universidad Técnica Federico Santa María. En la Figura 1.8 se muestra un mapa satelital extraído de Google Maps, editado para resaltar con marcas los edificios que cuentan con paneles solares instalados en sus techos.



Fuente: Google Maps, edición propia

Figuras 1-8 Disposición de paneles en los techos de la USM JMC (mapa editado)

La instalación de la universidad consta de 1.560 paneles conectados en 20 strings de 78 paneles cada uno. Estos están distribuidos entre los edificios C, G, W, D, C1 y C2, siendo el edificio C donde se concentra la mayor cantidad de strings. La disposición de los paneles en el techo del edificio C se puede apreciar en la Figura 1-9.



Fuente: Presentación “Inspección PFV-USM”, Área de Electricidad, Departamento de Electrotecnia e Informática, UTFSM Sede Viña del Mar.

Figuras 1-9 Paneles en techo de edificio C

La inspección técnica realizada por el Departamento de Electrotecnia e Informática, según la presentación técnica titulada "Inspección PFV-USM", reveló varias falencias estructurales en la disposición de los paneles solares. Según el informe, solo el edificio G cuenta con acceso exclusivo a los grupos de paneles, lo que permite un mantenimiento adecuado y conforme a las normativas vigentes. Sin embargo, en los demás edificios, aunque existe acceso a los paneles, no se cumplen completamente las exigencias establecidas por la Superintendencia de Electricidad y Combustibles (SEC) para plantas fotovoltaicas. Esta falta de cumplimiento puede generar riesgos en términos de seguridad y eficiencia operativa. Además, en la Figura 1-9, se puede observar una sombra que afecta parte de la instalación, lo que impacta negativamente en la generación eléctrica, reduciendo el rendimiento esperado de los paneles. Esta obstrucción de luz, causada por elementos circundantes, representa una limitación que debe ser abordada para optimizar la eficiencia energética del sistema. Finalmente, en la Figura 1-10 se presentan los paneles instalados en el techo del edificio G, junto con su acceso exclusivo, lo que demuestra una mejor disposición y organización para el mantenimiento y monitoreo del sistema fotovoltaico en esta zona.



Fuente: Presentación “Inspección PFV-USM”, Área de Electricidad, Departamento de Electrotecnia e Informática, UTFSM Sede Viña del Mar.

Figuras 1-10 Paneles en techo de edificio G y su acceso

Respecto a la distribución eléctrica, los tableros de conexión a los cuales se alimentan los paneles son:

- Edificios C1, C2 y W: Tablero Sector S
- Edificio C: Tablero Sector C
- Edificios D y G: Tablero Sector B

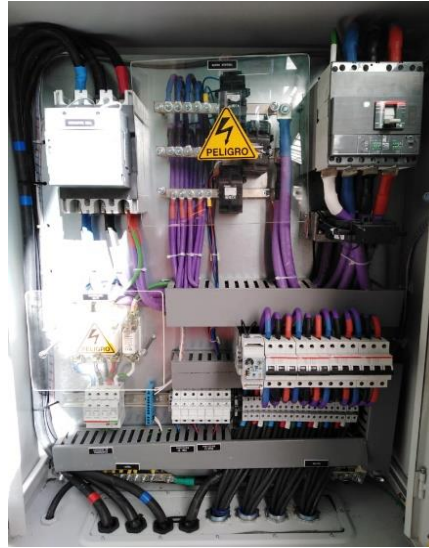
1.5 **CAJAS STRINGS**

En instalaciones fotovoltaicas, el término string se refiere a un grupo de módulos solares conectados en serie, configuración que permite alcanzar los niveles de tensión requeridos para su posterior conversión en los inversores. Esta disposición en serie es fundamental en la etapa de conexión en corriente continua (DC), y su correcta agrupación influye directamente en la eficiencia del sistema.

Las denominadas cajas string son dispositivos encargados de recibir las conexiones provenientes de estos grupos de paneles, centralizando las entradas y realizando el empalme hacia los inversores. Estas cajas suelen estar equipadas con protecciones eléctricas, como fusibles de corriente y dispositivos contra sobretensiones, cumpliendo un rol clave en la seguridad y mantenimiento del sistema.

La instalación ubicada en la sede José Miguel Carrera cuenta con 12 de estas cajas, distribuidas en los mismos sectores que los inversores, aunque su disposición física varía según el edificio. En la Figura 1-11 se muestra una de las cajas utilizadas,

evidenciando su función como punto de interconexión entre la generación fotovoltaica y los equipos de conversión.



Fuente: Presentación “Inspección PFV-USM”, Área de Electricidad, Departamento de Electrotecnia e Informática, UTFSM Sede Viña del Mar.

Figuras 1-11 Cajas strings

1.6 **Tableros de conexión**

El diagrama unilineal de la sede José Miguel Carrera contempla tres puntos principales de conexión eléctrica: el tablero del edificio C, el del edificio B y el tablero general de transferencia ubicado en la subestación. Para efectos de este trabajo, estos serán referenciados como T(C), T(B) y T(S), respectivamente.

En la Figura 1-12 se muestra el tablero de conexión del edificio C, uno de los principales nodos de distribución en la instalación. Este equipo recibe parte de la energía generada por los paneles solares instalados en los edificios C, C1 y C2.

Por su parte, el tablero del edificio B, visible en la Figura 1-13, recibe las conexiones provenientes de los paneles ubicados en los edificios D y G.

Finalmente, el tablero de transferencia de la subestación, mostrado en la Figura 1-14, actúa como punto de interconexión general y coordinación con la red eléctrica interna de la sede.



Fuente: Archivo memorias USM, Inspección técnica tableros sede JMC

Figuras 1-12 Tablero de conexión edificio C



Fuente: Archivo memorias USM, Inspección técnica tableros sede JMC

Figuras 1-13 Tablero de conexión edificio B



Fuente: Archivo memorias USM, Inspección técnica tableros sede JMC

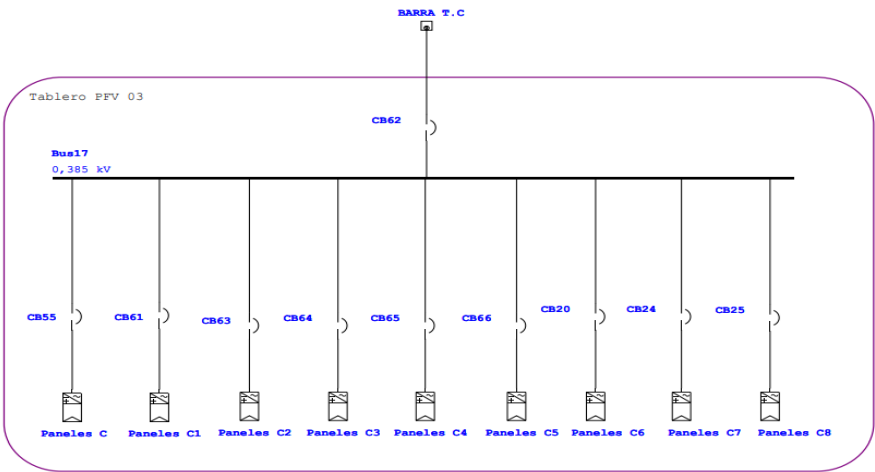
Figuras 1-14 Tablero de conexión subestación

1.6.1 Unilineal de conexión de los inversores

La Planta Fotovoltaica (PFV) de la sede José Miguel Carrera ingresará al sistema eléctrico como una fuente de energía de carácter variable, complementando el consumo interno con generación propia. Para ello, se han instalado 20 inversores, cada uno conectado a un grupo de 78 paneles solares, permitiendo una potencia de salida estimada de 25 kW por equipo.

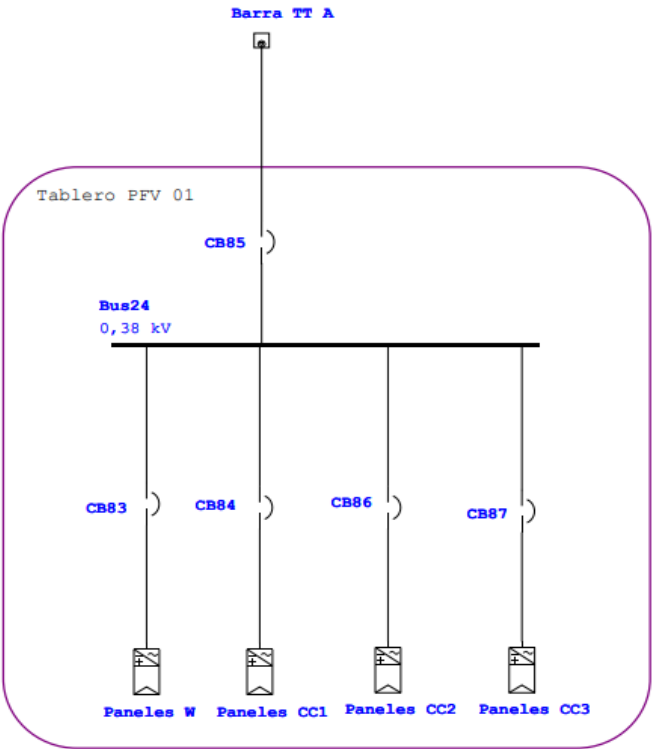
La configuración de conexión entre los módulos fotovoltaicos, los inversores y los tableros eléctricos se representa a través de diagramas unilineales. En la Figura 1-15 se muestra la disposición correspondiente al grupo de inversores conectados al tablero T(C), mientras que en la Figura 1-16 se presenta la conexión hacia el tablero T(B).

Estas conexiones no solo permiten canalizar la energía generada hacia los distintos puntos de consumo de la sede, sino que también integran la planta fotovoltaica a la red interna bajo una lógica de inyección distribuida. De esta manera, la energía generada localmente por cada grupo de inversores se acopla a los tableros sectorizados (T(C), T(B), T(S)), lo cual contribuye a reducir la demanda desde la red externa, optimiza la eficiencia energética del sistema y mejora la autonomía operativa de la sede. Esta arquitectura distribuida también permite monitorear y aislar fallas con mayor precisión, facilitando el mantenimiento y la continuidad del suministro.



Fuente: Archivo memorias USM, Inspección técnica tableros sede JMC

Figuras 1-15 Diagrama unilineal grupo de inversores tablero C



Fuente: Archivo memorias USM, Inspección técnica tableros sede JMC

Figuras 1-16 Diagrama unilineal grupo de inversores tablero B

1.7 **RECONOCIMIENTO DE LA PROBLEMÁTICA**

La problemática identificada en este proyecto se relaciona directamente con la ausencia de un sistema de monitoreo para la instalación fotovoltaica. Debido a la ubicación de los paneles, estos están expuestos constantemente a polvo y partículas en suspensión, las cuales se depositan sobre su superficie, provocando una disminución significativa en su capacidad de generación energética.

La falta de un sistema que permita visualizar en tiempo real los parámetros de generación y el estado operativo de los equipos implica que cualquier anomalía o caída en los niveles de producción podría pasar inadvertida. Esto representa un riesgo tanto para la calidad del servicio entregado por la generadora como para la rentabilidad del proyecto para la UTFSM, ya que las pérdidas podrían acumularse sin ser detectadas ni corregidas oportunamente.

Adicionalmente, la instalación no cuenta con un sistema de comunicación entre los inversores ni con un controlador centralizado que permita la supervisión o gestión remota del sistema, lo cual limita aún más la capacidad de diagnóstico y respuesta ante fallas operativas.

1.7.1 **Importancia de resolverlo**

Contar con un sistema de monitoreo y visualización de los parámetros de generación dentro de los inversores reviste gran importancia, ya que permite aprovechar de manera más eficiente las funcionalidades propias de estos equipos. Tal como se mencionó anteriormente, los inversores instalados cuentan con una amplia gama de protocolos de comunicación, lo cual facilita su integración a sistemas de supervisión.

La capacidad de interconectar los equipos y recopilar datos abre la posibilidad de desarrollar estaciones de monitoreo, tanto remotas como locales, dentro de la instalación.

La implementación de un sistema de monitoreo no solo ofrece visibilidad sobre el estado de generación, sino que también permite obtener datos relevantes para el mantenimiento preventivo del sistema. Esto posibilita anticiparse a posibles fallas, asegurando que la planta opere en condiciones óptimas, y favorece la conservación de la vida útil de los equipos, reduciendo intervenciones correctivas y aumentando la eficiencia operativa del sistema fotovoltaico.

1.8 **OBJETIVOS**

1.8.1 Objetivo general

Implementar un sistema de monitoreo para los inversores de la instalación fotovoltaica de la Sede José Miguel Carrera de la UTFSM, el cual permita la comunicación de los equipos además de la recopilación y visualización de datos a través de estaciones de trabajos.

1.8.2 Objetivos específicos

1. Describir el estado actual de la instalación y sus características.
2. Establecer un sistema de comunicación entre los equipos inversores.
3. Implementar la visualización de los parámetros de generación de la instalación.
4. Realizar un estudio económico de la viabilidad del proyecto.

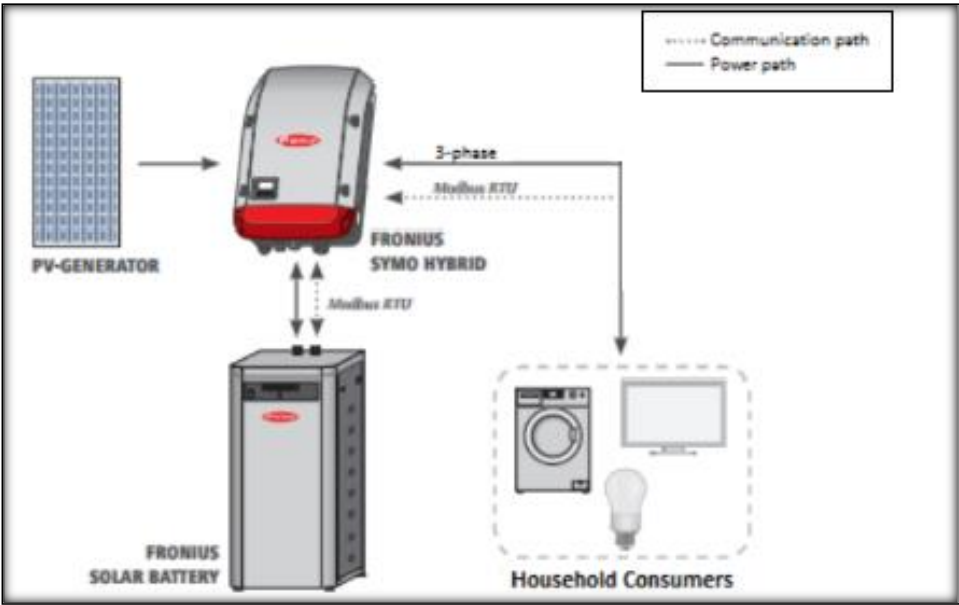
CAPÍTULO 2: COMUNICACIÓN DE LOS EQUIPOS INVERSORES Y VISUALIZACIÓN DE PARÁMETROS

2 COMUNICACIÓN DE LOS EQUIPOS INVERSORES Y VISUALIZACIÓN DE PARÁMETROS.

En este capítulo se describe cómo se establece la comunicación entre los equipos inversores con el fin de obtener los datos de generación provenientes de la planta fotovoltaica. Asimismo, se identifican las opciones disponibles para la adquisición y administración de estos datos, de manera que se pueda obtener el máximo beneficio en términos de eficiencia operativa de la instalación.

Se explican brevemente los protocolos de comunicación utilizados, sus principales características y las diferencias entre ellos. También se detallan los métodos de comunicación integrados en los inversores, junto con las herramientas proporcionadas por el proveedor oficial —como es el caso de Fronius Web— así como las alternativas ofrecidas para establecer interfaces de comunicación con equipos de terceros.

Finalmente, se definen los protocolos seleccionados para este proyecto, explicando su funcionamiento y los principios en los que se basa cada uno de ellos. En la Figura 2-1 se presenta un esquema general de conexión y comunicación utilizado en la instalación fotovoltaica, lo cual permite visualizar cómo se integran los distintos componentes del sistema.



Fuente: Presentación “Fronius Solar Energy”, Fronius International GmbH.

Figuras 2-1 Esquema de conexión y comunicación de instalación fotovoltaica.

2.1 **REDES Y PROTOCOLOS DE COMUNICACIÓN**

Una red de comunicación es, en términos generales, un sistema compuesto por equipos informáticos conectados entre sí mediante dispositivos físicos, que permiten la transmisión y recepción de datos. Esta comunicación puede realizarse a través de impulsos eléctricos, ondas electromagnéticas u otros medios de transmisión, con el objetivo de compartir información, datos o recursos entre los distintos dispositivos que la integran.

Para su correcto funcionamiento, toda red de comunicación debe contar con ciertos elementos fundamentales. Entre los principales se encuentran el hardware, el software y los protocolos de comunicación, que permiten establecer las reglas para el intercambio ordenado y confiable de datos entre los equipos conectados.

2.1.1 Hardware y software.

En una red de comunicación, el hardware comprende todos los dispositivos físicos necesarios para la transmisión de datos entre equipos. Entre estos se incluyen módems, hubs, routers y switches, los cuales cumplen funciones como el direccionamiento de datos, la administración del tráfico, la interconexión entre segmentos de red y, en algunos casos, la conversión de señales según el medio de transmisión.

El software, por su parte, corresponde a los programas o sistemas que gestionan la operación de la red y permiten la comunicación entre dispositivos. Esto puede incluir sistemas operativos con capacidades de red, controladores de dispositivos, aplicaciones de monitoreo y software integrado en los propios equipos de red, como el que utilizan routers o inversores solares para procesar datos y gestionar la comunicación.

2.1.2 Protocolos de comunicación

Un protocolo de comunicación es el conjunto de reglas que permite a distintos elementos de un sistema establecer comunicaciones entre sí para intercambiar información. Estos protocolos definen la semántica (el significado) y la sintaxis (la estructura) que deben emplearse durante el proceso comunicativo.

Existen diversos protocolos que varían según la aplicación y el nivel de abstracción, y pueden clasificarse según capas en modelos de comunicación (ver Figura 2-2).

Ejemplos de protocolos de red
• <u>Capa 1: Nivel físico</u> • Cable coaxial o UTP (categoría 5, categoría 5e, categoría 6, categoría 6a), Cable de fibra óptica, cable de par trenzado, Microondas, Radio, RS-232, RS-485.
• <u>Capa 2: Nivel de enlace de datos</u> • ARP, RARP, Ethernet, Fast Ethernet, Gigabit Ethernet, Token Ring, FDDI, ATM, HDLC, CDP.
• <u>Capa 3: Nivel de red</u> • IP (IPv4, IPv6), X.25, ICMP, IGMP, NetBEUI, IPX, Appletalk.
• <u>Capa 4: Nivel de transporte</u> • TCP, UDP, SPX.
• <u>Capa 5: Nivel de sesión</u> • NetBIOS, RPC, SSL.
• <u>Capa 6: Nivel de presentación</u> • ASN.1.
• <u>Capa 7: Nivel de aplicación</u> • SNMP, SMTP, NNTP, FTP, SSH, HTTP, CIFS (también llamado SMB), NFS, Telnet, IRC, POP3, IMAP, LDAP, Internet Mail 2000, y en cierto sentido, WAIS y el desaparecido GOPHER.

Fuente: www.tecno.com/ejemplos.

Figuras 2-2 Protocolos divididos según capas

En el contexto de la comunicación entre equipos industriales, Modbus es un protocolo ampliamente utilizado. Fue desarrollado en 1979 por Modicon para sus controladores lógicos programables (PLCs) y está basado en una arquitectura maestro/esclavo (o cliente/servidor). Su carácter abierto y facilidad de implementación lo han convertido en un estándar en la industria para la interconexión de dispositivos electrónicos.

Modbus/TCP es una extensión del protocolo que permite la comunicación sobre redes Ethernet utilizando los protocolos TCP/IP. Esta versión encapsula los mensajes Modbus dentro de tramas TCP, facilitando la supervisión y control de dispositivos industriales como PLCs, computadoras y drivers de motores en redes intranet o internet (ver Figura 2-3).



Fuente: <https://www.logicbus.com.mx/Modbus.php>.

Figuras 2-3 Esquema del protocolo Modbus/TCP

Por otro lado, Modbus RTU (Unidad Terminal Remota) es uno de los modos originales de transmisión definidos en la especificación Modbus. Es especialmente útil para aplicaciones serie y para el mantenimiento y monitoreo de redes y dispositivos en instalaciones industriales automatizadas. A diferencia de Modbus TCP, la comunicación en Modbus RTU se realiza a través de enlaces seriales, lo que implica ciertas particularidades en la sincronización y el manejo de solicitudes y respuestas para garantizar la integridad de los datos.

2.2 CONECTIVIDAD DE LOS INVERSORES

La línea de inversores Fronius Eco integra un completo paquete de comunicaciones que incluye registro de datos, conectividad inalámbrica (WLAN), conexión por cable (Ethernet), gestión de energía, servidor web y diversas interfaces de comunicación. Estas características permiten que el inversor se conecte a Internet mediante red cableada o inalámbrica, sin necesidad de cableado adicional, facilitando así la visualización en tiempo real del funcionamiento de la instalación fotovoltaica.

Además, los inversores pueden interoperar con componentes de otros fabricantes mediante interfaces estándar como Modbus TCP SunSpec y Modbus RTU SunSpec, los cuales emplean el protocolo Modbus con perfiles de datos estandarizados definidos por la SunSpec Alliance, orientados específicamente a sistemas de generación solar. También está disponible la interfaz Fronius Solar API (JSON), que utiliza el formato de intercambio

de datos JavaScript Object Notation para facilitar la integración de los datos del inversor en plataformas de monitoreo personalizadas.

Adicionalmente, el fabricante ofrece la posibilidad de que el usuario delegue el monitoreo de la planta fotovoltaica a su plataforma en la nube, Fronius Solar.web, la cual permite un seguimiento centralizado del desempeño de la instalación. Las interfaces abiertas pueden utilizarse en paralelo, lo que permite una integración flexible entre dispositivos Fronius y sistemas de terceros, aspecto relevante para el desarrollo de soluciones de monitoreo interoperables en el entorno universitario.

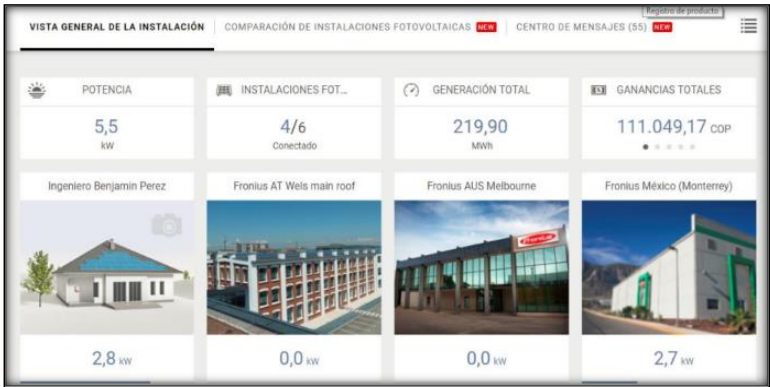
2.3 PLATAFORMA DE MONITOREO Y VISUALIZACIÓN.

La instalación fotovoltaica cuenta con una plataforma de monitoreo proporcionada por el fabricante de los inversores: Fronius Solar.web. Esta herramienta permite la supervisión, análisis y visualización de datos operacionales, y puede ser utilizada tanto para seguimiento diario como para estudios comparativos entre distintas instalaciones.

Existen dos versiones disponibles: una versión estándar de libre acceso y una versión ampliada denominada Fronius Solar.web Premium, que habilita funcionalidades adicionales, como el almacenamiento de datos históricos por periodos más extensos, herramientas de comparación y visualización avanzada de parámetros.

Adicionalmente, el sistema se complementa con Fronius Solar.TV, una interfaz en línea que permite proyectar datos operativos en tiempo real en pantallas públicas, lo cual puede resultar útil en contextos educativos o de difusión institucional.

La Figura 2-4 muestra un ejemplo de la interfaz gráfica de la plataforma, donde se observa la visualización en tiempo real de variables como potencia generada, consumo, y estado del sistema.



Fuente: www.Fronius.com/visualizavion/FroniusSolarWeb.

Figuras 2-4 Visualización de la plataforma.

2.3.1 Fronius Solar Web.

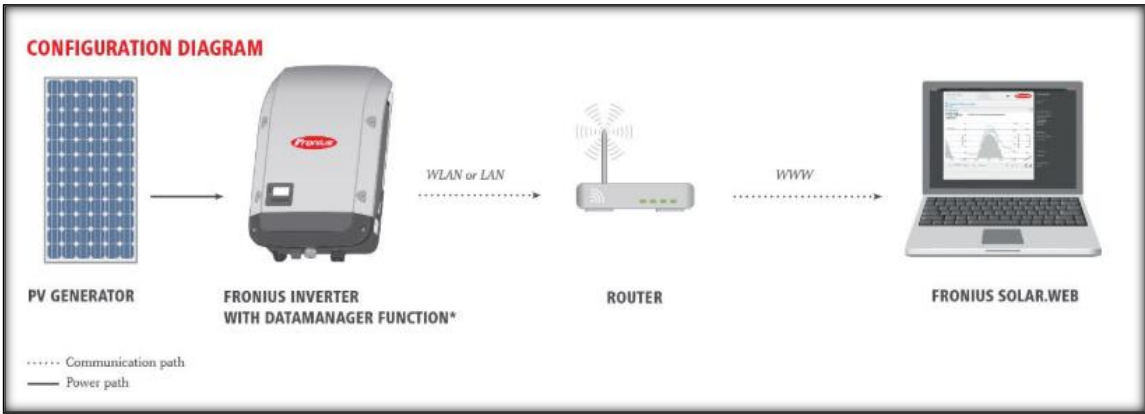
El uso de esta plataforma permite centralizar la supervisión de variables operativas, realizar comparaciones entre equipos o subsistemas, y emitir alertas automáticas en caso de desviaciones del comportamiento esperado. A través de la interfaz de usuario, se pueden visualizar en tiempo real parámetros clave como potencia, voltaje, corriente y rendimiento de los inversores, lo que facilita el monitoreo y control continuo del sistema. También es posible recibir reportes de rendimiento por correo electrónico, lo que facilita la gestión preventiva del sistema.

Una función adicional incluida en la versión Premium es el servicio proactivo, que permite al usuario recibir notificaciones, alertas y sugerencias de optimización tanto por correo electrónico como por mensaje de texto. Esto contribuye a una operación más informada y a la identificación oportuna de posibles anomalías.

En el caso particular de Chile, esta versión Premium se encuentra actualmente disponible sin costo adicional, lo cual facilita su incorporación en contextos académicos o institucionales como herramienta de monitoreo y análisis.

Fronius Solar Web mantiene la planta bajo control gracias a su capacidad de monitorear remotamente el estado y desempeño de los inversores y equipos fotovoltaicos. Los monitores disponibles dentro de la plataforma incluyen gráficos en tiempo real, alertas de fallo y notificaciones automáticas que aseguran la operación eficiente y optimizada del sistema.

La Figura 2-5 muestra un esquema de conexión utilizado para el funcionamiento de la plataforma en una instalación típica.



Fuente: www.Fronius.com/visualizavion/FroniusSolarWeb.

Figuras 2-5 Diagrama de conexión para funcionamiento de la plataforma.

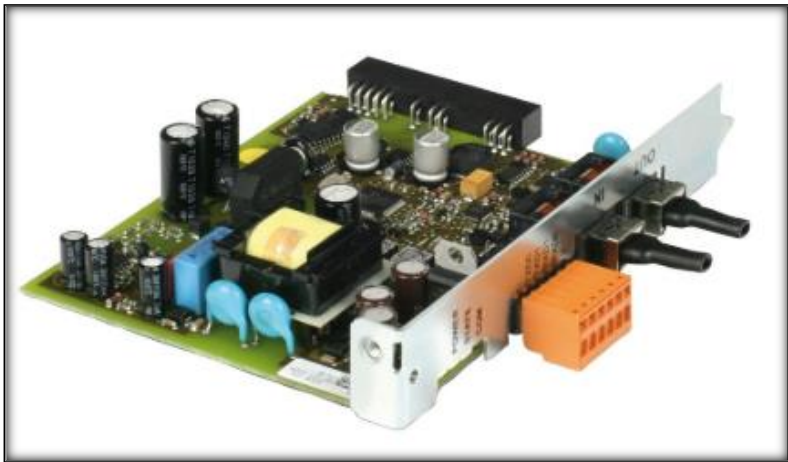
2.3.2 Fronius Modbus Card.

La Fronius Modbus Card es un accesorio provisto por el fabricante que permite la integración de inversores Fronius en sistemas de monitoreo y control de otros fabricantes. Este módulo facilita la emisión de datos desde la planta fotovoltaica mediante el protocolo estandarizado Modbus RTU – SunSpec, permitiendo su lectura y procesamiento en sistemas externos.

Su diseño permite no solo la recolección de datos, sino también el control del inversor, lo que la convierte en una herramienta útil para proyectos que requieren interoperabilidad con componentes de terceros. Gracias a su instalación simple, puede incorporarse tanto en sistemas nuevos como en instalaciones ya existentes.

En instalaciones donde existen varios inversores interconectados, se debe instalar una Modbus Card en cada equipo, para asegurar la comunicación correcta dentro de la red. Las especificaciones técnicas entregadas por el fabricante indican los requerimientos necesarios para su correcta implementación. Esta información resulta clave al momento de diseñar un sistema de monitoreo robusto y compatible.

La Figura 2-6 muestra el aspecto físico de la tarjeta, mientras que la Tabla 2-1 presenta sus principales características técnicas.



Fuente: <http://as-iberica.com/catalogodeproductos/fronius-modbus-card/>

Figuras 2-6Tarjeta Fronius ModBus-Card.

Tabla 2-1Ficha técnica ModbusCard.

Datos técnicos		
Alimentación	208 V / 240 V / 277 V (+10% / -15%)	
Consumo de energía	1,6 W	
Dimensiones (altura x anchura x profundidad)	140 x 101 x 28 mm	
Interfaces	- Fronius Solar Net	
	- Modbus RTU	
Rango de frecuencia (fmín - fmax)	- RJ45	>>IN<<
	- RJ45	>>OUT<<
	- Regleta de bornes de 6 polos	
Opciones de conexión	- Modbus RTU 2 ó 4 hilos	
Indicación de Led	- Led Power	- Verde
	- Led State	- Rojo
	- Led Com	- Amarillo

Fuente: Elaboración propia basada en DATASHEET FRONIUS MODBUS CARD.

2.4 SOLUCIÓN TÉCNICA.

Conociendo las características de los elementos que deben ser comunicados y las opciones disponibles para ello, es el momento de buscar una solución a la problemática. Para esto, se deben considerar todos los antecedentes previos, además de las condiciones

del terreno y otros criterios relevantes que permitan evaluar su preferencia sobre otras posibles soluciones.

Es necesario identificar la mayor cantidad de alternativas viables y objetivas, las cuales serán evaluadas bajo criterios técnicos, con el fin de ponderar sus características y determinar la solución que resuelva de mejor manera la problemática, cumpliendo con los objetivos y estándares establecidos.

2.5 **CRITERIOS DE SELECCIÓN**

El propósito de los criterios de selección es proveer referencias para el desarrollo, uso y evaluación de las características de diseño, funcionalidad e implementación de las opciones posibles. Aunque la valoración de estos atributos depende en parte del juicio profesional, los criterios técnicos constituyen un marco de referencia que asegura que los aspectos más relevantes de los requerimientos del proyecto sean considerados y cumplidos.

En general, estos criterios buscan proporcionar información técnica relevante sobre los sistemas propuestos para abordar la solución de la problemática. La exigencia asignada a cada característica varía según su importancia para el desarrollo del proyecto. Por ejemplo, que el sistema sea sencillo puede tener un peso menor en comparación con su costo, ya que este último puede, de forma rápida y preliminar, determinar en gran medida la viabilidad del proyecto.

Por esta razón, se le otorga importancia al concepto de ponderación de cada atributo, lo que permite comparar objetivamente las distintas alternativas.

A continuación, se nombran y detallan los criterios de selección empleados en este proyecto, con el fin de conocer su alcance e importancia.

2.5.1 **Mantenimiento**

Este criterio evalúa el esfuerzo, recursos y tiempo necesarios para diseñar, implementar y ejecutar un plan de mantenimiento efectivo para los equipos del sistema. Incluye la disponibilidad y accesibilidad de repuestos y servicios de reparación, que son fundamentales para garantizar la continuidad operativa.

Además, se considera la facilidad para que el personal encargado pueda interpretar y reconocer patrones o situaciones críticas a partir de los datos generados, lo

cual es esencial para anticipar fallas y optimizar las intervenciones. La calidad y precisión de la información referente a parámetros de generación son vitales para proyectar el rendimiento futuro del sistema y realizar análisis históricos que soporten la toma de decisiones en mantenimiento preventivo y correctivo.

2.5.2 Costo

Este criterio se refiere concretamente al costo inmediato en dinero asociado a la implementación del sistema, según cada una de las posibles soluciones. Considera la adquisición de los equipos principales, licencias de software, elementos auxiliares, repuestos, materiales de montaje e instalación, además de los costos asociados a la configuración y puesta en marcha del sistema.

Asimismo, se contempla la estimación de costos indirectos relevantes, como el tiempo de dedicación del personal técnico o posibles adecuaciones en infraestructura existentes. La evaluación de este criterio busca identificar la solución que ofrezca el mejor equilibrio entre desempeño técnico y viabilidad económica, asegurando un uso eficiente de los recursos disponibles para el proyecto.

2.5.3 Uso pedagógico:

Este criterio evalúa el potencial de cada alternativa para apoyar el proceso de enseñanza y aprendizaje en la universidad, considerando la cantidad de carreras, laboratorios y asignaturas que se beneficiarían. También valora la versatilidad y adaptabilidad de los equipos y software, así como la facilidad de uso y la amigabilidad de la interfaz, aspectos clave para facilitar su incorporación en actividades académicas y promover un aprendizaje dinámico y práctico.

2.6 EVALUACIÓN Y PONDERACIÓN.

Los criterios previamente descritos se aplican a las posibles soluciones definidas para el proyecto. Estas son evaluadas según el grado de cumplimiento o satisfacción que entregan en relación con cada criterio. La evaluación se realiza de manera cualitativa, utilizando las categorías “alto”, “medio” y “bajo”, a las que se asigna un valor numérico con el fin de efectuar un análisis ponderado posterior.

La evaluación se orienta hacia lo positivo, es decir, se considera el nivel de beneficio que cada solución entrega respecto del criterio evaluado. Si una alternativa presenta un beneficio alto, se le asigna un puntaje de 3; si el beneficio es medio, se asigna un 2; y si es bajo, se asigna un 1.

En el caso del criterio de mantenimiento, se considera que una solución presenta un beneficio alto si permite un mantenimiento sencillo, entrega información clara y completa sobre los parámetros relevantes, tiene repuestos de fácil acceso y no requiere personal altamente especializado para su reparación. En ese escenario, se le asigna un puntaje de 3.

Para el criterio de costo, si una alternativa requiere una gran inversión inicial, necesita equipos auxiliares adicionales o muchos accesorios para permitir la visualización de parámetros y la comunicación entre los equipos, se considera que ofrece un bajo beneficio económico, por lo que se le asigna un puntaje de 1.

Respecto al criterio de uso pedagógico, si una solución aporta valor a más de una carrera, permite la realización de laboratorios y clases teóricas, tiene una interfaz de fácil uso y comprensión para los estudiantes, pero su aplicación práctica está limitada (por ejemplo, a grupos pequeños), se considera que ofrece un beneficio medio, por lo que se le asigna un puntaje de 2.

El método utilizado para esta evaluación es el de factores ponderados, el cual permite realizar un análisis cuantitativo comparando las diferentes características y atributos evaluados. A cada criterio se le asigna un peso relativo o ponderación, según su importancia dentro de los objetivos del proyecto.

En este caso, los criterios de selección se ponderan de la siguiente manera:

- Mantenimiento: 35%
- Costo: 35%
- Uso pedagógico: 30%

Como se muestra en la Tabla 2-2, la matriz de ponderación se construye considerando estas proporciones, lo que permite establecer una comparación objetiva entre las alternativas.

Tabla 2-2 Matriz de ponderación

Criterio	Ponderación	Opción A		Opción B		Opción C	
		Calificación	Puntuación	Calificación	Puntuación	Calificación	Puntuación
Mantenimiento	0,35						
Costo	0,35						
Uso pedagógico	0,3						
Total	1						

Fuente: Elaboración propia Excel.

2.7 **POSIBLES SOLUCIONES.**

Los equipos inversores instalados en la planta cuentan con la posibilidad de implementar un sistema de monitoreo utilizando la plataforma digital proporcionada por el fabricante. Esta solución permite una visualización completa del desempeño de la instalación y un análisis centralizado de los datos operacionales, gestionado directamente por la empresa proveedora.

Como alternativa, es posible desarrollar un sistema de monitoreo independiente mediante la incorporación de dispositivos de terceros, utilizando para ello la tarjeta de comunicación opcional suministrada por el fabricante. Esta tarjeta permite la recopilación y gestión de datos desde los inversores, siempre que los equipos externos sean compatibles con los protocolos de comunicación empleados (por ejemplo, Modbus RTU o Modbus TCP) y ofrezcan funcionalidades adecuadas de visualización y almacenamiento.

Considerando lo anterior, a continuación, se presentan tres opciones de solución viables para el desarrollo del sistema de monitoreo propuesto.

- Opción A: Sistema de monitoreo, visualización y análisis por medio de plataforma Fronius Solar.web, utilizando la tarjeta de comunicación Fronius Datamanager 2.0. Esta opción consiste en implementar un sistema de monitoreo basado en la plataforma Fronius Solar.web, utilizando el Datamanager 2.0, una tarjeta de comunicación adicional que se instala en el inversor principal y debe adquirirse por separado. Esta tarjeta permite la transmisión de datos a través de Internet, estableciendo comunicación entre los inversores y la plataforma, que debe configurarse para que todos los dispositivos se reconozcan en la red. La estación de trabajo se compondrá de un PC adecuado y dos monitores para la visualización y análisis de los datos. El software Fronius Solar.web (versión Premium gratuita en Chile) permite acceder a información operativa como la generación de energía, el ahorro económico, y parámetros técnicos (tensión, corriente de entrada/salida),

con gráficos comparativos y alertas de rendimiento. Este sistema facilita la supervisión constante del funcionamiento, así como la identificación de fallas y la optimización de la planta. La intervención en los equipos es mínima, limitándose al cableado de red, sin necesidad de dispositivos adicionales. Las garantías de los inversores permanecen vigentes, y la plataforma ofrece grandes ventajas pedagógicas al permitir un análisis detallado y visual del comportamiento del sistema, lo que facilita la comprensión y análisis tanto técnico como económico.

- Opción B: Sistema de monitoreo y visualización con Arduino, utilizando la tarjeta de comunicación Fronius Modbus Card. Esta opción permite implementar un sistema de monitoreo utilizando la tarjeta de comunicación Modbus Card, junto con un equipo Arduino que se encargará de extraer los datos de los inversores. Para ello, será necesario desarrollar rutinas de programación específicas que gestionen la recopilación de datos, su interpretación y el envío a la estación de trabajo. Aunque esta alternativa representa una opción más económica en comparación con la tarjeta Datamanager, se debe tener en cuenta que la programación de los datos, su orden y almacenamiento son aspectos que deben ser gestionados manualmente, lo que aumenta la complejidad operativa. Además, la capacidad de almacenamiento está limitada por la memoria de los componentes utilizados, lo que podría restringir la cantidad de datos almacenados a lo largo del tiempo y requerir componentes adicionales para extender esta capacidad. La intervención en los equipos requiere la instalación de las tarjetas Modbus en los inversores, lo que incrementa el riesgo de fallos y hace que el mantenimiento del sistema sea más complejo. Desde el punto de vista pedagógico, esta opción presenta limitaciones en el análisis educativo de los datos, debido a la necesidad de procesar y visualizar la información a través de una programación personalizada. Esto puede hacer que el análisis del comportamiento de la planta sea más difícil de realizar, en comparación con la opción A.

- Opción C: Sistema de monitoreo, visualización y almacenamiento con PLC, utilizando la tarjeta de comunicación Fronius Modbus Card. Al igual que la opción anterior, esta alternativa requiere la adquisición e instalación de la tarjeta de comunicación Fronius, lo que representa un incremento en los costos y una mayor intervención en los equipos. Los datos se obtienen a través de un controlador lógico programable (PLC), cuya adquisición implica una inversión superior en comparación con soluciones basadas en microcontroladores. Una ventaja significativa de esta alternativa es que el PLC permite el almacenamiento de los datos, lo que incrementa su valor educativo al facilitar el análisis posterior del funcionamiento de la planta. Además, el uso de un único controlador central simplifica el mantenimiento, aunque el hecho de incorporar equipos adicionales también eleva el riesgo de fallas. La adquisición de un PLC no representa una dificultad relevante, ya que existen múltiples proveedores locales o nacionales que pueden ser consultados para cotizaciones y entrega de equipos compatibles.

2.8 **MEJOR SOLUCIÓN.**

Tras aplicar los criterios técnicos definidos en la matriz de ponderación, se evaluaron las tres opciones propuestas, obteniendo la siguiente puntuación total (ver Tabla 2-3). De acuerdo con los resultados, la Opción A, con un valor total de 2,65, destaca en los tres criterios clave: mantenimiento, costo y uso pedagógico. A continuación, se encuentran la Opción B (2,35) y la Opción C (1,95), que, aunque viables, presentan desventajas en comparación con la Opción A en términos de eficiencia y costos.

Tabla 2-3 Ponderación de las opciones

Criterio	Ponderación	Opción A		Opción B		Opción C	
		Calificación	Puntuación	Calificación	Puntuación	Calificación	Puntuación
Mantenimiento	0,35	3	1,05	2	0,7	2	0,7
Costo	0,35	2	0,7	3	1,05	1	0,35
Uso pedagógico	0,3	3	0,9	2	0,6	3	0,9
Total	1		2,65		2,35		1,95

Fuente: Elaboración propia Excel.

La opción “Sistema de monitoreo, visualización y análisis por medio de la plataforma Fronius Solar.web” se posiciona como la solución más adecuada para este proyecto, al obtener la mayor valoración en los tres criterios: mantenimiento, costo y uso pedagógico.

Desde el punto de vista técnico, esta opción presenta varias ventajas, permite operar directamente con el fabricante, no requiere intervenciones significativas en los inversores más allá del cableado de red, y su implementación es sencilla y de bajo riesgo. Además, actualmente la versión Premium de la plataforma no tiene costo en Chile, lo que disminuye significativamente los gastos de implementación.

En cuanto al mantenimiento, esta solución se destaca al permitir el monitoreo continuo mediante reportes automáticos, análisis de fallas y sugerencias de optimización proporcionadas por la misma empresa Fronius. La facilidad de acceso a componentes también contribuye a reducir tiempos y costos operativos.

Desde una perspectiva pedagógica, esta alternativa tiene un alto valor, ya que ofrece una interfaz intuitiva, visualizaciones en tiempo real, gráficas comparativas,

reportes históricos y herramientas de análisis que enriquecen el proceso de enseñanza-aprendizaje. Esto la convierte en una plataforma idónea para actividades académicas como laboratorios, talleres o clases prácticas sobre energías renovables y sistemas de monitoreo.

Por estas razones, y considerando la ponderación de los criterios definidos en este proyecto, la opción A es seleccionada como la mejor solución técnica, económica y académica para la instalación de monitoreo en la sede José Miguel Carrera de la UTFSM.

CAPÍTULO 3: INGENIERÍA BÁSICA Y EVALUACIÓN ECONÓMICA DEL PROYECTO

3 INGENIERÍA BÁSICA Y EVALUACIÓN ECONÓMICA DEL PROYECTO

Este capítulo presenta el desarrollo de la ingeniería básica de la propuesta de mejora del sistema fotovoltaico en la Sede José Miguel Carrera de la Universidad Técnica Federico Santa María (UTFSM), en Viña del Mar. Se abordan los requerimientos funcionales y técnicos, las especificaciones preliminares, la distribución física y lógica de los equipos, y una evaluación económica inicial.

Esta etapa resulta fundamental para establecer los fundamentos técnicos que permitirán avanzar hacia la ingeniería de detalle, garantizando coherencia con los objetivos técnicos, operativos y pedagógicos definidos en la tesis.

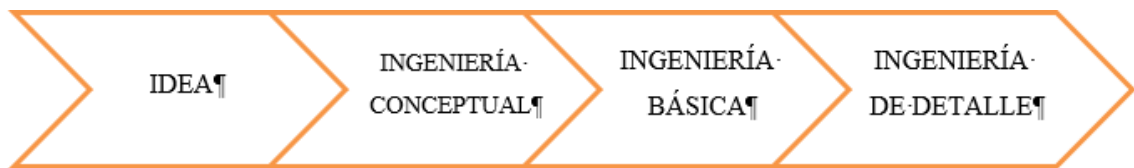
La ingeniería, como disciplina, aplica conocimientos científicos, técnicos y prácticos para diseñar, construir y optimizar sistemas, considerando también aspectos sociales, económicos y medioambientales. En este proyecto, la ingeniería básica define las condiciones mínimas para asegurar el funcionamiento eficiente y seguro del sistema de monitoreo fotovoltaico.

Las actividades consideradas en esta fase son las siguientes:

- Revisión de la ingeniería conceptual y condiciones de terreno.
- Identificación de equipos críticos para la operación y monitoreo.
- Distribución de puntos de acceso, conectividad y canalizaciones.
- Elaboración de listas de consumos eléctricos y equipos.
- Valoración económica preliminar del sistema.

La aprobación de esta fase constituye una base sólida para avanzar con la siguiente etapa de ingeniería de detalle.

A continuación, en la Figura 3.1: Etapas de la Ingeniería en un Proyecto, se presentan las principales fases del desarrollo de un sistema de ingeniería, desde la concepción hasta la implementación.



Fuente: http://ingenieriablog.com/etapas_ingenieria_

Figuras 3-1 Etapas de la ingeniería en un proyecto.

3.1 **DESCRIPCIÓN DEL FUNCIONAMIENTO.**

En el marco de la ingeniería básica del proyecto, esta sección describe la implementación del sistema de monitoreo de la planta fotovoltaica (PFV), incluyendo la estructura de comunicación entre equipos, adquisición de datos y visualización en la estación de trabajo.

El sistema de monitoreo, basado en la plataforma Fronius Solar.web, permite registrar, analizar y visualizar en tiempo real los parámetros operativos de la PFV. Para ello, se emplea una arquitectura de red que considera aspectos físicos (cableado y conectores), lógicos (protocolo de comunicación) y digitales (transmisión a la nube del fabricante).

Cada grupo de inversores, o string, se interconecta mediante el sistema propietario Fronius Solar.Net, que opera bajo protocolo RS-422, utilizando cableado blindado categoría CAT6A y conectores RJ45 en una topología de bus en anillo, asegurando comunicación confiable y estable.

Uno de los inversores incorpora la tarjeta Fronius Datamanager 2.0, que centraliza la información de todos los equipos conectados y la transmite vía LAN o WiFi a Solar.web. Esta tarjeta actúa como puente entre la red RS-422 y la red Ethernet local.

La estación de trabajo, ubicada en el laboratorio de electricidad de la sede José Miguel Carrera de la UTFSM, permite la visualización y gestión de variables como potencia, voltaje, corriente y energía generada, sirviendo como herramienta de análisis técnico y apoyo a la formación académica

3.2 **PARÁMETROS Y EQUIPOS CRÍTICOS DE LA INSTALACIÓN.**

Dentro del desarrollo de la ingeniería básica, una tarea clave es identificar los parámetros críticos del sistema, definidos como aquellos que afectan directamente la operación, rendimiento y confiabilidad de la planta fotovoltaica (PFV). El monitoreo de estos valores permite garantizar la calidad de la generación eléctrica y evaluar el comportamiento técnico y económico de la instalación.

Los parámetros críticos seleccionados deben monitorearse de forma continua o periódica, considerando su unidad de medida, rango esperado, y utilidad tanto para diagnóstico técnico como para evaluación pedagógica. Estos son:

- Voltaje de entrada (CC) en los string de paneles
- Corriente de entrada (CC) en los string
- Voltaje de salida (CA) de los inversores
- Corriente de salida (CA)
- Frecuencia de salida
- Potencia generada por los paneles
- Potencia consumida por la instalación
- Energía diaria generada
- Energía entregada a la red (diaria y mensual)
- Energía consumida
- Eficiencia de conversión de la instalación

Estos datos se registran automáticamente mediante los inversores Fronius y se transmiten a la plataforma Solar.web, desde donde pueden ser consultados para evaluación operativa, mantenimiento predictivo, análisis económico o actividades docentes.

En la Tabla 3-1 se detallan los parámetros, unidades de medida y periodicidad de lectura.

Tabla 3-1 Parámetros críticos monitoreados en la planta fotovoltaica.

Parámetro	Unidad	Frecuencia de lectura	Descripción / Uso principal
Voltaje de entrada (cc)	V	Cada 5 seg.	Medición por string para diagnóstico de generación
Corriente de entrada (cc)	A	Cada 5 seg.	Control de operación y detección de fallas
Voltaje de salida (ca)	V	Cada 5 seg.	Verificación de conexión con red
Corriente de salida (ca)	A	Cada 5 seg.	Determina carga efectiva y sincronización
Frecuencia de salida	Hz	Cada 5 seg.	Control de compatibilidad con la red eléctrica
Potencia generada	W / kW	Cada 1 min	Variable clave para seguimiento de rendimiento
Potencia consumida	W / kW	Cada 1 min	Balance energético y análisis de carga interna
Energía generada diaria	kWh	1 vez al día	Evaluación de producción y comparación interdiaria
Energía entregada a red (diaria)	kWh	1 vez al día	Cuantificación de aporte a la red
Energía generada mensual	kWh	1 vez al mes	Análisis de estacionalidad de producción
Energía a la red mensual	kWh	1 vez al mes	Indicador para evaluación económica del sistema
Energía consumida total	kWh	1 vez al día / acumulado	Evaluación global del consumo interno
Eficiencia de conversión	%	Cada 1 min	Relación entre energía útil entregada y potencial solar

Fuente: Elaboración propia Excel, requerimientos del proyecto.

Estos parámetros son fundamentales para garantizar el funcionamiento adecuado de la planta, permitiendo el cumplimiento de los criterios de diseño establecidos y facilitando el mantenimiento preventivo, el análisis económico y el uso educativo por parte de los estudiantes y docentes en contextos de formación técnica aplicada.

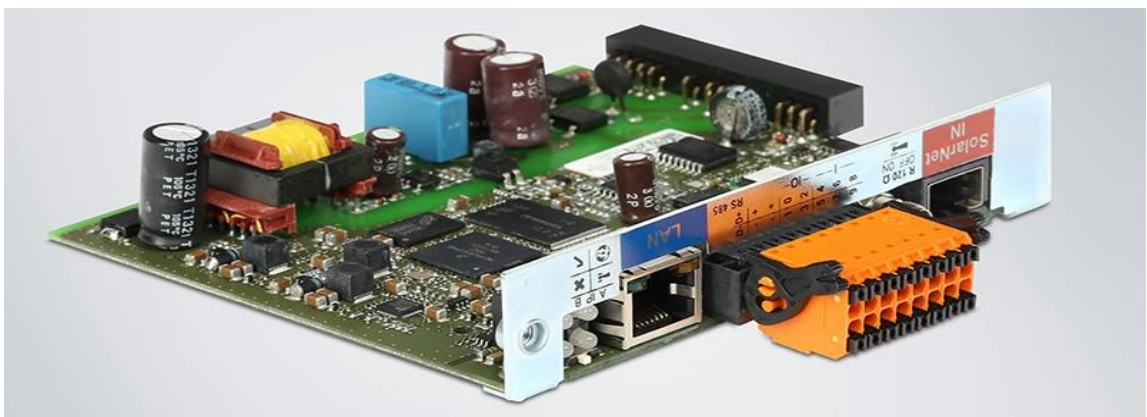
Respecto a los equipos, los inversores Fronius Eco 27.0-3-S se clasifican como componentes críticos, ya que su operación condiciona directamente el desempeño general del sistema; por ello, se implementa un monitoreo constante tanto a nivel individual como grupal, lo que permite asegurar una supervisión confiable, continua y alineada con los objetivos operativos y pedagógicos del proyecto.

3.3 **FRONIUS DATAMANAGER**

El Fronius Datamanager 2.0 es una tarjeta electrónica integrada en los modelos actuales de inversores Fronius, cuya función es recopilar, almacenar y transmitir datos operacionales de la planta fotovoltaica (PFV). Actúa como un datalogger que habilita la supervisión remota del sistema a través de una red de comunicación cableada.

Gracias a su arquitectura, permite enviar información en tiempo real a la plataforma Fronius Solar.web, donde se puede visualizar el desempeño de la instalación, incluyendo parámetros como potencia instantánea, energía generada, alertas de fallas y estado de los equipos (ver Figura 3-2).

Esta capacidad de monitoreo es fundamental para el control técnico, pedagógico y operativo de la planta, permitiendo la integración con redes educativas y sistemas de análisis remoto.



Fuente: <http://www.Fronius.com/DataLogger.web>

Figuras 3-2 Fronius Datamanager.

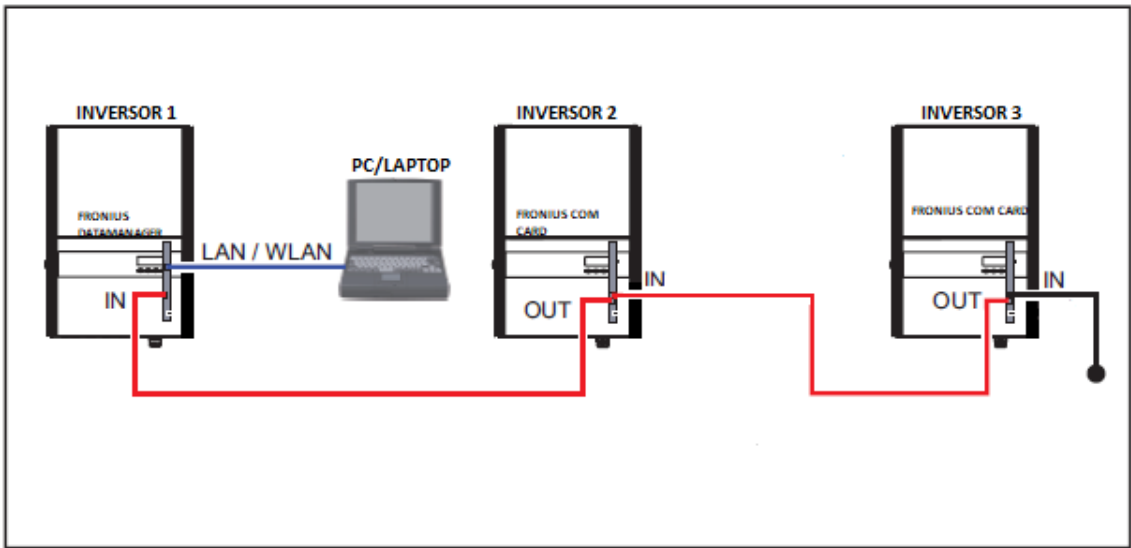
3.3.1 **Conexión de los equipos:**

En la instalación, solo un inversor cuenta con el Fronius Datamanager, el cual actúa como nodo principal del sistema. Este equipo permite la conexión directa a Internet mediante red Ethernet, habilitando la transmisión de los datos operativos hacia la nube del fabricante para su análisis remoto.

Los restantes inversores están conectados al principal a través de un bus de comunicación interno, formando un string de datos. Esta conexión se establece utilizando

un protocolo propietario basado en RS-422, lo que permite que toda la información se consolide en el inversor principal y sea enviada de forma unificada a la plataforma de monitoreo (ver Figura 3-3).

Este esquema garantiza una comunicación robusta, escalable y de bajo mantenimiento, sin necesidad de múltiples dataloggers o configuraciones individuales por inversor.



Fuente: PDF Manual de usuario Fronius Datamanager 2.0

Figuras 3-3 Ejemplo de conexión String de inversores.

3.4 CABLEADO DEL SISTEMA.

El cableado necesario para implementar el sistema de monitoreo de la planta fotovoltaica se divide en dos componentes clave: uno para la interconexión de los inversores dentro del string de comunicación, y otro para establecer la conexión de red entre el inversor principal y la plataforma Fronius Solar.web.

La interconexión de los inversores se realiza mediante un bus de comunicación en anillo, utilizando el protocolo propietario Fronius Solar Net, que requiere el uso de cable blindado de par trenzado CAT6a STP con conectores RJ45, compatible con señales diferenciales RS-422. Este protocolo permite que un único inversor con Datamanager 2.0 centralice la información de todos los equipos del string.

Por otro lado, la conexión del inversor principal a la red institucional se realiza mediante cableado estructurado Ethernet CAT6a, que cumple con las especificaciones del protocolo Ethernet para transmitir datos entre el inversor y la plataforma web.

3.4.1 Red LAN para conexión del Datamanager a internet:

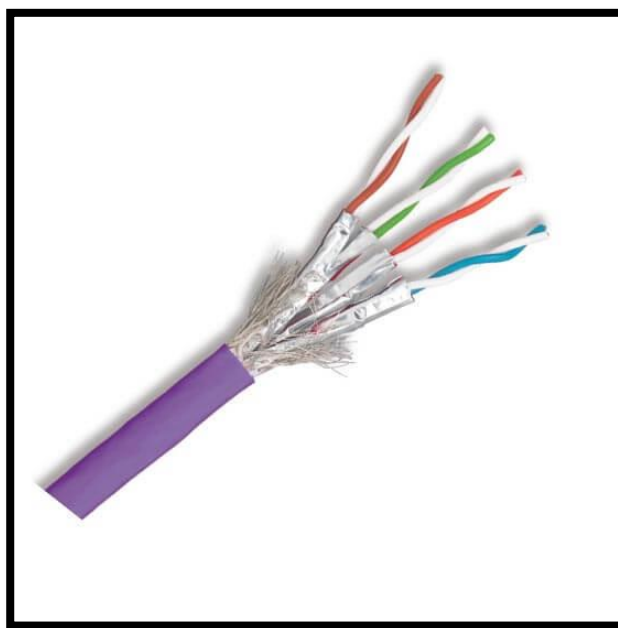
Para asegurar el monitoreo remoto de la planta fotovoltaica a través de la plataforma Fronius Solar.web, es indispensable que el inversor principal, equipado con la tarjeta Fronius Datamanager 2.0, cuente con acceso estable a Internet. Este acceso se proveerá mediante un punto de red ubicado en el laboratorio de electricidad de la sede Viña del Mar, que forma parte de la infraestructura de red institucional.

La conexión se realizará mediante cableado estructurado categoría CAT6a o superior, del tipo STP (Shielded Twisted Pair), lo que asegura inmunidad frente a interferencias electromagnéticas comunes en ambientes industriales. Este tipo de cable, cuya impedancia característica es de 100 Ω , permite transmisiones Ethernet de alta velocidad y confiabilidad. En la Figura 3-4 se muestra un ejemplo de este tipo de cable.

El punto de red institucional está conectado a un switch administrado, que actúa como nodo central de distribución de datos. Desde este switch se extiende una conexión LAN directa hacia el inversor principal, permitiendo la transmisión segura y continua de los datos de generación hacia la nube del fabricante.

La configuración de red debe garantizar la existencia de un único Datamanager por sistema fotovoltaico y mantener la red de la planta lógicamente separada de otras redes institucionales, evitando posibles conflictos de comunicación. Para esto, se recomienda utilizar direcciones IP fijas dentro de una subred dedicada exclusivamente al sistema fotovoltaico.

Este esquema asegura que el Datamanager transmita en tiempo real los datos operativos a la plataforma Fronius Solar.web, permitiendo una supervisión eficiente del sistema con fines técnicos, pedagógicos y de mantenimiento.



Fuente: <https://www.otscable.com/bulk-cable/cat6a/cat6a-sftp-cable/>

Figuras 3-4 Cable Cat6A STP.

3.4.2 Fronius Solar Net:

Fronius Solar Net es un sistema de comunicación desarrollado por el fabricante para enlazar múltiples inversores dentro de una planta fotovoltaica, permitiendo la transmisión de datos operacionales de manera centralizada y confiable. Este sistema utiliza el protocolo de comunicación RS-422 y una topología de bus en anillo, donde cada inversor se conecta al siguiente mediante puertos específicos de entrada y salida de datos.

En la planta fotovoltaica de la sede José Miguel Carrera, la implementación de Fronius Solar Net es fundamental para integrar la información generada por los distintos inversores distribuidos en los bloques C1, C, D, G y W. Los inversores se conectan en serie utilizando los puertos IN – OUT disponibles en la tarjeta Fronius Com Card, formando un bus de comunicación que permite la circulación de datos entre todos los equipos y su consolidación en el inversor principal, el cual cuenta con la tarjeta Datamanager 2.0 integrada.

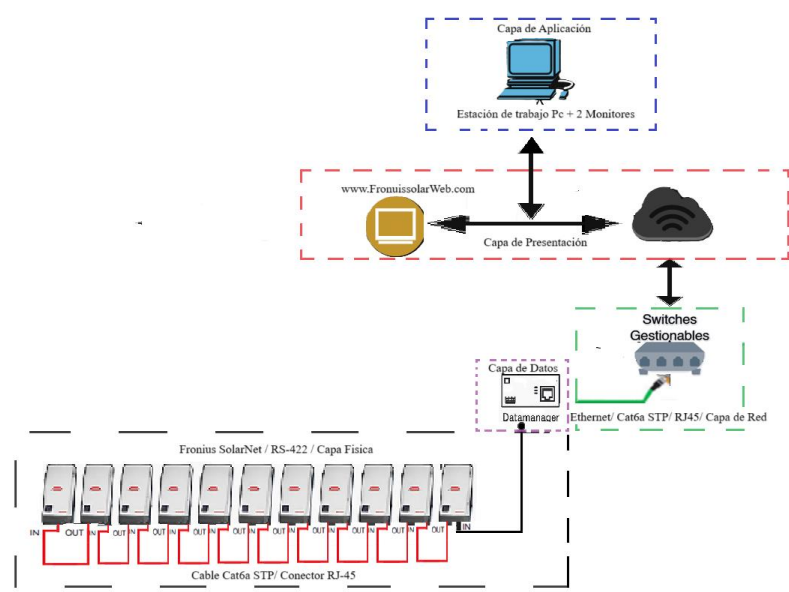
La conexión entre los inversores se realiza mediante cable categoría CAT6a STP (Shielded Twisted Pair) o superior, con conectores RJ45, cumpliendo con las normas ISO/IEC 11801 y EN 50173. Este tipo de cable ofrece un blindaje adecuado frente a interferencias electromagnéticas comunes en instalaciones eléctricas industriales y posee una impedancia característica de 100 Ω , compatible con las señales diferenciales utilizadas por el protocolo RS-422 implementado en Fronius Solar Net.

Según la disposición de los inversores en la sede, se estima que las distancias entre equipos varían entre 50 y 120 metros. Dado que la recomendación técnica para tramos de comunicación digital sin repetidor es de hasta 100 metros, se sugiere que en la etapa de ingeniería de detalle se evalúe la incorporación de repetidores de señal RS-422, estas medidas asegurarán la integridad de la señal y la confiabilidad del sistema de monitoreo.

La red Fronius Solar Net requiere la instalación de terminadores de red provistos por el fabricante en el primer y último puerto RJ45 del bus de comunicación, asegurando el cierre eléctrico de la línea y evitando reflexiones que puedan afectar la calidad de transmisión de datos.

Una vez configurada la red, toda la información recopilada será enviada al Datamanager, que la transmitirá a la plataforma Fronius Solar.web a través de la conexión LAN institucional. Este esquema permite cumplir con los objetivos técnicos y pedagógicos del proyecto, asegurando un monitoreo en tiempo real de los parámetros operativos de la planta, su análisis remoto y su utilización como herramienta de aprendizaje para estudiantes y docentes de la sede.

La Figura 3-5 muestra el esquema de conexión y la implementación del sistema de monitoreo para la planta fotovoltaica, basado en el diseño propuesto. Este esquema fue elaborado utilizando el software Draw.io.



Fuente: Elaboración propia con Draw.io.

Figuras 3-5 . Esquema del sistema de monitoreo y visualización propuesto.

3.5 **DIRECCIONAMIENTO Y CONEXIÓN A RED.**

Todos los inversores de la planta fotovoltaica de la sede José Miguel Carrera fueron puestos en marcha al momento de su instalación, por lo que cuentan con los parámetros básicos previamente configurados y actualizados. En este proyecto, la configuración requerida se enfoca en el direccionamiento IP y la conexión a red del sistema de monitoreo, mediante el inversor principal que incorpora la tarjeta Fronius Datamanager 2.0.

Para realizar la configuración inicial del Datamanager, se utiliza su punto de acceso WiFi (AP) integrado, el cual habilita la creación de una red inalámbrica propia. Esta red permite enlazar el inversor con un computador para acceder a la interfaz de configuración y definir los parámetros de red que utilizará el sistema para su comunicación operativa. El acceso se realiza ingresando al menú CONFIG del inversor, donde se selecciona la opción “Punto de acceso a WiFi (AP)”, como se observa en la Figura 3-6, permitiendo crear una red con nombre bajo el formato “FRONIUS_240.xxxxx” (donde xxxxx corresponde a 5-8 dígitos específicos) y contraseña predeterminada de administrador “12345678”.



Fuente: PDF Manual de usuario Fronius Eco 25 kW

Figuras 3-6 Menú CONFIG, AP WIFI

Una vez conectado el computador a la red generada por el inversor, se accede desde un navegador web a la dirección IP predeterminada del Datamanager (192.168.250.181). En esta página de configuración, ilustrada en la Figura 3-7, se ingresan los parámetros generales de la planta, tales como su nombre, ubicación y moneda de referencia, además de visualizar los inversores conectados, indicando su modelo y nombre específico. Asimismo, esta interfaz permite verificar el estado de comunicación de cada inversor con el Datamanager, revisar posibles notificaciones de error o advertencia, y realizar ajustes adicionales de configuración si se detectan inconsistencias en la red de datos. Este proceso es fundamental para garantizar la correcta integración de todos los equipos en el sistema de monitoreo, asegurando que la información transmitida a la plataforma Fronius Solar.web sea precisa, completa y representativa del desempeño real de la planta fotovoltaica.

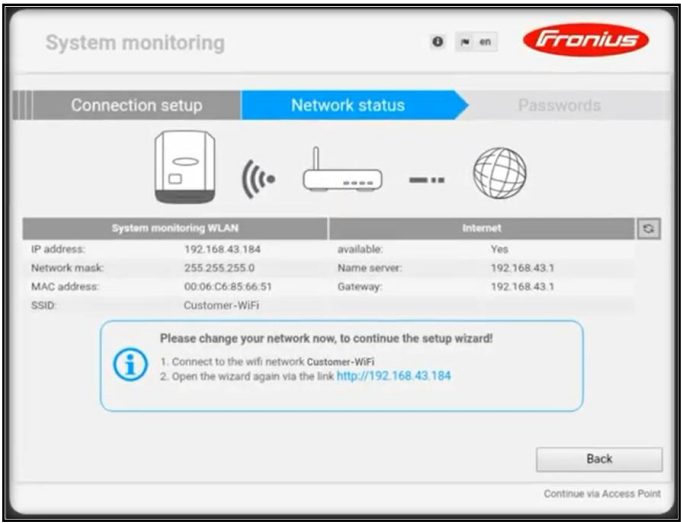


Fuente: PDF Manual de usuario Fronius Eco 25 kW

Figuras 3-7 Interfaz de bienvenida al asistente de configuración Fronius Solar.web.

Durante este procedimiento también se configura la red que utilizará el Datamanager para su conexión operativa a Internet. La Figura 3-8 muestra el estado de conexión de red visualizado en la interfaz del Datamanager, donde se presentan parámetros como dirección IP asignada, máscara de red, gateway, servidor DNS y disponibilidad de Internet. En este proyecto se definió que la comunicación se realizará mediante conexión Ethernet cableada hacia la red institucional de la sede, garantizando estabilidad, velocidad y seguridad en la transmisión de datos. Por lo tanto, una vez completada la configuración inicial, se conecta el cable categoría CAT6a STP desde el puerto LAN del inversor al punto de red establecido en el laboratorio de electricidad.

Con esta conexión, el Datamanager establece la comunicación con la plataforma Fronius Solar.web, permitiendo el monitoreo en tiempo real de los parámetros operativos de la planta fotovoltaica, su análisis remoto y su utilización como herramienta técnica y pedagógica para estudiantes y docentes de la sede. Este sistema facilita la supervisión constante del rendimiento de la instalación, asegurando la detección temprana de posibles fallas, la programación de mantenimientos preventivos y el desarrollo de actividades académicas que integren el análisis de datos reales, fortaleciendo así la formación práctica en energías renovables y eficiencia energética de los futuros profesionales.



Fuente: PDF Manual de usuario Fronius Eco 25 kW

Figuras 3-8 Estado de configuración de red en interfaz web Fronius Datamanager.

3.6 **ESTACIÓN DE TRABAJO.**

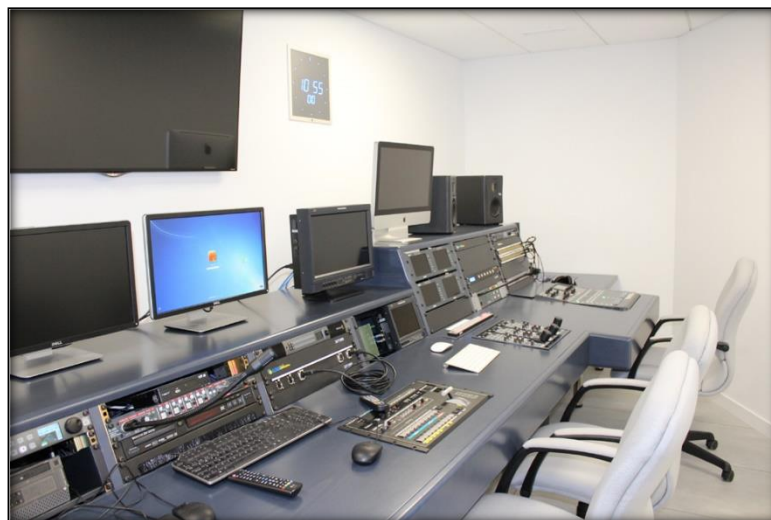
La estación de trabajo definida para este proyecto se instalará en el laboratorio de electricidad de la sede José Miguel Carrera y será el punto central para la supervisión y análisis de los datos operativos de la planta fotovoltaica a través de la plataforma Fronius Solar.web. Para asegurar una correcta gestión de la información, se requerirá un PC de alto rendimiento, específicamente un procesador Intel Core i7 o similar, con al menos 16 GB de memoria RAM y un almacenamiento SSD de 512 GB para garantizar la fluidez en la transmisión y visualización de los datos sin demoras. Este equipo será el que se conecte a la red de datos de la universidad, utilizando la red institucional LAN/Ethernet para asegurar una conexión estable y segura.

El acceso a Internet para la estación de trabajo se proporcionará mediante un punto de red ubicado en el laboratorio, que estará directamente conectado al switch central

de la sede, lo que asegura la transmisión de los datos hacia la plataforma Fronius Solar.web. En cuanto a la visualización, se necesitarán monitores de 24” o mayores con alta resolución para facilitar la observación detallada de los gráficos de generación, parámetros de entrada y salida, y otras métricas relevantes del sistema fotovoltaico. La conectividad será clave, ya que el PC deberá estar configurado para enviar y recibir información constantemente a través de la red LAN, sin requerir elementos adicionales como routers o switches adicionales, ya que la infraestructura actual de la universidad dispone de los recursos necesarios.

Con esta estación de trabajo, no solo se garantiza la supervisión y el mantenimiento adecuado del sistema, sino también su uso en actividades pedagógicas, permitiendo a los estudiantes analizar y comprender el funcionamiento del sistema fotovoltaico en tiempo real. Este equipo es esencial para la correcta implementación del sistema de monitoreo y optimización del rendimiento energético de la planta fotovoltaica.

La Figura 3-9 muestra un ejemplo de estación de trabajo adecuada para este tipo de sistemas de monitoreo.



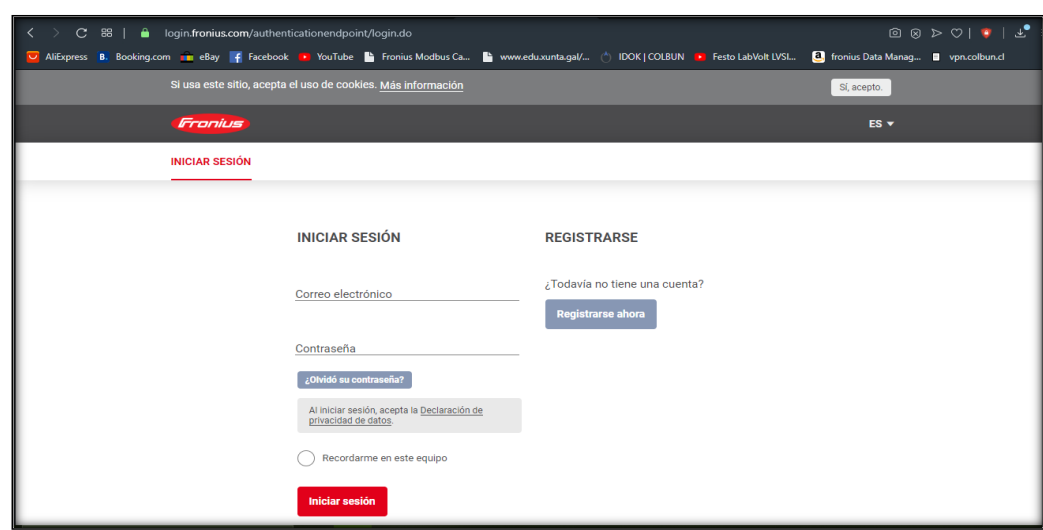
Fuente: PDF Manual de usuario Fronius Eco 25 kW

Figuras 3-9 Ejemplo de estación de trabajo.

3.6.1 Configuración de la plataforma Fronius Solar Web:

La estación de trabajo permite visualizar los parámetros y análisis que la plataforma Fronius Solar.web realiza sobre la planta fotovoltaica. Para habilitar esta función, se realiza la configuración inicial de la plataforma desde la estación de trabajo, asegurando su correcto funcionamiento y vinculación con los datos generados por los

inversores. Primero, se debe acceder a la página www.solarweb.com, donde es necesario registrarse como usuario para crear una cuenta asociada a la instalación. Este proceso se realiza completando el formulario de registro y validando los datos ingresados, tal como se muestra en la Figura 3-10. Durante este registro, se recomienda utilizar un correo institucional o corporativo, asegurando así la gestión formal de la cuenta y su administración futura por parte de personal autorizado. Además, es importante definir un nombre de usuario y contraseña seguros, manteniendo la confidencialidad y protección de los datos operativos de la planta frente a accesos no autorizados.



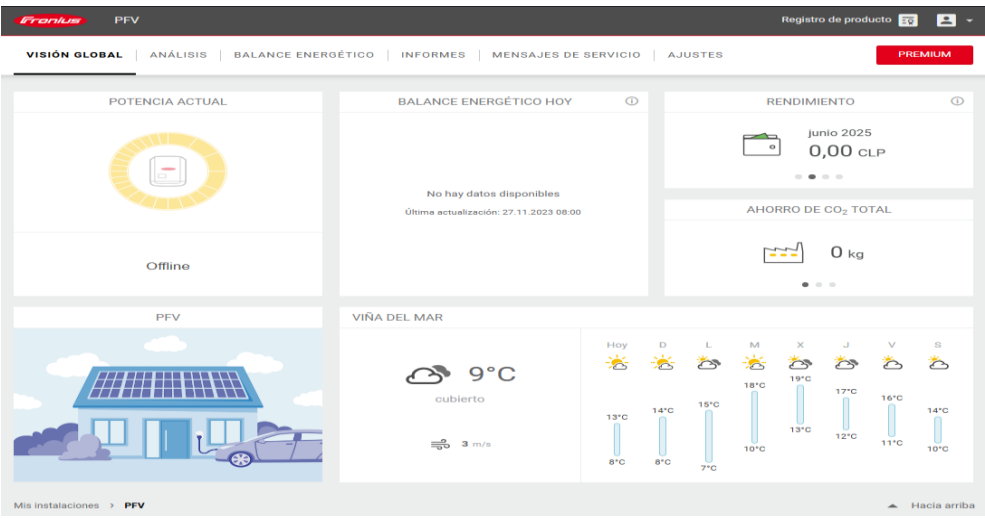
Fuente: PDF Puesta en marcha del sistema de monitoreo.

Figuras 3-10 Registro de usuario Fronius Solar Web.

Una vez completado el registro de usuario, el siguiente paso es añadir y asociar la instalación fotovoltaica a la cuenta creada. Para ello, se completan los campos solicitados por la plataforma, tales como dirección de la instalación, código postal, nombre de la planta y otros datos generales. El campo más relevante en este proceso es el ID del Datalogger, el cual se obtiene durante la configuración inicial del Datamanager, cuando este crea su red WiFi propia y muestra dicho identificador único en pantalla. Posteriormente, se configuran los parámetros relacionados con los tiempos de comunicación y la frecuencia de envío de datos desde el Datamanager hacia la plataforma Solar.web, asegurando su correcto funcionamiento.

Completados estos pasos, la plataforma redirige al usuario a la pantalla principal, ilustrada en la Figura 3-11. En esta vista general se presentan parámetros como la potencia actual, un resumen del ahorro económico generado por la instalación y la información ambiental, incluyendo temperatura, humedad y ahorro de CO₂. Además, en la barra

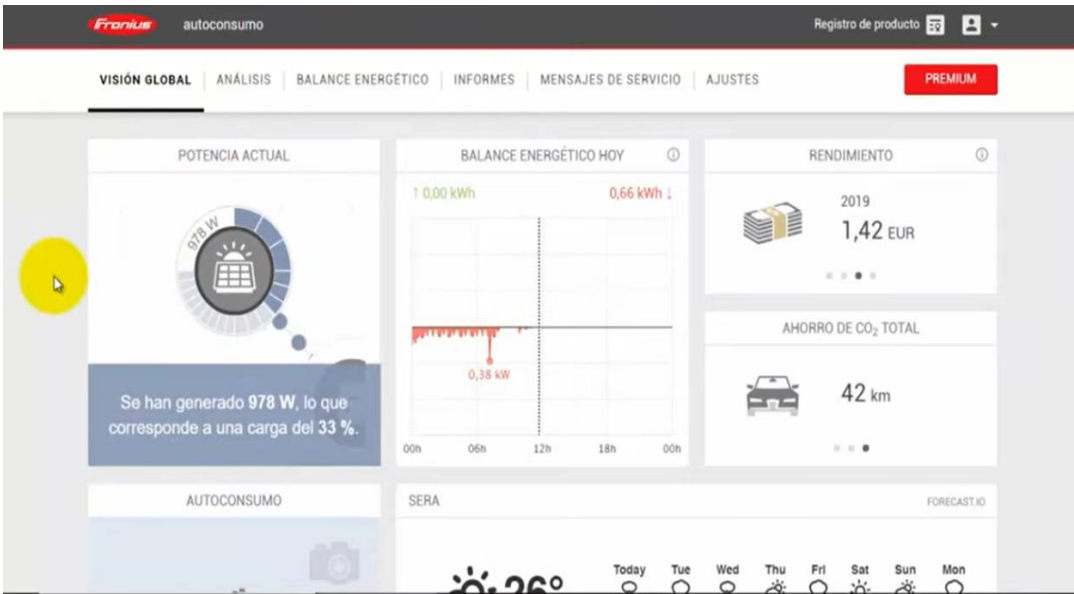
superior se encuentran disponibles los menús y herramientas necesarios para navegar por el sistema y obtener información relevante sobre el estado de la planta fotovoltaica.



Fuente: PDF Captura propia, plataforma Fronius Solar.web.

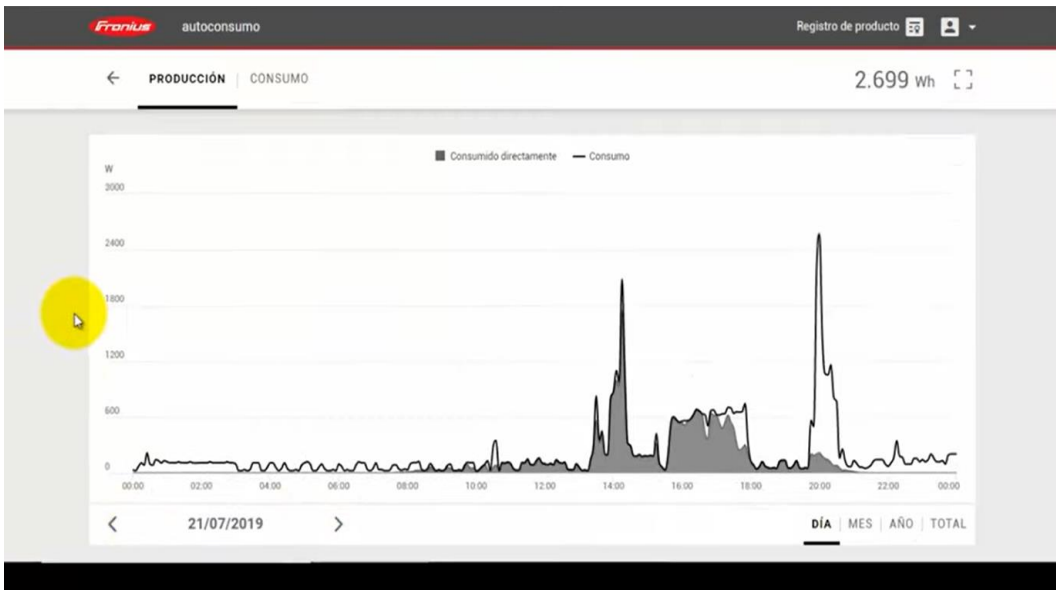
Figuras 3-11 Pantalla principal de la plataforma Fronius Solar.web.

Actualmente, dado que la instalación aún no se encuentra conectada en estado de generación ni consumo dentro de la plataforma, la Figura 3-12 presenta un ejemplo referencial de los parámetros operativos que entrega Solar.web en instalaciones activas, tomado del manual de puesta en marcha del sistema de monitoreo. En esta imagen se observa una potencia generada de 978 W, correspondiente a un 33% de carga, junto con información de rendimiento económico y ahorro de CO₂. Es importante señalar que estos datos permiten a los usuarios y operadores analizar de forma rápida el estado de producción energética de la planta, verificar su correcto funcionamiento diario y detectar posibles anomalías en la generación. Además, la visualización de estos parámetros facilita la planificación de mantenimientos predictivos y la elaboración de reportes operativos para la gestión técnica de la instalación. La Figura 3-13 muestra, de manera también referencial, un ejemplo de los gráficos de generación y consumo que estarán disponibles una vez la planta inicie su operación, permitiendo un análisis detallado del desempeño energético diario y la evaluación comparativa entre días, semanas o meses de operación.



Fuente: PDF Puesta en marcha del sistema de monitoreo.

Figuras 3-12 Ejemplo de parámetros mostrados en la plataforma Fronius Solar.web.



Fuente: PDF Puesta en marcha del sistema de monitoreo.

Figuras 3-13 Ejemplo de gráficos entregados por Fronius Solar.web.

3.7 COSTOS DEL PROYECTO.

Otra parte relevante dentro de la ingeniería básica de un proyecto es la valorización de los costos involucrados, considerando los equipos, tareas, actividades y el tiempo destinado al diseño, desarrollo e implementación. Para asignar un valor económico a estas actividades se utiliza el concepto de “horas hombre” (HH).

En este proyecto, los costos se detallan y diferencian en dos grandes categorías: por un lado, los costos materiales, que corresponden a la adquisición de equipos, accesorios y componentes necesarios para la implementación del sistema de monitoreo; y por otro, los costos de gestión, que incluyen las HH asociadas a actividades de diseño, implementación y configuración, entre otras. Ambas categorías se presentan en tablas específicas dentro de esta sección, permitiendo tener claridad respecto a la inversión total requerida para la ejecución del proyecto.

3.7.1 Costos hora hombre:

El costo de las horas hombre se refiere al tiempo dedicado por los profesionales, técnicos o encargados en la ejecución de un proyecto. Para este caso, se han diferenciado las actividades de planificación y desarrollo, asignándoles un período específico y un valor unitario de 0,75 UF por hora, que es el valor medio cobrado para profesionales de este tipo en proyectos de implementación y configuración de sistemas eléctricos y de automatización. Este valor se calcula utilizando la UF vigente el 1 de enero de 2025. Cabe destacar que las tablas a continuación presentan los valores en pesos chilenos (CLP) para facilitar su comprensión.

El proyecto está programado para una duración de tres semanas, con jornadas laborales de lunes a viernes de aproximadamente cinco horas diarias. En la Tabla 3-2 se detalla la distribución de las horas hombre entre las actividades de planificación y desarrollo durante cada semana. Durante la primera semana, se asignará un profesional para llevar a cabo la configuración de los inversores, la asignación de IP fijas y la configuración del switch de salida a Internet. En las semanas dos y tres, se contará con dos profesionales para ejecutar el cableado de la red, tanto del bus de anillo como de la red Ethernet

Tabla 3-2Distribución de las HH

Tiempo	HH planificación	HH desarrollo
Semana 1	10	0
Semana 2	10	40
Semana 3	10	40
Total	30	80

Fuente: Elaboración propia Excel. Distribución de las HH.

Para ejecutar el proyecto del sistema de monitoreo de la planta fotovoltaica (PFV), se requerirán 30 horas de planificación y 80 horas de desarrollo, con un total de 110 horas hombre, a las cuales se les asignara un valor monetario por cada hora igual a 0.75 UF. En la tabla 3-3 se detalla e indican los valores que tendrán las HH requeridas por el proyecto.

Tabla 3-3 Valores HH por etapa del proyecto.

Tiempo	Valor (UF)	Costo planificación (CLP)	Costo desarrollo (CLP)
Semana 1	0,75	\$ 288.144	\$ -
Semana 2	0,75	\$ 288.144	\$ 1.152.575
Semana 3	0,75	\$ 288.144	\$ 1.152.575
Total		\$ 864.431	\$ 2.305.150

Fuente: Elaboración propia Excel. Valores de las HH.

A continuación, la Tabla 3-4 presenta los costos totales asociados a las horas hombre requeridas para la ejecución e implementación del sistema de monitoreo, considerando tanto las horas de planificación como de desarrollo. Además, se considerará un porcentaje adicional en caso de imprevistos que puedan demorar y retrasar el cumplimiento de los plazos que corresponda a un 15% del valor de los costos de tiempo en el cronograma.

Tabla 3-4 Valores totales de las HH.

Costo planificación	\$	864.431
Costo desarrollo	\$	2.305.150
Total bruto	\$	3.169.582
Sobretiempo (15%)	\$	475.437
Total neto	\$	3.645.019

Fuente: Elaboración propia Excel. Costo total de las HH.

3.7.2 Costos materiales:

El costo de materiales se refiere a la valorización de los equipos y componentes esenciales para la implementación del sistema de monitoreo en la planta fotovoltaica (PFV). Estos materiales han sido seleccionados con base en los estándares técnicos vigentes para instalaciones fotovoltaicas y cumplen con las normativas de fabricación aplicables. Para calcular el costo total, se realiza una cubicación que implica proyectar la cantidad necesaria de unidades para cada componente. Este cálculo permite determinar el valor final, considerando tanto la calidad de los materiales como los precios competitivos ofrecidos por los proveedores. En la Tabla 3-5 se detallan los materiales, las cantidades necesarias y los proveedores seleccionados, garantizando que todos los elementos sean apropiados para el proyecto.

Tabla 3-5 Cubicación de materiales.

Material	Detalle	Proveedor	Cantidad	Precio unitario	Precio total
Cable STP Cat.6	Red RS-422	www.comdiel.cl	350 mts	\$ 1.043	\$ 420.329
Cable STP Cat.6	Red Ethernet	www.comdiel.cl	80 mts	\$ 1.043	\$ 95.956
Conector RJ45 STP/Cat.6	Conectores inversores IN-OUT	www.comdiel.cl	100 unidades	\$ 2.118	\$ 211.800
Fronius Datamanager 2.0	Tarjeta comunicación inversor	www.tritec-intervento.cl	1 unidad	\$ 234.892	\$ 234.892
Monitor ASUS 24", FHD, 100Hz,	Pantallas estación de trabajo	www.pcfactory.cl	2 unidades	\$ 94.990	\$ 189.980
LenovoDesktop ThinkCentre neo 50s	Computador de escritorio	www.pcfactory.cl	1 unidad	\$ 1.049.900	\$ 1.049.900
Repetidor RS-422	Refuerzo de señal red RS-422	www.zonaindustrial.cl	1 unidad	\$ 120.000	\$ 120.000
				Total	\$ 2.322.857

Fuente: Elaboración propia Excel. Costo de los materiales.

El costo de los materiales ya incluye el impuesto de valor agregado (IVA), ya que se considera en el precio de compra a los proveedores. Esto permite determinar de forma más precisa el valor total de la cubicación de materiales. Adicionalmente, se ha incorporado un porcentaje de imprevistos del 15%, contemplado para cubrir cualquier eventualidad o gasto adicional que pueda surgir durante el desarrollo del proyecto, asegurando que los costos finales no se vean afectados por posibles inconvenientes imprevistos. Los detalles completos del costo total de los materiales, incluidos los imprevistos, se muestran en la Tabla 3-6.

Tabla 3-6 Costo total de los materiales.

Total materiales	\$2.322.857
Imprevisto (15%)	\$ 348.429
Total bruto	\$2.671.286

Fuente: Elaboración propia Excel. Costo de los materiales.

3.7.3 Costos totales del proyecto:

El costo total del proyecto se obtiene sumando los costos de las horas hombre (HH) y los materiales, considerando también el valor adicional asociado a imprevistos que puedan surgir durante la ejecución. En la Tabla 3-7 se presentan los costos detallados, y el total definitivo del proyecto está reflejado.

Tabla 3-7 Costo total del proyecto.

Costos HH del proyecto	\$3.645.019
Costos materiales del proyecto	\$2.671.286
Total bruto del proyecto	\$6.316.304

Fuente: Elaboración propia Excel. Costo de los materiales.

El total de los costos del proyecto, considerando todo lo mencionado anteriormente, es de \$6.316.304 CLP. Al convertir este monto a UF, utilizando el valor de la UF correspondiente al 1 de enero de 2025 (\$38.419,17 CLP), el Costo Total del Proyecto es de aproximadamente 164,5 UF.

3.8 EVALUACIÓN ECONÓMICA DEL PROYECTO.

La evaluación económica es fundamental para determinar la viabilidad de un sistema fotovoltaico. Este análisis examina el impacto técnico-económico de implementar un sistema de monitoreo en la planta solar ubicada en la sede José Miguel Carrera de la UTFSM, enfocándose en su efecto en la eficiencia y la confiabilidad operativa del sistema.

La planta tiene una potencia instalada de 506 kWp, lo que representa el 80 % de la carga total estimada de la sede, con un consumo eléctrico mensual promedio de 80.000 kWh. Está conectada al Sistema Eléctrico Nacional (SEN) desde el 31 de marzo de 2020. Se asume una generación diaria promedio de 6 horas pico, lo que equivale a 2.190 horas operativas anuales.

Se comparan dos escenarios: uno sin monitoreo y otro con la implementación de la plataforma Fronius Solar Web, que supervisa el desempeño del sistema, generando informes periódicos, alarmas y recomendaciones para realizar mantenimiento preventivo. La implementación del monitoreo permite identificar y corregir problemas como suciedad, sombras o fallas no detectadas, lo que mejora la eficiencia operativa.

En ambos escenarios, se calculan los costos de no generación, es decir, la energía no producida debido a la pérdida de eficiencia o fallas operacionales, multiplicada por la diferencia entre el costo del kWh comprado de la red (Chilquinta) y el generado por la planta fotovoltaica. Para este análisis, se utiliza un costo de \$120/kWh para la energía de la red y de \$95/kWh para la generada internamente.

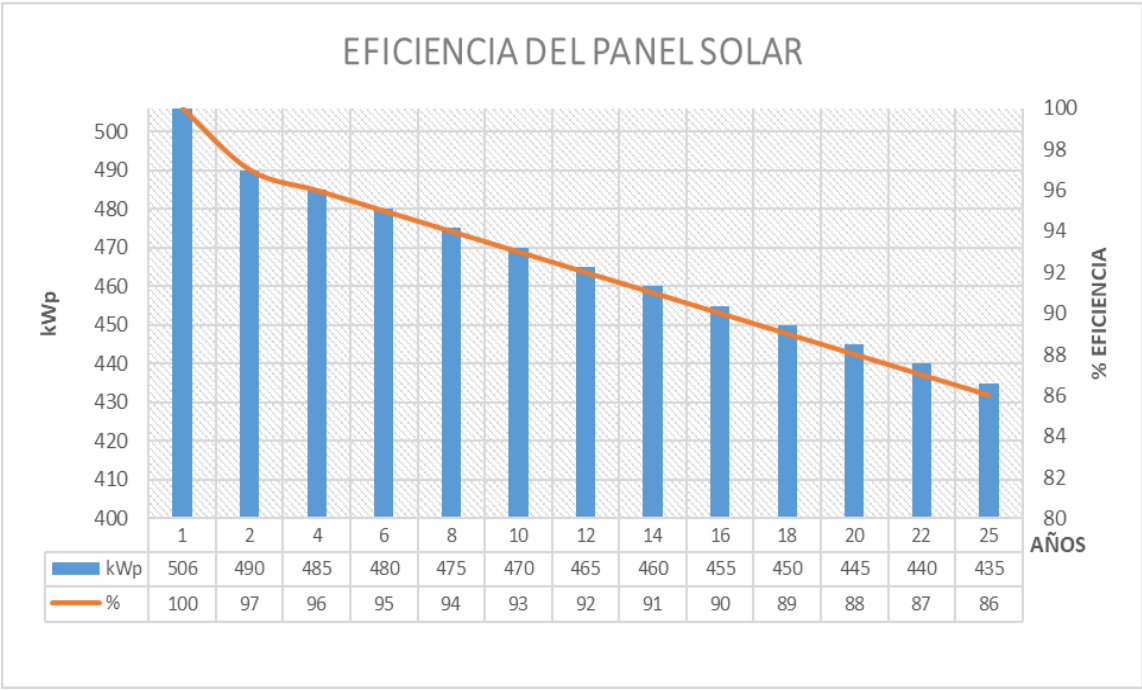
Este análisis permite cuantificar el impacto económico de la degradación progresiva de los módulos solares y las fallas operacionales, considerando el efecto positivo del monitoreo. Los resultados proyectan los ahorros acumulados a lo largo de la vida útil del sistema y estiman el retorno de inversión (ROI) asociado a la implementación de la plataforma de monitoreo, mejorando la sustentabilidad, confiabilidad y eficiencia global del sistema fotovoltaico.

3.8.1 Análisis al rendimiento del panel:

En este análisis, se evalúa cómo la implementación del sistema de monitoreo y visualización de la planta fotovoltaica (PFV) impacta en la eficiencia y el rendimiento de los paneles solares a lo largo del tiempo. Los paneles solares tienen una vida útil óptima de 20 años, después de los cuales su eficiencia generalmente cae por debajo del 80%, lo que podría comprometer el desempeño del sistema. Sin embargo, las celdas solares Panasonic HIT ofrecen una vida útil de 25 años, con una eficiencia mínima garantizada de 86% durante este periodo, tal como se especifica en el Anexo I, donde se presenta un extracto del datasheet oficial del fabricante.

El sistema de monitoreo no tiene un impacto directo sobre la eficiencia del panel, pero la plataforma Fronius Solar Web proporciona informes periódicos que permiten mantener el sistema en su punto de máxima potencia (MPP). Estos informes ofrecen datos detallados y recomendaciones para optimizar la operación del sistema, tales como la limpieza de paneles, la corrección de sombras y otros factores que puedan reducir el rendimiento. De esta manera, el monitoreo contribuye indirectamente a maximizar la eficiencia y prolongar la vida útil de los paneles solares.

La eficiencia del panel a lo largo del tiempo se presenta en la Figura 3-14, que muestra la proyección de la caída de eficiencia conforme transcurre el tiempo. La gráfica se basa en los datos proporcionados por el fabricante y en las condiciones operativas del sistema, reflejando la disminución gradual de la potencia generada debido a la degradación natural de los paneles solares. Esta proyección permite prever la eficiencia del sistema durante los primeros 25 años de operación, considerando tanto las condiciones ambientales como el efecto del monitoreo en la optimización del rendimiento.



Fuente: Elaboración propia Excel. Análisis económico

Figuras 3-14 Grafico de eficacia del panel sin monitoreo.

Para calcular los costos de no generación y otros parámetros económicos asociados al funcionamiento de la planta fotovoltaica, se utilizan ciertos valores auxiliares que se detallan en la Tabla 3-8. Estos valores incluyen el precio del kWh de energía comprada a la compañía distribuidora (Chilquinta) y el precio del kWh generado por la planta fotovoltaica (PFV). Además, se considera el total de horas operativas anuales de la planta fotovoltaica, estimado en 2.190 horas al año, lo que permite proyectar los costos de no generación y calcular las pérdidas económicas derivadas de la reducción en la eficiencia del sistema

Tabla 3-8 Valores auxiliares

Precio kWh Compañía	\$	120
Precio kWh PFV	\$	95
Horas operativas al año		2190

Fuente: Elaboración propia Excel. Análisis económico

La implementación de un plan de mantenimiento preventivo y un sistema de análisis de datos, como el proporcionado por Fronius Solar Web, tiene un impacto significativo en el rendimiento de la planta fotovoltaica. Las instalaciones fotovoltaicas

que cuentan con monitoreo continuo y mantenimiento preventivo han demostrado una mejora en la eficiencia entre un 7 y 10% en comparación con aquellas que no implementan estos procesos. En el caso de la planta de la sede José Miguel Carrera, esta mejora en la eficiencia podría traducirse en un aumento significativo en la producción de energía, lo que se refleja en mayores ahorros y una recuperación más rápida de la inversión.

Adicionalmente, las plataformas de monitoreo, como Fronius Solar Web, permiten identificar pérdidas de energía debido a factores como suciedad, sombras o fallas en componentes antes de que se conviertan en problemas mayores. Este enfoque proactivo de monitoreo y mantenimiento contribuye a una reducción de los costos de no generación y una optimización del rendimiento del sistema. De esta manera, el sistema fotovoltaico puede operar con mayor eficiencia, prolongando su vida útil y asegurando que la inversión inicial se recupere en un tiempo más corto, al tiempo que se maximizan los beneficios económicos a lo largo de los años.

El monitoreo del sistema de generación no influye directamente en la eficiencia de los paneles, pero permite identificar problemas de manera temprana, lo que facilita la aplicación de medidas correctivas necesarias para mantener el sistema funcionando de manera óptima.

De acuerdo con los informes generados por Fronius, un plan de mantenimiento adecuado basado en estas recomendaciones mantiene el rendimiento real del panel solar cercano al 97% durante los primeros 2 a 6 años de operación. A partir de este periodo, la eficiencia comenzará a disminuir de forma progresiva debido al envejecimiento natural del sistema, con una caída estimada del 1% cada cuatro años. Estos datos se derivan de la experiencia de proyectos similares y de las directrices del fabricante.

El análisis económico se centra en los costos de no generación. Este concepto hace referencia a la energía no generada debido a la caída de eficiencia en los paneles solares. Para ilustrar este impacto económico, en la Tabla 3-9 se presentan los cálculos correspondientes a los costos de no generación, tanto para el sistema sin monitoreo como para el sistema con monitoreo implementado. Los cálculos se basan en la potencia no generada y en el promedio anual de horas operativas, lo que permite estimar el valor de la energía perdida durante el año.

Tabla 3-9 Costos de no generación sin monitoreo

Años	% eficiencia	kWp	kWp pérdidas	kWh/año	kWh/mes	Costo pérdidas/año	Costos Pérdidas/mes
2	97	490	16	35040	2920	\$ 3.328.800	\$ 277.400
4	96	485	21	45990	3832,5	\$ 4.369.050	\$ 364.088
6	95	480	26	56940	4745	\$ 5.409.300	\$ 450.775
8	94	475	31	67890	5657,5	\$ 6.449.550	\$ 537.463
10	93	470	36	78840	6570	\$ 7.489.800	\$ 624.150
12	92	465	41	89790	7482,5	\$ 8.530.050	\$ 710.838
14	91	460	46	100740	8395	\$ 9.570.300	\$ 797.525
16	90	455	51	111690	9307,5	\$ 10.610.550	\$ 884.213
18	89	450	56	122640	10220	\$ 11.650.800	\$ 970.900
20	88	445	61	133590	11132,5	\$ 12.691.050	\$ 1.057.588
22	87	440	66	144540	12045	\$ 13.731.300	\$ 1.144.275
24	86	435	71	155490	12957,5	\$ 14.771.550	\$ 1.230.963
26	85	430	76	166440	13870	\$ 15.811.800	\$ 1.317.650
					Total	\$ 121.085.100	\$ 10.090.425

Fuente: Elaboración propia Excel. Análisis económico.

Por otro lado, la Tabla 3-10 muestra el cálculo del costo de no generación para la planta fotovoltaica (PVF) con la implementación del sistema de monitoreo. En este caso, el monitoreo proactivo, proporcionado por la plataforma Fronius Solar Web, permite identificar problemas de manera temprana, como sombras, suciedad o fallas en los componentes, lo que resulta en una reducción de los costos de no generación. El monitoreo ayuda a mantener el sistema cercano a su punto de máxima potencia (MPP), optimizando su rendimiento y reduciendo las pérdidas de energía.

Tabla 3-10 Costos de no generación con monitoreo.

Años	% eficiencia	kWp	kWp pérdidas	kWh/año	kWh/mes	Costo pérdidas/año	Costos pérdidas/mes
2	97	490	16	35040	2920	\$ 3.328.800	\$ 277.400
4	97	490	16	35040	2920	\$ 3.328.800	\$ 277.400
6	96	485	21	45990	3832,5	\$ 4.369.050	\$ 364.088
8	96	485	21	45990	3832,5	\$ 4.369.050	\$ 364.088
10	95	480	26	56940	4745	\$ 5.409.300	\$ 450.775
12	95	480	26	56940	4745	\$ 5.409.300	\$ 450.775
14	94	475	31	67890	5657,5	\$ 6.449.550	\$ 537.463
16	94	475	31	67890	5657,5	\$ 6.449.550	\$ 537.463
18	93	470	36	78840	6570	\$ 7.489.800	\$ 624.150
20	93	470	36	78840	6570	\$ 7.489.800	\$ 624.150
22	92	465	41	89790	7482,5	\$ 8.530.050	\$ 710.838
24	92	465	41	89790	7482,5	\$ 8.530.050	\$ 710.838
26	91	460	46	100740	8395	\$ 9.570.300	\$ 797.525
					TOTAL	\$ 77.394.600	\$ 6.449.550

Fuente: Elaboración propia Excel. Análisis económico.

Por otro lado, una vez que se ha puesto en marcha el sistema de monitoreo y se han implementado las recomendaciones y mejoras proporcionadas por Fronius, se proyecta un ahorro significativo en los costos de energía perdida. La Tabla 3-11 detalla los cálculos y el ahorro proyectado que se puede obtener con la implementación del sistema de monitoreo. De los datos presentados, lo más relevante es la gran disminución en los costos de no generación una vez que el monitoreo esté en funcionamiento. Este análisis se centra en los “costos de pérdidas/año” y sus totales, mostrando cómo el monitoreo contribuye a reducir las pérdidas de energía provocadas por factores como suciedad, sombras y fallas operacionales, lo que a su vez optimiza el rendimiento del sistema fotovoltaico. Esta optimización permite no solo una mayor eficiencia en la generación de energía, sino también una recuperación más rápida de la inversión inicial, generando ahorros acumulados a lo largo de la vida útil de la planta fotovoltaica.

Tabla 3-11 Análisis de la proyección de ahorros por monitoreo

Total costos de no generación sin monitoreo	\$ 121.085.100
Total costos de no generación con monitoreo	\$ 77.394.600
Ahorro en los 26 años proyectados	\$ 43.690.500

Fuente: Elaboración propia Excel. Análisis económico.

Se puede observar según lo proyectado, de los aproximadamente 121 millones de pesos que se perderán por el concepto de no generación estos se disminuyen un 36% del total en el caso que se implemente la monitorización y visualización de la PFV.

3.8.2 Análisis a la tasa de fallas de la PFV:

Este análisis técnico-económico estudia la tasa de fallas del sistema de generación fotovoltaico, Una falla es un evento que cambia el estado de un producto de operacional a no operacional. En este sentido la Tasa de Falla (TF) puede ser expresada tanto como un porcentaje de fallas sobre el total de productos examinados o en servicio (en términos relativos), o también como un número de fallas observadas en un tiempo de operación (en este caso en términos nominales). A continuación, en la Figura 3-15, se presenta la fórmula del cálculo para la tasa de falla

$$TASA\ DE\ FALLA = \frac{NÚMERO\ DE\ FALLAS}{TIEMPO\ TOTAL\ OPERATIVO - TIEMPO\ DE\ NO\ FUNCIONAMIENTO}$$

Fuente: www.gestiondeoperaciones.net/tasa.de.falla.

Figuras 3-15 Formula tasa de falla.

El supuesto o hipótesis que se plantea en este estudio económico es considerar que existe un porcentaje definido de falla de la instalación, estas fallas anuales tienen impacto económico en la rentabilidad de la instalación pues cada hora de no funcionamiento de la PFV es una hora de consumo a la energía de la compañía eléctrica, debido a esto habrá una incrementación en el valor unitario del kilowatts/hora por lo que el ideal es mantener este porcentaje en un valor mínimo o el más bajo que se pueda para obtener el ahorro de adquirir la energía eléctrica desde la PFV y no de la compañía. Con esto se puede decir que aplicando la formula anterior y con los parámetros que ya se tiene de la instalación obtener el número de fallas no tiene mayor dificultad, se puede conocer el tiempo total del funcionamiento y calculando a cuánto tiempo equivale el porcentaje de cada caso, como se detalla en la Tabla 3-12.

Tabla 3-12 Tasa de falla supuestos.

Tasa de falla	Tiempo de no disponibilidad	Tiempo total operativo (hrs)	Número de fallas
5%	110	2190	104
4%	88	2190	84
3%	66	2190	64
2%	44	2190	43
1%	22	2190	22

Fuente: Elaboración propia Excel. Análisis económico.

A continuación, se presenta la Tabla 3-13, que muestra cinco casos distintos de porcentajes de tasa de falla de la instalación. Con esto se pretende estudiar cómo afecta la implementación del monitoreo a la confiabilidad y disponibilidad de la PFV

Tabla 3-13 Análisis de tasa de fallas.

Tasa de falla	Horas disponibilidad	Horas de no disponibilidad	Energía perdida por falla anual (kWh)	Costo energia de red	Costo energía PFV	Ahorro anual
5%	2081	110	23571	\$ 2.828.520	\$ 2.239.245	\$ 589.275
4%	2102	88	18857	\$ 2.262.840	\$ 1.791.415	\$ 471.425
3%	2124	66	14143	\$ 1.697.160	\$ 1.343.585	\$ 353.575
2%	2146	44	9429	\$ 1.131.480	\$ 895.755	\$ 235.725
1%	2168	22	4714	\$ 565.680	\$ 447.830	\$ 117.850

Fuente: Elaboración propia Excel. Análisis económico.

En la tabla 3-14 se observan los valores que permiten establecer un análisis y estudio económico en función a las pérdidas que se tendrán por los distintos porcentajes de fallas que se pueden presentar en la PFV, los “costos de energía de la red” y los “costos de energía de la PFV” no son otra cosa que el producto de la energía perdida o no generada por fallas anuales que se pueden dar en el sistema y el costo del kilowatt/hora establecidos para la red y para la generación solar. El valor más relevante de la tabla se puede considerar el “ahorro anual” que es la diferencia de costo entre comprar energía a la compañía distribuidora en vez de la energía generada por la PFV.

Tabla 3-14 Casos de disminución en la tasa de falla.

Tasa de falla	Ahorro precio compañía	Ahorro precio PFV
DE 5% A 4%	\$ 565.680	\$ 447.830
DE 5% A 3%	\$ 1.131.360	\$ 895.660
DE 5% A 2%	\$ 1.697.040	\$ 1.343.490
DE 5% A 1%	\$ 2.262.840	\$ 1.791.415

Fuente: Elaboración propia Excel. Análisis económico.

3.8.3 Análisis del Retorno sobre la Inversión (ROI)

El Retorno sobre la Inversión (ROI) es un indicador financiero clave utilizado para evaluar la rentabilidad de una inversión a lo largo del tiempo. Este análisis permite calcular el beneficio neto obtenido con respecto a la inversión inicial y determina la viabilidad económica del sistema fotovoltaico. El ROI se calcula comparando el ahorro generado por la planta fotovoltaica debido a la reducción de los costos de generación, con los costos asociados al mantenimiento del sistema. Este cálculo es crucial para medir el impacto financiero del proyecto a largo plazo.

$$ROI = \frac{(\text{Ahorro anual proyectado} - \text{Costo de mantenimiento})}{\text{Inversión inicial}} \times 100$$

Fuente: www.globaliting.com/rOi.

Figuras 3-16 Formula ROI.

Para este análisis, se utilizaron los siguientes valores:

Inversión inicial: 164,5 UF, equivalente a 6.316.304 CLP.

Ahorro anual proyectado debido a la reducción de costos de generación: 1.680.423 CLP que se obtiene de la Tabla 3-11 Análisis de la proyección de ahorros por monitoreo
Costo de mantenimiento anual: 126.326 CLP, lo que representa aproximadamente el 2% de la inversión inicial, cubriendo los costos de operación y mantenimiento preventivo del sistema fotovoltaico.

$$\frac{(1.680.423 - 126.326)}{6.316.304} * 100$$

Fuente: Elaboración propia Word. Análisis económico.

Figuras 3-17 Análisis ROI.

Este ROI del 24.6% anual indica que, por cada unidad de inversión realizada, se obtiene un beneficio neto del 24.6% al año. Esto refleja la rentabilidad del proyecto, mostrando que, por cada peso invertido en el sistema fotovoltaico, se obtiene un ahorro significativo, generando un retorno financiero importante en un corto período.

Además del ROI, es relevante considerar el período de recuperación de la inversión, que es un indicador que refleja el tiempo necesario para recuperar la inversión inicial a través de los ahorros generados por el proyecto. Para calcular este período, se toma en cuenta la inversión inicial del sistema fotovoltaico, que en este caso es de 6.316.304. CLP. Además, se considera el ahorro neto anual generado por el sistema debido a la reducción de los costos de generación de electricidad, el cual es 1.554.025 CLP. Para obtener el periodo de recuperación, simplemente se divide la inversión inicial entre el ahorro neto anual. Esto significa que, en un período aproximado de 4,1 años, los ahorros generados por la reducción de los costos de energía cubrirán por completo el valor invertido en la instalación del sistema de monitoreo, convirtiendo al proyecto en rentable en este lapso. Este corto tiempo de recuperación resalta la viabilidad financiera del proyecto y la rapidez con que los beneficios empiezan a superarlo.

También, se realiza un análisis de flujo de caja proyectado, el cual se incluye para visualizar de manera más clara cómo los ahorros anuales y los costos operativos (mantenimiento anual) se distribuyen a lo largo del tiempo. Para este análisis, se considera lo siguiente:

- Los ahorros anuales se obtienen a partir de la energía no comprada debido a la eficiencia del sistema fotovoltaico.
- Los costos de mantenimiento incluyen todos los gastos operativos anuales relacionados con el sistema.

En la Tabla 3-15 se presenta un flujo de caja proyectado para los primeros años, reflejando los ahorros y costos asociados:

Tabla 3-15 Análisis de los flujos de caja proyectados.

Año	Ahorro Anual	Costo de Mantenimiento	Ahorro Neto	Flujo de Caja Acumulado
1	\$ 1.680.423	\$ 126.326	\$ 1.554.025	\$ 1.554.025
2	\$ 1.680.423	\$ 126.326	\$ 1.554.025	\$ 3.108.050
3	\$ 1.680.423	\$ 126.326	\$ 1.554.025	\$ 4.662.075
4	\$ 1.680.423	\$ 126.326	\$ 1.554.025	\$ 6.216.100

Fuente: Elaboración propia Excel. Análisis económico.

El análisis del flujo de caja proyectado muestra de manera clara cómo los ahorros anuales generados por la planta fotovoltaica contribuyen a la recuperación de la inversión. Los ahorros netos generados por la reducción de los costos de energía permiten recuperar la inversión inicial en aproximadamente 4.1 años, lo que resalta la viabilidad financiera

del proyecto. Además, el sistema de monitoreo y el mantenimiento preventivo desempeñan un papel clave en la optimización de los ahorros anuales, asegurando que el proyecto sea rentable a corto y largo plazo.

El flujo de caja acumulado muestra cómo el proyecto se convierte en rentable después de este período de recuperación y continúa generando beneficios económicos a lo largo de su vida útil. Este análisis confirma que el proyecto fotovoltaico es sostenible y rentable, destacando la importancia del monitoreo constante y el mantenimiento preventivo para maximizar los beneficios financieros y operativos del sistema.

CONCLUSIONES

Las conclusiones derivadas del diseño, estudio y desarrollo del proyecto de implementación del sistema de monitoreo y visualización de la planta fotovoltaica mediante la plataforma Fronius Solar Web en la sede de Viña del Mar de la Universidad Técnica Federico Santa María son altamente positivas. Los objetivos planteados fueron alcanzados con éxito, y las condiciones de campo fueron favorables, facilitando el acceso a los equipos inversores y sus componentes.

Inicialmente, la planta fotovoltaica (PFV) no estaba operativa, pero actualmente ya se encuentra conectada y funcionando, lo que ha permitido superar el desafío técnico y económico de la no generación. Aunque la instalación estuvo expuesta a condiciones climáticas, ahora genera energía de manera eficiente.

La solución propuesta, basada en la tarjeta Datamanager 2.0 de Fronius, recibió una evaluación positiva, ya que no requirió modificaciones significativas en los equipos. El cableado y la conexión del string de comunicación fueron simples y efectivos, facilitando la implementación del proyecto.

En cuanto a la plataforma de visualización, se comprobó que el proveedor mantiene un monitoreo constante y realiza revisiones periódicas para satisfacer las necesidades de los usuarios. Esto contribuye a la confiabilidad y sostenibilidad del sistema a largo plazo.

El análisis económico realizado, aunque basado en casos hipotéticos debido a la no disponibilidad inicial de la planta, arrojó resultados favorables. La recuperación de la inversión se proyecta en menos de 4.1 años, lo que demuestra la viabilidad del proyecto, además de los beneficios derivados de la eficiencia energética y la optimización de la vida útil de los paneles fotovoltaicos.

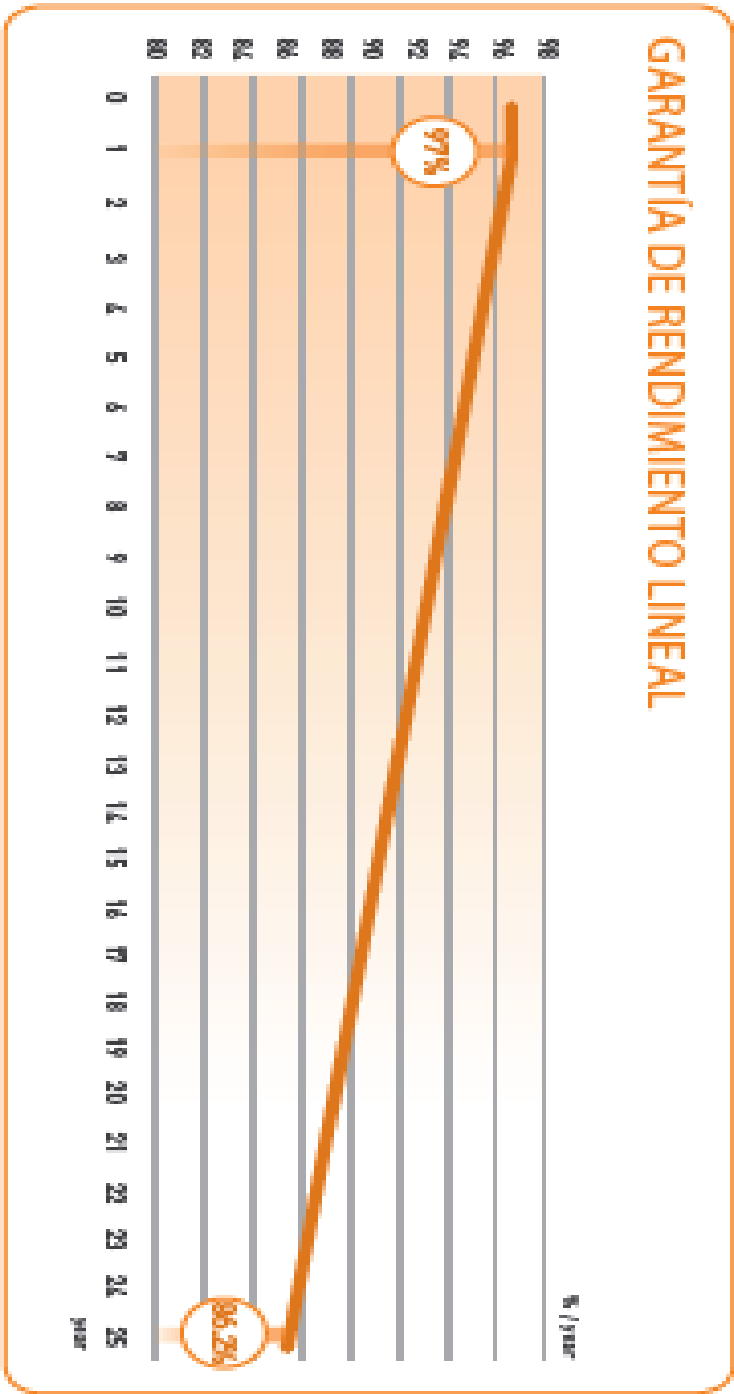
En conclusión, la implementación del sistema de monitoreo y visualización es totalmente viable y oportuna. El proyecto ha cumplido con los objetivos técnicos y económicos planteados, y no debe alejarse de los estudios realizados, asegurando su éxito y sostenibilidad en el futuro cercano.

BIBLIOGRAFÍA

- 1) Características del cableado de red Fronius. www.reitchel.com
- 2) Características y funcionamiento Protocolo Modbus. www.logicbus.com
- 3) Datos técnicos equipos inversores, www.fronius.com
- 4) Datos técnicos paneles solares. www.Panasonic.com
- 5) Etapas y concepto de la Ingeniería básica. www.ingenieriablog.com
- 6) Protocolos de comunicación según capas. www.tecno.com
- 7) Plataforma de monitoreo Fronius. www.Solarweb.com

ANEXOS

Anexo I: Garantía de rendimiento lineal panel solar



Fuente: PDF Datasheet Panasonic HIT

Anexo I-1 Garantía del rendimiento de los paneles solares Panasonic HIT 325 W