

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

**DISEÑO DE EXTENSIÓN INALÁMBRICA PARA UN SISTEMA DE
MONITOREO Y CONTROL DE GRANJA SOLAR**

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

Alumno:

Anibal Pablo Solar Olivares

Profesor Guía:

Mag. Víctor Cárdenas Schweiger

RESUMEN

KEYWORDS: Monitoreo, Fotovoltaico, RTU, LoRa

El presente trabajo de título tiene como objetivo principal diseñar una extensión inalámbrica para el sistema de comunicación entre un inversor fotovoltaico y su Smart Meter, en un caso práctico donde ambos dispositivos se encuentran a una distancia mayor a 430 metros.

Inicialmente, se analizan las tecnologías asociadas a los inversores fotovoltaicos y las opciones de comunicación disponibles. Se realiza una comparación técnica y económica de distintas alternativas, para posteriormente implementar en una instalación fotovoltaica real, contrastándola con una simulación en laboratorio.

Finalmente, se evalúan los resultados obtenidos en ambas condiciones, identificando limitaciones y oportunidades de mejora.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN.....1

CAPÍTULO 1: ANTECEDENTES GENERALES 2

1 ANTECEDENTES GENERALES.....3

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....3

1.2 SOLUCIÓN DEL PROBLEMA 4

1.2.1 Requerimientos 4

1.2.2 Formas de conexión y transmisión de datos 7

1.2.3 Conexión entre Inversor y Smart meter 10

1.3 INSTALACIÓN EXISTENTE COMO BASE DE ESTUDIO 12

1.3.1 Comunidad de agrícola de regantes 12

1.3.2 Proyecto Fotovoltaico 13

1.3.3 Alternativas de posibles soluciones 14

1.3.4 Evaluación de las alternativas de solución 17

1.3.5 Descripción de la solución seleccionada.....18

1.4 SOFTWARES UTILIZADOS.....21

1.4.1 USR LoRa SET 21

1.4.2 Modbus Poll 22

1.4.3 AT Setup 22

1.5 OBJETIVOS DEL PROYECTO 23

1.5.1 Objetivo General 23

1.5.2 Objetivos Específicos.....23

CAPÍTULO 2: DESARROLLO DE LA SOLUCIÓN 24

2 DESARROLLO DE LA SOLUCIÓN 25

2.1 EXPLICACIÓN DEL CASO A SOLUCIONAR 25

2.1.1 Diseño de la solución 26

2.2 DESARROLLO DE LA SOLUCIÓN 32

2.2.1 Implementación de la solución.....32

CAPÍTULO 3: ANÁLISIS DE RESULTADOS.....39

3 ANÁLISIS DE RESULTADOS 40

3.1 PRUEBA EN LABORATORIO 40

3.1.1 Prueba N°1 42

3.1.2 Prueba N°2 43

3.1.3 Prueba N°3 44

3.1.4 Prueba N° 4 46

3.1.5 Prueba N°5 y adquisición de datos.....47

3.1.6 Prueba N° 6 50

3.2 RESUMEN DE PRUEBAS.....53

3.3 PROPUESTA DE SOLUCIÓN.....54

3.4 ANÁLISIS DE COSTOS 54

CONCLUSIONES.....57

BIBLIOGRAFÍA.....58

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1 Diagrama de Ishikawa	4
Figura 1-2 Esquema de conexión Manual Smart Meter 1.....	6
Figura 1-3 Esquema de conexión Manual Smart Meter 2.....	6
Figura 1-4 Esquema de conexión Manual Smart Meter 3	10
Figura 1-5 Esquema de conexión Manual Smart Meter 4.....	11
Figura 1-6 Conexión Datamanager	11
Figura 1-7 Plataforma de monitoreo Fronius Solar Web 1	12
Figura 1-8 Plataforma de monitoreo Fronius Solar Web 2	12
Figura 1-9 Vista aérea proyecto fotovoltaico	13
Figura 1-10 Distancia entre inversor y Smart Meter.....	13
Figura 1-11 Datamanager box 2.0.....	15
Figura 1-12 Módulo USR LG206	16
Figura 1-13 Pantalla inicial software USR LoRa SET.....	22
Figura 1-14 Pantalla de registro en Modbus Poll.....	22
Figura 2-1 Módulo USR-LG206.....	25
Figura 2-2 Esquema conexión modo transparente	27
Figura 2-3 Identificación de puerto COM.....	27
Figura 2-4 Software USR_LoRa 1	28
Figura 2-5 Software USR_LoRa 2	28
Figura 2-6 Software USR_LoRa 3.....	29
Figura 2-7 Software USR_LoRa 4.....	30
Figura 2-8 Análisis línea vista.....	30
Figura 2-9 Esquema explicativo Zona de Fresnel	31
Figura 2-10 Tablero eléctrico original Smart Meter	32
Figura 2-11 Tablero eléctrico original Fotovoltaiico	33
Figura 2-12 Módulo fuera del tablero Smart Meter	33
Figura 2-13 Extensión de conexión de comunicación Smart Meter	34
Figura 2-14 Obstáculos de vegetación	34
Figura 2-15 Extensión de conexión de comunicación	35
Figura 2-16 Módulo LoRa de Tablero FV	35
Figura 2-17 Antena en soporte estructura FV	36
Figura 2-18 Línea vista desde tablero FV	36
Figura 2-19 Respuesta detección monitoreo en prueba terreno	37
Figura 3-1 Módulos LoRa a 1 metro	42
Figura 3-2 Detección de Smart Meter en prueba 1	43
Figura 3-3 Lugar de instalación en prueba 2.....	43
Figura 3-4 Detección de Smart meter en prueba 2.....	44

Figura 3-5 Lugar de instalación en prueba 3.....44

Figura 3-6 Lugar de instalación en prueba 3.....45

Figura 3-7 Detección de Smart meter en prueba 3.....45

Figura 3-8 Antena omnidireccional 915Mhz para exterior.....46

Figura 3-9 Esquema distancia entre edificio C y X, en prueba N°4 46

Figura 3-10 Detección de Smart meter en prueba 4.....47

Figura 3-11 Instalación para prueba N° 5 48

Figura 3-12 Consumo eléctrico simulado para prueba N° 5.....48

Figura 3-13 Información en pantalla de Smart Meter 49

Figura 3-14 Adquisición de datos por Software Modbus Poll 50

Figura 3-15 Esquema distancia entre edificio M y R, en prueba N° 6.....50

Figura 3-16 Antena omnidireccional 915Mhz para exterior en prueba N°6 51

Figura 3-17 Software AT Setup Valores transmisión de datos 51

Figura 3-18 Software AT Setup Valores transmisión de datos 2 52

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1. Comparación protocolos Modbus 5

Tabla 1-2. Tipos de Cables CAT.....7

Tabla 1-3. Tabla de evaluación de soluciones.....18

Tabla 2-1. Parámetros Modulo USR-LG206 26

Tabla 2-2. Parámetros configuración Modulo USR-LG206 29

Tabla 2-3. Parámetros de cálculo Z.F 31

Tabla 2-4. Actividades de comisionamiento 37

Tabla 3-1. Detalle de componentes simulación laboratorio 41

Tabla 3-2 Registro de dirección Modbus 49

Tabla 3-3 Rangos SNR y RSSI 52

Tabla 3-4 Pruebas realizadas.....53

Tabla 3-5. Componentes para diseño de prototipo.....55

ÍNDICE DE GRAFICOS

Gráfico 1-1 Modulación por saltos de frecuencia FH 20

Gráfico 1-2 Modulación por secuencia directa DS 20

Gráfico 1-3 Modulación de espectro de propagación de “Chirp” (CSS) 21

SIGLAS Y SIMBOLOGÍA

A. SIGLAS

AT	:	Atención
CA	:	Corriente alterna.
CC	:	Corriente continua.
CAT	:	Categoría de cable de comunicación
CLP	:	Moneda de Chile
CGE	:	Compañía General de Electricidad
EIA	:	Alianza de Industrias Electrónicas
FV	:	Fotovoltaico
GND	:	Tierra
IEEE	:	Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos
IGBT	:	Transistor Bipolar de Puerta Aislada
INDAP	:	Instituto de Desarrollo Agropecuario
IoT	:	Internet de las Cosas
LAN	:	Red de área local
LoRa	:	Larga Distancia
MAN	:	Red de área metropolitana
SNR	:	Relación Señal/Ruido
OSI	:	Modelo de Interconexión de Sistemas Abiertos.
PLC	:	Controlador lógico programable
RTU	:	Unidad Terminal Remota
RSSI	:	Indicador de intensidad de señal recibida
SCADA	:	Control de Supervisión y Adquisición de Datos
TCP/IP	:	Protocolo de Control de Transmisión (TCP) / Protocolo de Internet (IP).
TIA	:	Asociación de la Industria de Telecomunicaciones
WAN	:	Red de área amplia
LPWAN	:	Red de área amplia de baja potencia

B. SIMBOLOGÍA

A	:	Amperios
bps	:	Bits por segundo
°C	:	Grados Celsius
dBm	:	decibelio-kilowatt
GHz	:	Gigahercios
Gb/s	:	Gigabytes por segundo
H	:	Hora
kW	:	Kilowatt
kWh	:	Kilowatt – Hora
kWp	:	Kilowatt – Peak
M	:	Metros
Mb/s	:	Megabytes por segundo
Mbps	:	Megabits por segundo
MHz	:	Megahercios
ms.n.m	:	Metros sobre el nivel del mar
RH	:	Humedad Relativa
Wp	:	Watt - Peak

INTRODUCCIÓN

Un problema cada vez más frecuente en las medianas empresas del sector de la energía fotovoltaica es la limitación en la distancia de comunicación entre un inversor fotovoltaico y su Smart Meter. Al utilizar una conexión alámbrica mediante un cable de par trenzado, la distancia máxima suele estar restringida a 100 metros, principalmente para minimizar interferencias, garantizar una transmisión de datos estable y mantenerse bajo recomendaciones del fabricante.

La comunicación en un sistema fotovoltaico permite visualizar el funcionamiento de la instalación fotovoltaica, por lo que se debe tener presente que una pérdida de datos o mala recepción de señal puede alterar la información que se entrega al dueño o encargado del sistema fotovoltaico, y puede ser perjudicial si el sistema cuenta con una limitación de inyección obligatoria hacia la red, situación que se origina para evitar el flujo de energía hacia la compañía eléctrica, en algunos casos esta restricción puede estar solicitada por la misma distribuidora eléctrica.

En ambientes industriales y agrícolas, es posible que un sistema fotovoltaico se conecte a la red eléctrica interna del lugar, a una distancia no despreciable, y si además consideramos que no siempre es posible instalar un cable de comunicación siguiendo el camino más directo entre ambos puntos la única solución que queda es adecuarse al tendido eléctrico existente, donde las vueltas internas pueden provocar que la distancia final de cable de señal llegue fácilmente a distancias mayores a 500 metros.

En este caso en específico para el desarrollo de este trabajo, se tomará como base un caso real correspondiente a un proyecto fotovoltaico en donde el medidor eléctrico y lugar de instalación del Smart Meter se encuentran a más de 430 metros del inversor fotovoltaico.

Por la situación de este proyecto base y por posibles situaciones similares a futuro es de utilidad tener la alternativa de extender dicha conexión mediante un enlace inalámbrico, ya que la instalación de un Smart Meter es el que finalmente permite registrar el flujo de energía que llega desde la compañía eléctrica y además la energía que se inyecta desde el fotovoltaico a la red.

CAPÍTULO 1: ANTECEDENTES GENERALES

1 **ANTECEDENTES GENERALES**

En este capítulo se presenta, el problema a solucionar que se origina en base a un proyecto fotovoltaico real, también los diferentes tipos de tecnología que puede utilizarse para solucionar la problemática, el método por el cual se dará solución y finalmente los objetivos a cumplir en el desarrollo de este trabajo.

1.1 **PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

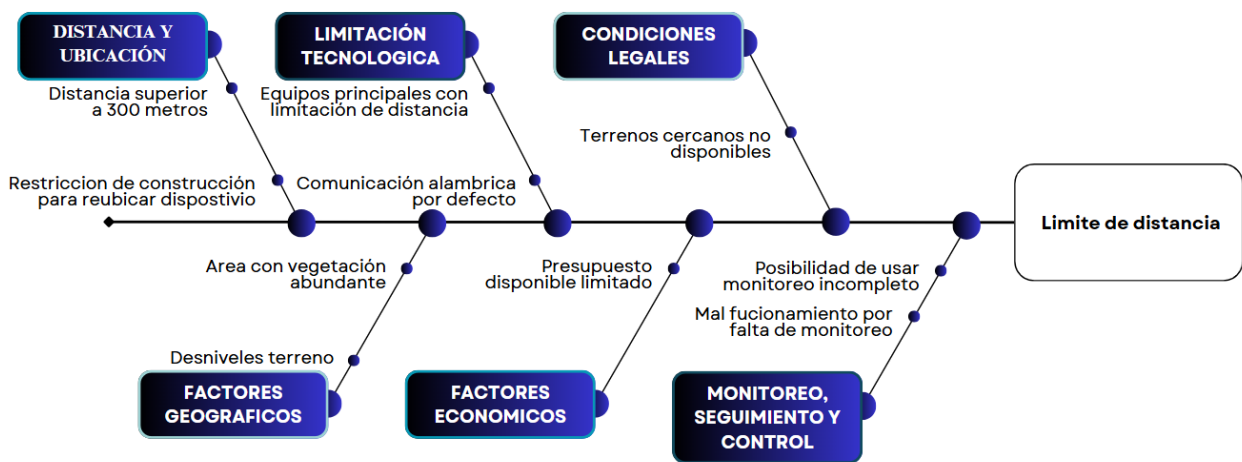
El inconveniente por resolver es la limitación de distancia para la conexión alámbrica entre inversor y Smart Meter, limitante que existe en base a las recomendaciones de fabricantes de inversores y también al estándar internacional para cableados de par trenzado, ambas disposiciones son tomadas como base para realizar una correcta conexión entre un inversor fotovoltaico y su Smart Meter, donde este último equipo es el encargado de leer los flujos de energía que van en ambos sentidos, hacia la red eléctrica de la compañía (inyección fotovoltaica) y el consumo eléctrico del lugar.

La solución requerida para esta situación se crea en base a un problema real que existe en una instalación fotovoltaica ya construida, donde existe una distancia mayor a 430 metros entre inversor y Smart Meter. Dicha instalación se utilizará como modelo para las pruebas en terreno, sin embargo, no se busca corregir el problema que aqueja a esta instalación como tal si no tomarla como base para realizar las pruebas y establecer posibles soluciones a futuro.

En esta instalación real se cuenta con equipos del fabricante conocido como Fronius, por lo cual la base teórica para ir explicando el desarrollo de la solución se hará en base a manuales y esquemas de estos mismos equipos. Con respecto a otras marcas, generalmente todos los fabricantes ocupan la misma forma de comunicación entre ambos equipos, principalmente a través de una conexión conocida como RS485, que será igualmente será explicada durante el desarrollo de este trabajo. A modo general los equipos existentes en esta instalación son:

- Inversor marca Fronius modelo línea Symo 20 kW
- Smart Meter Fronius, modelo TS 5kA-3

Para analizar en mayor profundidad la causa raíz de este problema, y a los componentes que intervienen en el desarrollo de esta, se ha realizado la siguiente Figura 1-1 correspondiente a un diagrama de Ichikawa que evalúa los distintos factores que se relacionan en el problema a solucionar en este trabajo.



Fuente: Elaboración propia en base a condiciones del problema

Figura 1-1 Diagrama de Ishikawa

1.2 **SOLUCIÓN DEL PROBLEMA**

Se pretende dar solución a la limitación de distancia de una conexión entre el inversor fotovoltaico y su Smart Meter mediante un enlace inalámbrico.

Para evaluar la mejor opción para este caso, primero se hará una revisión de los distintos tipos de tecnología que existen dentro del mundo de la conexión inalámbrica, una vez revisada y seleccionada la tecnología más idónea para este caso en concreto, se realizará la implementación de la selección y se instalará en una conexión existente o simulada.

1.2.1 **Requerimientos**

Como primer paso antes de entrar en el desarrollo y solución del problema, se explicarán términos y procedimientos relacionados al área de la energía fotovoltaica y como es el funcionamiento de los sistemas de monitoreo que los fabricantes ofrecen a sus distintos equipos.

1.2.1.1 **Inversor Fotovoltaico**

El inversor fotovoltaico es un dispositivo electrónico que se encarga de transformar la corriente continua (CC) de los paneles fotovoltaicos en corriente alterna (CA).

Actualmente en el mercado hay una enorme variedad de estos equipos, tanto para prestaciones conectadas a la red como desconectadas, ámbitos residenciales e industriales, híbridos y microinversores.

Todas estas categorías se han desarrollado para abarcar un mercado cada vez más demandante, por su rápido desarrollo, y en donde se presentan cada vez más, paneles fotovoltaicos de rangos más amplios de potencia, voltaje y corriente.

En cuanto a su funcionamiento, este equipo transforma la energía continua en alterna mediante una función llamada conmutación electrónica, este proceso es llevado a cabo mediante componentes electrónicos conocidos como IGBT, especializados en la conmutación de alta potencia y pertenecientes al grupo de transistores de potencia.

Los IGBT alternan rápidamente la señal de corriente continua para formar la onda característica de la corriente alterna. Aunque el nivel de electrónica interna del inversor puede variar de un fabricante a otro, el proceso sigue siempre la misma secuencia: la señal de CC es alternada y luego filtrada para generar una onda de CA pura.

1.2.1.2 Smart Meter

Este componente es, en esencia, un microprocesador equipado con un software que incorpora algoritmos de monitoreo y cálculo preconfigurados. Se conecta a los cables principales de energía de la red y utilizando un sensor de corriente toroidal, es capaz de medir el flujo de energía en ambas direcciones y almacenar esta información en su memoria interna.

En términos simples, puede describirse como un contador de energía bidireccional que, mediante sus salidas digitales y analógicas (según el modelo), a través de una conexión RS485, proporciona información en tiempo real al inversor fotovoltaico.

1.2.1.3 Protocolo de comunicación

La comunicación entre el inversor fotovoltaico y su Smart Meter varía según el modelo y el fabricante, pero generalmente se clasifica en dos principales protocolos: Modbus RTU y Modbus TCP/IP.

Modbus RTU: Esta conexión, conocido como unidad remota de terminal, o RTU por sus siglas en inglés, utiliza una comunicación en formato serial donde los datos se transmiten en formato binario. La interacción se basa en una relación maestro-esclavo, donde el dispositivo maestro inicia la comunicación enviando solicitudes al dispositivo esclavo. En el caso de un inversor fotovoltaico, estas solicitudes se realizan de manera cíclica, con intervalos fijos de tiempo, para actualizar continuamente los datos sobre el flujo de energía.

Modbus TCP/IP: Esta conexión, donde sus siglas significan Protocolo de Control de Transmisión (TCP) / Protocolo de Internet (IP), a diferencia de RTU, utiliza la infraestructura de red de internet para transmitir datos. Esto permite aprovechar las capacidades de la banda ancha de internet, logrando mayores velocidades de transmisión mientras se mantiene el formato binario característico de Modbus RTU.

A continuación, se presenta en Tabla 1-1 una comparación a las principales características de cada protocolo.

Tabla 1-1. Comparación protocolos Modbus

Característica	Modbus RTU	Modbus TCP/IP
Tipo de comunicación	Serial (RS-485 o RS-232)	Ethernet
Velocidad de transmisión	De 9.600 a 115.200 bps	>10/100 Mbps
Costo de implementación	Bajo	Alto
Ejemplos	PLC, sensores	SCADA

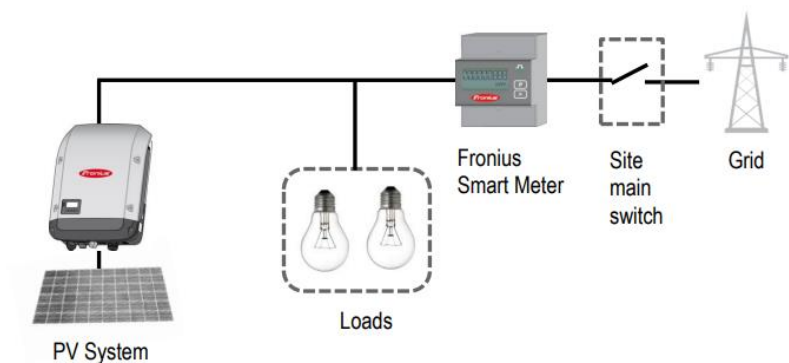
Fuente: Elaboración propia

1.2.1.4 Comunicación en una situación real

En la práctica, todos los fabricantes de inversores coinciden en que el Smart Meter debe conectarse siguiendo uno de los dos métodos descritos a continuación, dependiendo de cual se elija, afectara en cómo se presenta la información en la plataforma de monitoreo, ya que al momento de configurar el Smart Meter se debe indicar en que posición se ha instalado físicamente lo que influirá en como la plataforma interpreta los datos recibidos desde inversor y Smart Meter.

1.2.1.5 Conexión en punto de alimentación

En este formato de conexión, que se observa en figura 1-2, tanto las cargas como el sistema fotovoltaico están conectadas en la entrada correspondiente al punto de carga del Smart Meter, y la conexión a la red debe estar aguas arriba del sistema, siendo más eficiente para medir la inyección que se dirige hacia la red.

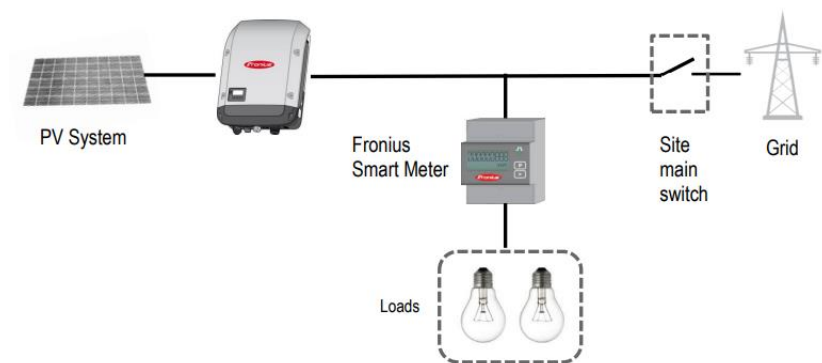


Fuente: Fronius. (2015). How to set up Export Limiting Using the Fronius Smart Meter

Figura 1-2 Esquema de conexión Manual Smart Meter 1

1.2.1.6 Conectado en punto de consumo

En este formato de conexión, que se observa en figura 1-3, el Smart Meter está conectado en el mismo punto que la red y solo se encuentran conectadas las cargas al punto que tiene el mismo nombre en el esquema. Esta forma de conexión es efectiva para un sistema del cual se tiene conocimiento que no inyectará energía a la red eléctrica ya sea porque no fue pensado para este fin, o que por alguna condición técnica no pudiera hacerlo, también es útil cuando solo se quiere monitorear las cargas conectadas al consumo del sistema fotovoltaico.



Fuente: Fronius. (2015). How to set up Export Limiting Using the Fronius Smart Meter

Figura 1-3 Esquema de conexión Manual Smart Meter 2

1.2.1.7 Conexión entre Inversor y Smart Meter

Se debe entender que el inversor fotovoltaico es un equipo con un procesador interno diseñado para evaluar información de cierta manera, en este caso, recibe paquetes de datos binarios en protocolo modbus desde el Smart Meter. Esta información puede ir variando, según el modelo de este último, en donde el Smart Meter puede entregar una cierta cantidad de pulsos que equivalen a kWh o modelos más avanzados que entregan incluso información del medio ambiente; como humedad y temperatura. Esta información puede ser leída en forma específica por el inversor para coincidir con los datos requeridos de potencia, energía, etc. Datos que están codificados en bloques binarios organizados, que es lo que finalmente caracteriza al protocolo Modbus.

1.2.2 Formas de conexión y transmisión de datos

En la actualidad, las tecnologías de transmisión de datos permiten mantener al mundo conectado y pueden clasificarse en dos grandes categorías: medios guiados y no guiados.

No obstante, diversos tipos de conexiones, formatos o protocolos pueden utilizarse en cualquiera de estas categorías. Por ejemplo, entre los medios físicos o guiados se destacan los siguientes:

Medio Guiado

Par trenzado: Utilizado en redes telefónicas, redes locales (LAN) y Modbus RTU. Está compuesto por dos cables de cobre aislados, trenzados entre sí para reducir interferencias electromagnéticas. Con el desarrollo actual se ha logrado compensar su limitada capacidad en cuanto a velocidad y distancia.

Este tipo de cable puede dividirse de la forma que se presenta en tabla 1-2.

Tabla 1-2. Tipos de Cables CAT

Nombre	Frecuencia de transmisión	Velocidad de transmisión
Categoría 3	16 MHz	10 Mb/s
Categoría 4	20 MHz	16 Mb/s
Categoría 5	100 MHz	100 Mb/s
Categoría 5e	100 MHz	1000 Mb/s
Categoría 6	250 MHz	1000 Mb/s
Categoría 6A	500 MHz	10 Gb/s
Categoría 7	600 MHz	10 Gb/s
Categoría 7A	1 GHz	10 Gb/s
Categoría 8	2 GHz	40 Gb/s

Fuente: Cardeñas, V. (2024).Comunicación de datos, UTFSM.

Este cable denominado CAT es el recomendado para la transmisión RTU del sistema fotovoltaico. Dentro de este contexto, surgen las primeras limitaciones que motivan el desarrollo

de este trabajo, dado que las recomendaciones técnicas sugieren mantener un límite máximo de distancia para los cables tipo 5e, 6 y 6A. Solo los cables de categorías superiores presentan menor restricción en este aspecto, ya que cuentan con una protección adicional que los clasifica como cables blindados. La limitación de distancia se atribuye a posibles alteraciones físicas en la transmisión de datos, como atenuación de la señal, distorsión por retardo, retrasos, desvanecimiento, ecos y ruidos.

A continuación, se da una breve descripción de cada perturbación.

- **Atenuación:** Pérdida de potencia de la señal, causada por las características físicas del medio.
- **Distorsión de retardo:** Interferencia entre armónicos internos de la señal, que depende del medio y anchura de los pulsos.
- **Desvanecimiento:** Se refiere a la disminución del coeficiente señal/ruido, que es propio de las transmisiones por radio.
- **Ecos:** Se produce un cambio en las características eléctricas de los conductores y parte de la onda transmitida se refleja, conocido igualmente como onda reflejada.
- **Ruidos:** Producido por el movimiento de los electrones en la línea de transmisión. Conocido igualmente como ruido blanco, lo característico de esta perturbación es la dificultad de eliminarse. Su potencia es proporcional a la temperatura

Igualmente, algunos fabricantes, como la marca de inversores fotovoltaicos Fronius, admiten una distancia máxima de 300 metros, siempre y cuando se utilice un cable de categoría superior. Pero lo anterior no es una recomendación sino una condición aceptable en caso de ser estrictamente necesario. Con las condiciones presentadas, se debe sumar además la situación no menor de los estándares internacionales de cableados estructurales TIA/EIA-568 y IEEE 802.3 para Ethernet, donde se indican que el cableado debe estar conformado por un tramo lineal de 90 metros horizontal y hasta 10 metros de cableado de interconexión, y donde sumando ambos se obtiene el límite de 100 metros.

Con respecto a los estándares mencionados, a continuación, se da una descripción de ambos:

- **TIA/EIA-568:** Desarrollado por la Telecommunications Industry Association (TIA) y la Electronic Industries Alliance (EIA). Define varias categorías de cable en función de su capacidad para transmitir datos a diferentes velocidades y a diferentes distancias (CAT), define requisitos de instalación y distancia como los 90 metros de cable horizontal e interconexión de 10 metros, define tipos de conectores, como los RJ45 y define requisitos de mantenimiento.
- **IEEE 802.3:** Desarrollado por el Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), define las especificaciones para Ethernet, es el modelo de red más utilizado en redes locales (LAN). Su descripción abarca su funcionamiento en base a las Capas OSI, define medios de transmisión, define velocidades de transmisión, topologías (relacionadas con capas OSI) y define codificaciones de las señales.

Tomando en cuenta las condiciones descritas anteriormente se confirma la utilidad de tener una forma de extender esta comunicación mediante un método inalámbrico y que pueda mantener las condiciones óptimas de transmisión de la información. Siguiendo con la descripción de los demás tipos de conexión alámbrica, se describen las otras formas de conexión que existen actualmente:

- Cable coaxial: Conductor central de cobre rodeado de un aislamiento dieléctrico, incluye una malla metálica para evitar interferencias y una cubierta externa de plástico. En la actualidad es considerado un método antiguo de transmisión, siendo reemplazado paulatinamente por la fibra óptica.
- Fibra óptica: En la categoría de transmisión alámbrica, es la más usada actualmente, por ser la más eficiente en cuanto a capacidad y alcance de transmisión. Consiste en filamentos de vidrio o plástico, de muy poco espesor, similar al cabello humano por donde se transmiten pulsos de luz.

Medio no guiado

- Wi-Fi: Funciona mediante la transmisión de datos a través de ondas de radio en el espectro de frecuencias que pertenecen a las bandas de 2.4 GHz y 5 GHz. Es un estándar de red inalámbrica basado en las especificaciones del protocolo IEEE 802.11. La información se transmite en paquetes de datos entre el dispositivo y un punto de acceso inalámbrico (como un router Wi-Fi) que está conectado a Internet.
- Redes móviles: Las torres celulares envían y reciben señales de dispositivos móviles mediante frecuencias de radio. Estas estaciones base se conectan a la red central a través de enlaces de comunicación como cables de fibra óptica, principalmente.
- Enlaces satelitales: Utilizan satélites en órbita terrestre para transmitir datos a largas distancias, especialmente en áreas rurales o remotas.
- LoRa (Long Range): Perteneciente a la categoría tecnología LPWAN para IoT que utiliza bandas de baja frecuencia para transmitir datos a larga distancia con bajo consumo de energía

Es importante que se explique el término LPWAN, que proviene del acrónimo *Low Power Wide Area Network*, cuyo significado es red de bajo poder para un área amplia. Este concepto surgió para ser utilizado en el ámbito conocido como Internet de las Cosas (IoT). Su principal diferencia con la categoría a la que pertenece, la categoría WAN, radica en su enfoque en el bajo consumo energético, amplia cobertura, bajo costo y reducido ancho de banda. Estas características lo hacen ideal para conectar espacios pequeños y múltiples dispositivos en paralelo, como ocurre comúnmente en el ámbito de la domótica. Dentro de esta subcategoría se incluyen:

- LoRa/LoRaWAN.
- Sigfox.
- NB-IoT (Narrowband IoT).
- LTE-M.

Algunos equipos recomendados para usarse en estos tipos de tecnologías inalámbricas son: sensores ambientales, monitoreo de espacios, luces inteligentes, y contadores digitales o conocidos igualmente como Smart Meter, tal cual como lo es el equipo que se presenta inicialmente y que además es el segundo componente más importante en un sistema fotovoltaico monitoreado.

Continuando con la descripción de las categorías de conexión relacionadas con el término WAN (Red de Área Amplia), que se refiere a una conexión entre dispositivos a grandes distancias, es importante mencionar que esta categoría forma parte de un grupo que incluye otras clasificaciones de redes. Entre ellas se encuentran las redes LAN (Red de Área Local), que abarca conexiones cercanas, como las de una vivienda, y la MAN (Red de Área Metropolitana), que se sitúa entre la LAN y la WAN, caracterizándose por cubrir áreas del tamaño de una universidad, hospital u otras instalaciones similares.

1.2.3 Conexión entre Inversor y Smart Meter

Con la explicación realizada hasta el momento de los términos, características y nombres técnicos, es posible abordar la conexión real del inversor fotovoltaico y su Smart Meter.

Actualmente, a pesar de la gran cantidad de marcas, la mayoría mantiene la misma tecnología y formato para transmitir información desde el Smart Meter al inversor, por lo cual todos los ejemplos se realizarán siguiendo la información y recomendaciones entregadas por la marca Fronius. En el caso de los inversores Fronius, específicamente de la línea Symo, la conexión del Smart Meter al inversor requiere la presencia del componente denominado Datamanager. Este módulo, que es una tarjeta enchufable, permite recibir las diversas conexiones del ecosistema Fronius, incluyendo el formato de conexión RTU. Este componente se detalla posteriormente en esta misma subsección.

En Figura 1-4, se muestra la conexión que se debe realizar a un equipo trifásico, esta conexión puede ir variando según si la conexión es monofásica, bifásica y trifásica. De todas maneras, la secuencia de conexión es la misma, se necesita conectar las líneas de energía a la entrada de referencia del Smart Meter, las conexiones de lectura de corriente a través de los cables de los toroides y finalmente el cableado de comunicación, en este caso RS485, desde el Smart Meter al inversor, estas conexiones que se presenta a continuación son de un esquema de conexión del fabricante Fronius.

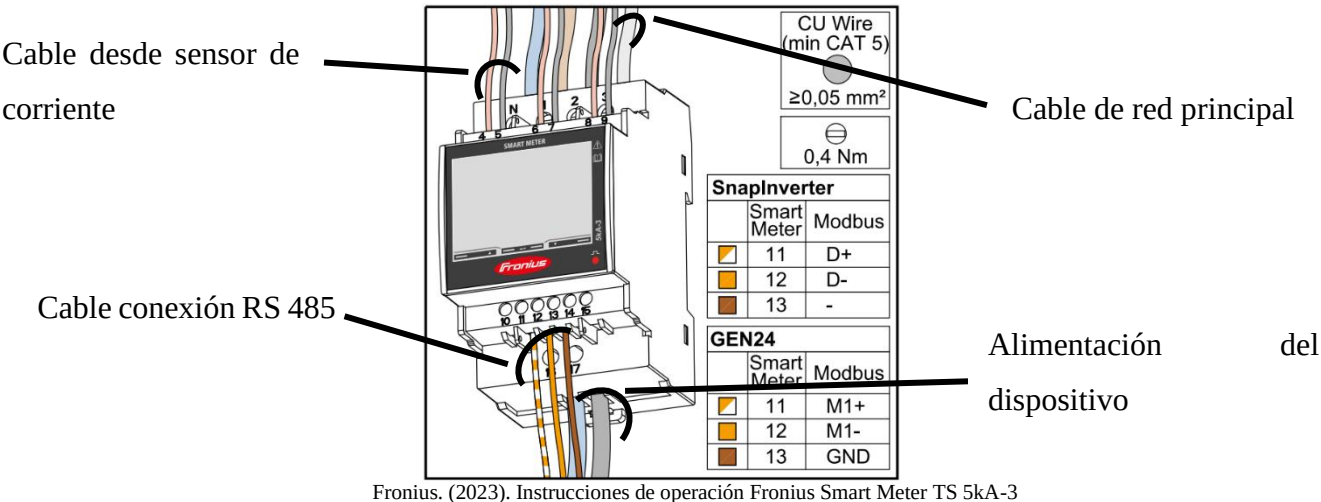
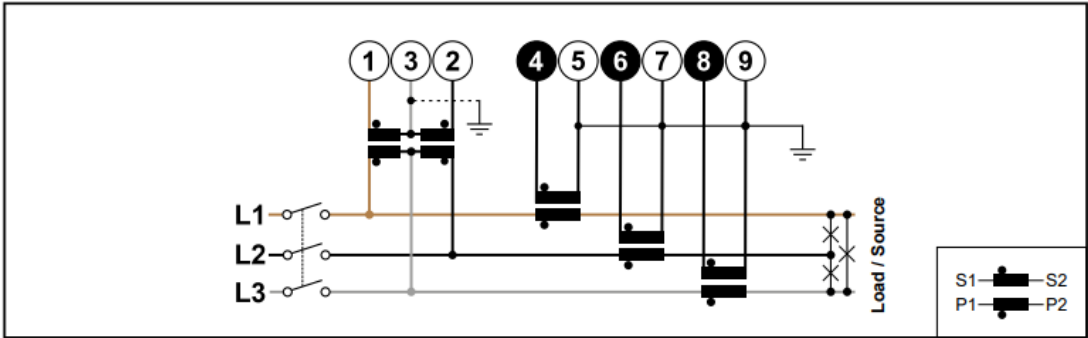


Figura 1-4 Esquema de conexión Manual Smart Meter 3

Tomando como referencia la conexión presentada en la Figura 1-4, el paso siguiente para completar la conexión de un Smart Meter trifásico de este modelo consiste en conectar adecuadamente la orientación de los sensores de corriente y asegurar la correcta secuencia de las líneas de entrada, tal como se muestra en la Figura 1-5.

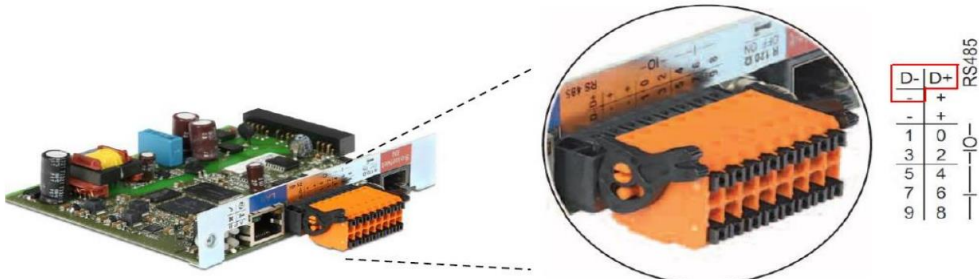


Fronius. (2023). Guía Rápida de inicio Fronius Smart Meter TS 5kA-3

Figura 1-5 Esquema de conexión Manual Smart Meter 4

De esta manera se indica el número del cable y con esta relación, el orden del ingreso al dispositivo Smart Meter, igualmente se indica el orden de conexión de los sensores de corriente, descritos por sus componentes físicos que son S1, S2, P1 y P2, que van relacionados al sentido del devanado interno del sensor de corriente.

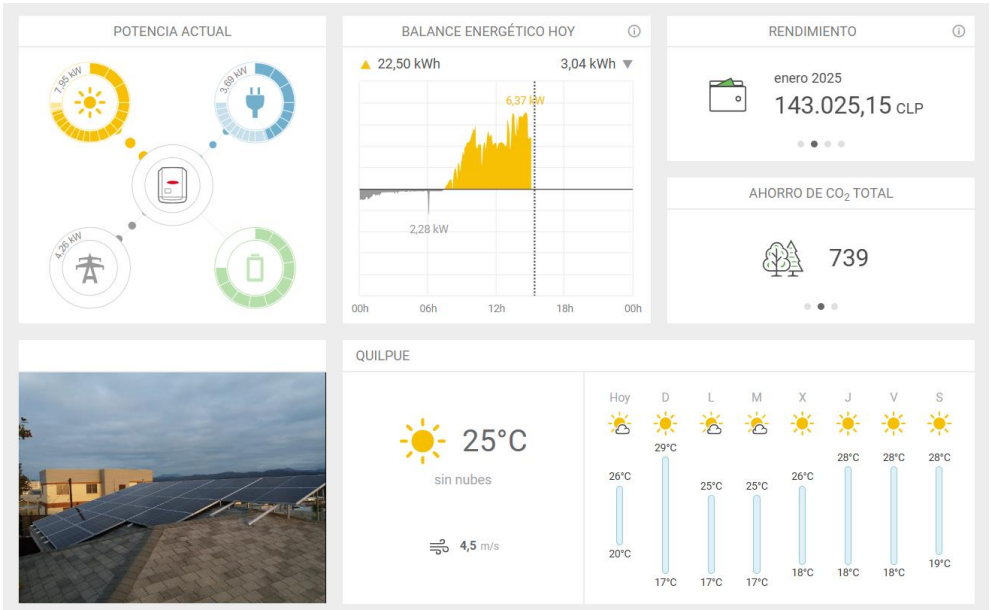
Por el otro lado de la conexión, que corresponde al inversor fotovoltaico, para seguir la correlación de lo descrito anteriormente, se indicara como debe llegar esta conexión al inversor modelo Symo de la marca Fronius, a un componente del inversor llamado Datamanager, que viene incorporado en las versiones full de este modelo, esta conexión se muestra en Figura 1-6.



Fuente: Fronius. (2015). How to set up Export Limiting Using the Fronius Smart Meter

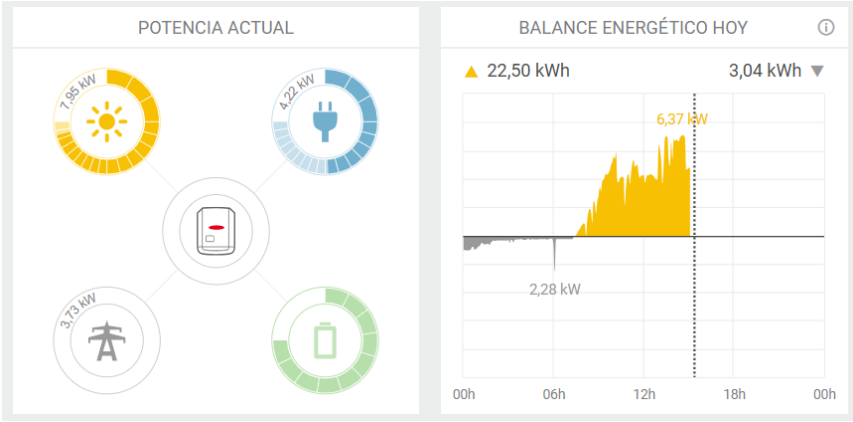
Figura 1-6 Conexión Datamanager

En la figura 1-5 se puede notar que el cableado de comunicación con cable par de trenzado ingresa directamente al bloque de terminales en sus bornes denominados como D-, D+ y -, de esta manera se cierra el circuito de comunicación perteneciente a lo descrito inicialmente como conexión Modbus RTU, lo que permite que un sistema este completamente monitoreado. Esta conexión permite que Fronius proporcione, a través de su plataforma de monitoreo, información como la que se observa en la Figura 1-7 y 1-8, donde se muestra una instalación existente utilizada como ejemplo para ilustrar el resultado final de un sistema de monitoreo con Smart Meter.



Fuente: Fronius (2025), Plataforma de monitoreo Fronius Solar Web

Figura 1-7 Plataforma de monitoreo Fronius Solar Web 1



Fuente: Fronius (2025), Plataforma de monitoreo Fronius Solar Web

Figura 1-8 Plataforma de monitoreo Fronius Solar Web 2

1.3 INSTALACIÓN EXISTENTE COMO BASE DE ESTUDIO

1.3.1 Comunidad de agrícola de regantes

El proyecto fotovoltaico que sirve como base de esta investigación y que propicio el inicio de este trabajo, es el que se presenta a continuación. Este proyecto fue desarrollado con el propósito de rebajar el consumo eléctrico de la Cooperativa de Reforma Agraria Asignataria Mariano Alfonso, perteneciente a la comuna de Longotoma, la cual tiene una existencia de alrededor de 6 décadas y es una de las 2 entidades que quedan de esta categoría en el país. Está conformada por alrededor de 25 socios, todos pobladores del mismo sector, y cultivan principalmente flores y tubérculos. El proyecto fue diseñado para rebajar alrededor del 80% del gasto económico anual en electricidad, y por ser una unión de pequeños agricultores, se debe entender que el gasto eléctrico es uno de los principales costos fijos que deben suplir.

La Figura 1-9 muestra el proyecto real que inició la problemática a resolver en este trabajo, se pueden observar los paneles fotovoltaicos instalados y es en este lugar donde se encuentra el inversor el cual está a una distancia de 430 metros lineales del medidor de la Red eléctrica.



Fuente: Foto real proyecto fotovoltaico, Coop. M. Alfonso, Longotoma

Figura 1-9 Vista aérea proyecto fotovoltaico

Mientras que en la Figura 1-10 se puede observar la distancia calculada entre los 2 puntos gracias a la herramienta de medición de la plataforma Google Earth.



Fuente: Google Maps, 2024. Coop. M. Alfonso, Longotoma, Chile.

Figura 1-10 Distancia entre inversor y Smart Meter

Se ha tomado la referencia de la distancia lineal entre ambos puntos ya que al ser un tendido eléctrico se cuenta con los valles característicos que se origina entre dos rollizos de madera, dicha distancia no ha sido considerada ya que con la distancia lineal se cumple el objetivo de presentar que ya existe una distancia mayor a la recomendada para la conexión original RS485 entre inversor y Smart Meter.

1.3.2 Proyecto Fotovoltaiico

El proyecto considera una serie de mejoras no relacionadas con el sistema fotovoltaico, por ende, a continuación, solo se describirán los principales componentes del sistema fotovoltaico construido y sus características que son identificados en tabla 1-3, sin embargo, todos los componentes del sistema fotovoltaico como tal puede identificarse a continuación:

- Estructura fotovoltaica con mesa de dos filas de 22 paneles fotovoltaicos.

- 44 paneles fotovoltaicos Canadian Solar CS6W de 550 Wp.
- Smart meter TS 5kA-3
- Inversor fotovoltaico Fronius Symo 20.0-3M Full.
- Cable eléctrico Preensamblado aluminio 3x50 mm2 + 1x50mm2
- Tablero eléctrico fotovoltaico con protecciones eléctricas.
- Tablero eléctrico de inyección fotovoltaico con protecciones eléctricas.
- Tablero general eléctrico con protecciones eléctricas y Smart Meter.

Tabla 1-3. Descripción de componentes sistema fotovoltaico

Panel fotovoltaico Canadian Solar, modelo CS6W de 550 Wp.	• 44 paneles fotovoltaicos totalizando una potencia de 24.2 kWp. • Conectados en 3 series de 2X15 + 1X14 usando sus 2 MPPT. 30 paneles en MPPT1 y 14 en MPPT2. 
Inversor Fotovoltaico Fronius, modelo Symo 20.0-3M Full, 20 kW potencia.	• 1 inversor. 
Smart Meter Fronius, modelo TS 5kA-3	• 1 Smart Meter. 

Fuente: Elaboración propia, en base a información real del proyecto.

1.3.3 Alternativas de posibles soluciones

En busca de solucionar el problema de distancia en la conexión de un monitoreo fotovoltaico, y específicamente enfocado en el proyecto base presentado en la subsección anterior, se contrastarán distintas opciones (4) para determinar la opción más viable y que satisfaga, en primer lugar, el éxito de la solución, y que en segundo lugar cumplan con las características económicas, facilidad de aplicación y confiabilidad.

1.3.3.1 Solución del proveedor

El primer obstáculo de esta situación es no tener la confirmación de que todos los proveedores de sistemas fotovoltaicos cuentan con el método de aumentar la conexión alámbrica, para el caso de la marca Fronius, que se ha tomado como ejemplo hasta el momento y además es la marca usada en el proyecto fotovoltaico base, existe un componente pensado para grandes sistemas interconectados de inversores que permite aumentar la distancia de conexión física entre un Smart Meter y el inversor en hasta 1000 metros, llamado databox manager 2.0, sin embargo este equipo tiene un valor aproximado en el mercado de \$500.000 CLP y a esto se le debe sumar el costo del cable UTP CAT 6 (categoría mínima) para exterior, el cual se encuentra en el mercado en rollos de 305 metros de forma normal, siendo posible igualmente encontrar rollos de 735 metros y 1000 metros pero a un costo unitario mayor.

El componente con el que cuenta la marca Fronius para estas situaciones se conoce como Datamanager box 2.0 y se presenta en la figura 1-11, el cual es una central de comunicación para interconectar varios inversores en cadena y sensores específicos para medir otras variables ambientales, de esta forma se tiene un punto intermedio entre la conexión original de inversor y Smart Meter, donde ahora se encontrara el Datamanager box.



Fuente: Fronius.com (2025)

Figura 1-11 Datamanager box 2.0

Al conectarse al inversor por cable ethernet y al Smart Meter por RS485 este componente es quien pasa a procesar toda la información y entregar los datos necesarios a la plataforma de monitoreo. Otra consideración importante es que el equipo cuenta con una protección IP 20 por lo que debe estar dentro de un tablero metálico.

Los componentes principales que se requieren para instalar esta opción son los que se listan a continuación:

- Datamanager box 2.0.
- Fuente de poder 12V.
- Cable UTP CAT 6, distancia varía según proyecto.
- Tablero metálico independiente o adecuación de uno existente.

1.3.3.2 Módulo LoRa

Esta opción cuenta con una ventaja por sobre las otras, y es que los equipos necesarios para realizar la conexión se encuentran disponible en el stock perteneciente a la empresa que realizo el proyecto fotovoltaico base, principalmente porque ya hubo un intento de extender la comunicación de forma inalámbrica, pero con resultados desfavorables. Además, cada módulo tiene un valor aproximado de \$60.000 y viene de fabrica con su fuente de poder y antena de conexión, no requiriendo ningún otro componente extra, siendo una opción ideal para sumar al valor total de un posible proyecto por su bajo valor económico y facilidad de reemplazo gracias al stock del mercado. El módulo LoRa existente en stock corresponde al modelo USR LG206, del cual se tiene dos unidades, este equipo se puede observar en la figura 1-12.



Fuente: www.pusr.com (2025)

Figura 1-12 Módulo USR LG206

Una consideración importante para poder utilizar y configurar este módulo, según los requerimientos que se tenga, es que se debe descargar el software del fabricante llamado USR LoRa SET.

1.3.3.3 Otra tecnología de conexión inalámbrica

Según lo expuesto en la subsección 1.3.5, existen varios protocolos de conexiones inalámbricas en el mercado y tecnologías especiales para este fin, sin embargo, la mayoría de estas tecnologías comparten rangos de conexión limitados, y si a esto le sumamos la necesidad de ser una opción de bajo consumo energético, la única opción disponible se acota a los dispositivos pertenecientes a las redes tipo LPWAN, explicado igualmente en la sección 1.3.5.

Este tipo de tecnología ya se consideró en la opción anterior, por lo cual otra tecnología inalámbrica iniciaría en desventaja frente a los módulos LoRa, dada su menor distancia de comunicación, por lo cual no representan una verdadera competencia en cuanto a funcionalidad en comparación con la tecnología LoRa.

1.3.3.4 Monitoreo fotovoltaico incompleto

Debido a las características particulares del beneficiario de la instalación fotovoltaica utilizada como referencia para esta investigación, resulta fundamental establecer un control adecuado sobre la inyección de energía a la red eléctrica.

Por esta razón, considerar un monitoreo incompleto, donde el sistema fotovoltaico supervise únicamente la generación de los paneles, se clasifica como la alternativa menos conveniente para el proyecto. No obstante, la decisión final sobre la viabilidad de esta configuración dependerá de las condiciones analizadas a lo largo del desarrollo del presente estudio.

1.3.4 Evaluación de las alternativas de solución

En el punto anterior se expusieron las posibles opciones para solucionar el problema abordado en este trabajo. A continuación, se realizará una comparación objetiva basándose en características evaluables de cada una. Por ello, se evaluarán cuatro criterios, asignando valores entre 1 y 3, para determinar la opción más eficiente, donde 3 representa la puntuación más alta y 1 la más baja para cada ítem evaluado.

- Distancia requerida: El problema es originado por la distancia entre inversor y su Smart Meter, por la cual la opción elegida debe cumplir a cabalidad con la distancia de comunicación.
- Sincronía de la solución: La solución debe acoplarse a los equipos existentes de la instalación, no es posible cambiar el inversor y el Smart Meter.
- Consumo de energía: Todo el proyecto está pensado para disminuir gastos energéticos, no es posible una opción que aumente esta característica.
- Costo de implementación: La solución debe ser de bajo costo, considerando tanto futuras reparaciones como el reemplazo de los equipos, especialmente debido a la larga vida útil de los paneles solares (20 años) y del inversor (10 años).
- Ventajas: Consideraciones favorables de la solución, esta característica no es un parámetro evaluable.

En tabla 1-3 se pueden analizar los resultados finales de la comparación entre las soluciones consideradas.

Tabla 1-3. Tabla de evaluación de soluciones

	Distancia requerida	Sincronía de la solución	Consumo de energía	Costo de implementación	Ventajas	Puntuación
Solución del proveedor	3	3	1	1	Confiabilidad	8
Modulo LoRa	3	3	3	3	Disponibilidad del equipo y bajo costo	12
Otra tecnología inalámbrica	1	1	2	2	N/A	6
Monitoreo incompleto	0	3	0	0	N/A	3

Fuente: Elaboración propia, en base a requerimientos.

Algunos puntos importantes sobre la comparación entre cada alternativa son las puntuaciones de la solución del proveedor en el ítem de costo de implementación, situación que se abordara durante el análisis económico para mejor comprensión del porqué de su valor más bajo de evaluación, por otro lado, está el valor de sincronía de la solución en la opción de monitoreo incompleto, principalmente porque al no necesitar realizar ningún cambio no genera ningún problema con el sistema que ya se encuentra instalado. Por último, la opción de otra tecnología inalámbrica fue evaluada en todos los ítems evaluables, pero finalmente su diferencia en la distancia de comunicación lo cataloga como una opción no apropiada para el problema en cuestión.

De forma evidente, la opción más recomendable son los módulos LoRa, por lo cual el desarrollo siguiente de este trabajo abordará como estos módulos son utilizados para extender la comunicación del sistema fotovoltaico.

1.3.5 Descripción de la solución seleccionada

Se ha seleccionado la tecnología inalámbrica conocida como LoRa, nombre proveniente del inglés “Long Range”, diseñada específicamente para cumplir con la tarea de transmitir datos a largas distancias con un bajo consumo de energía, y con el módulo específico USR LG206.

Esta tecnología es un protocolo de comunicación basado en modulación de espectro ensanchado desarrollado por la empresa Semtech, esta empresa es un proveedor internacional de semiconductores, tecnologías IoT y sistemas en la nube. Algunas características de la tecnología LoRa son:

- Largo alcance.
- Interconexión de varios dispositivos a una misma red.
- Excelente capacidad para sortear obstáculos.
- Bajo consumo energético.

Otra ventaja de esta tecnología es su fácil implementación en cuanto a costos y arquitectura base. Este tipo de red está conformada, generalmente, por los siguientes componentes:

- **Nodo:** Conocido comúnmente como módulo LoRa, es el dispositivo que cuenta con la capacidad de recibir datos y transmitirlos con el estándar de modulación LoRa.
- **Gateway:** Es quien recibe los datos en estándar LoRa, los procesa y transforma, en caso de ser necesario, los envía al procesador de la información.
- **Procesador de datos:** Dispositivo que se encarga de recibir los datos en su formato original y derivarlos, transformarlos o utilizarlos para realizar alguna actividad de información o de acción de variables.

En la siguiente subsección se explicará en mayor detalle la forma de transmisión de datos con la que trabaja la tecnología LoRa, esta transmisión se basa en la técnica de comunicación conocida como modulación de espectro ensanchado.

1.3.5.1 Modulación de espectro ensanchado

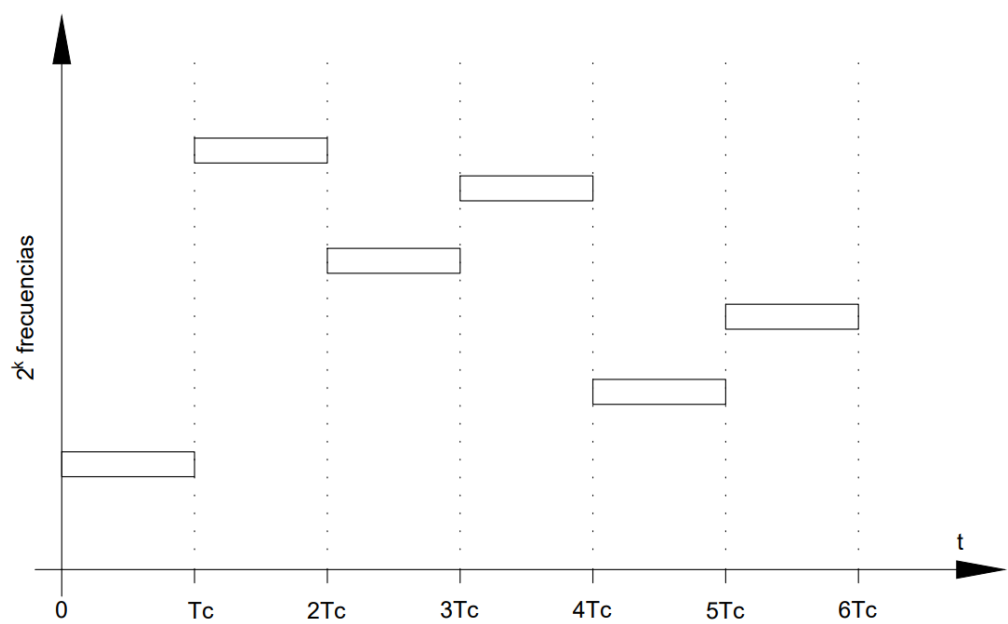
En una breve descripción de esta técnica, se podría explicar que consiste en transmitir información con un ancho de banda de cierta amplitud en un medio con un ancho de banda de mucha mayor amplitud y con una modulación específica en forma de secuencia, que se utiliza para cifrar la información y reducir los paquetes necesarios para transmitir la información original, esta última condición se utiliza para lograr una comunicación de bajo consumo energético y además le entrega un alto nivel de seguridad ya que si no se cuenta con la *contraseña* o secuencia de cifrado de información no se puede demodular la señal receptora y obtener los paquetes de datos originales.

Existen 3 tipos de técnicas de modulación de espectro ensanchado, se conocen como modulación por saltos de frecuencia (FH), modulación por secuencia directa (DS) y modulación de espectro de propagación de “Chirp” (CSS), siendo esta última la utilizada por la tecnología de transmisión LoRa.

1.3.5.2 Modulación por saltos de frecuencia (FH)

En la técnica por saltos de frecuencia, que se presenta en el Gráfico 1-1, la información enviada por el medio cambia periódicamente su frecuencia, se mantiene estable por intervalos de tiempo T para luego saltar a otra frecuencia, este patrón de saltos se decide por la señal de código del dispositivo que modula la señal, lo que podría entenderse como el cifrado que se realiza a los paquetes de datos, y que reconocer el equipo receptor para leer la información enviada.

A diferencia de la modulación por secuencia directa, la técnica FH utiliza una pequeña parte del ancho de banda para transmitir la información, que va cambiando en el tiempo, en cambio DS ocupa la banda de frecuencia completa.



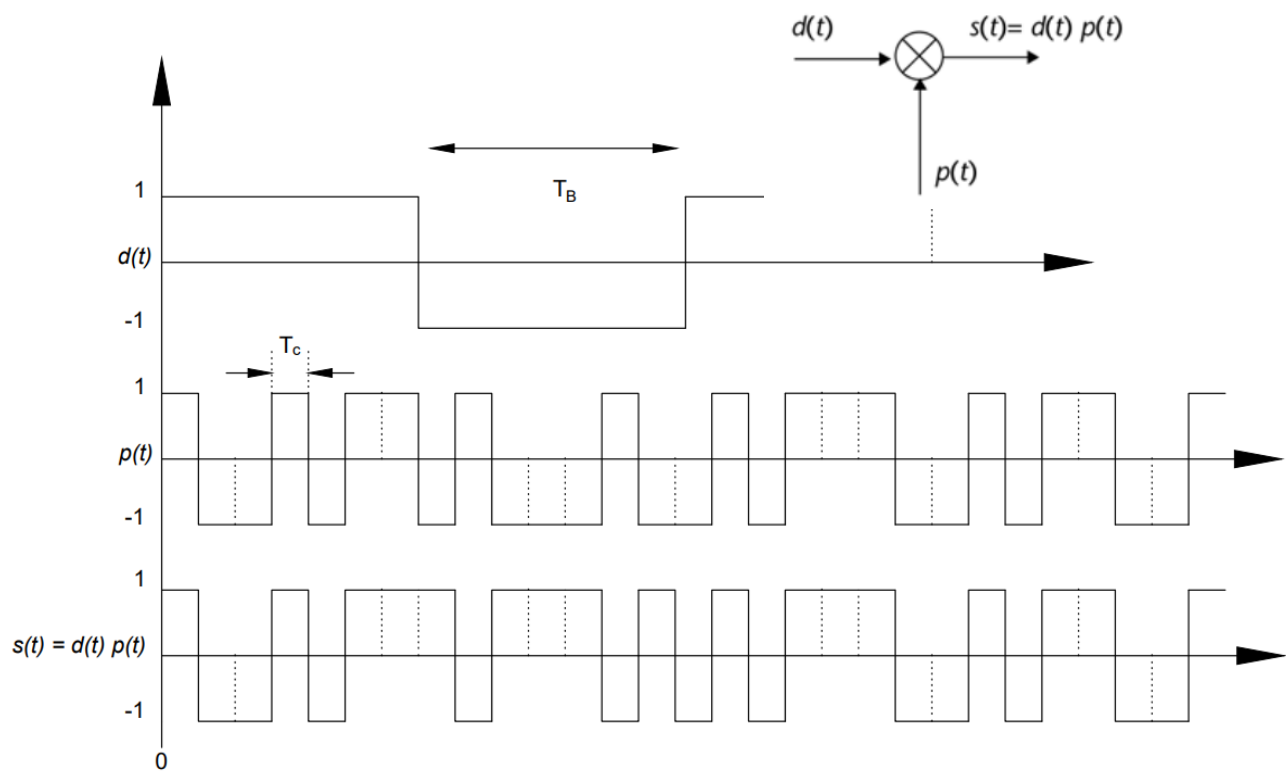
Fuente: Cabrera, M. Rey, F. Tarrés, F. Técnicas de comunicación de espectro ensanchado, Universidad Oberta de Catalunya, 2012

Gráfico 1-1 Modulación por saltos de frecuencia FH

1.3.5.3 Modulación por secuencia directa (DS)

La técnica de secuencia directa, que se presenta en Gráfico 1-2, realiza la dispersión de la información en el ancho de banda del medio de transporte mediante una premodulación de la señal enviada por medio de una secuencia binaria de gran velocidad y con características aleatorias.

Donde $d(t)$ equivale a la información enviada, $p(t)$ es la secuencia binaria de gran velocidad y $s(t)$ la señal modulada.

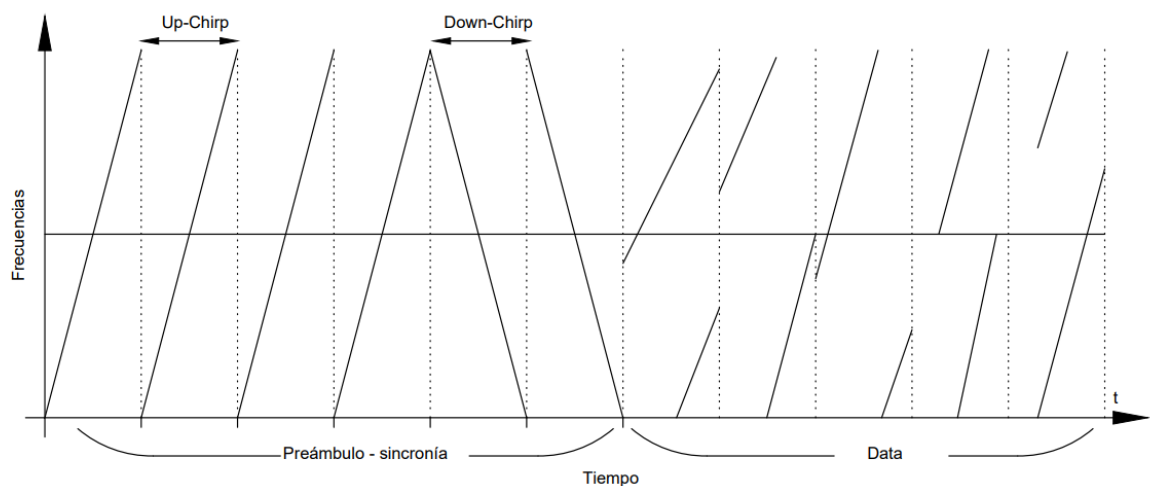


Fuente: Cabrera, M. Rey, F. Tarrés, F. Técnicas de comunicación de espectro ensanchado, Universidad Oberta de Catalunya, 2012

Gráfico 1-2 Modulación por secuencia directa DS

1.3.5.4 Modulación de espectro de propagación de “Chirp” (CSS)

Esta técnica es similar en su principio al FH, sin embargo, la modulación de la frecuencia se realiza mediante pulsos conocidos como chirp utilizados en una frecuencia lineal, de esta manera la información se transmite en ráfagas, saltando entre frecuencias en una secuencia pseudoaleatoria, un chirp es denominada como un tono en la cual la frecuencia de modulación se incrementa (up-chirp) o decremента (down-chirp). El ancho de banda completo de esa modulación, al sumar up y down-chirp, es equivalente al ancho de banda espectral de la señal original. Esta modulación de señal se presenta de forma simplificada en Gráfico 1-3.



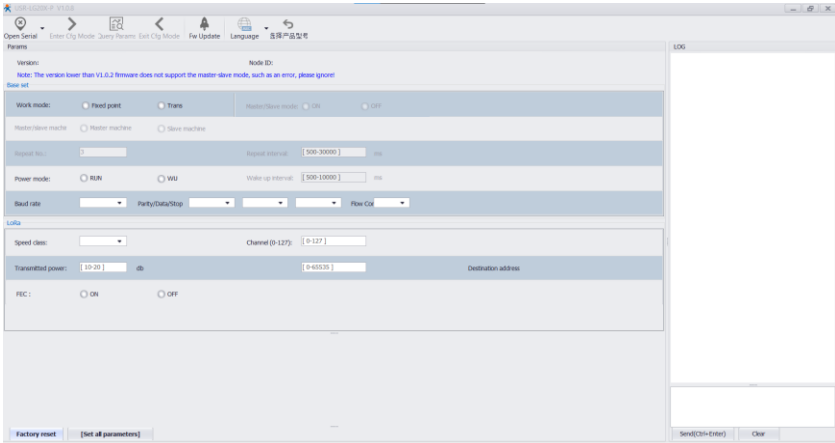
Fuente: Elaboración propia en base a Erik Vrieling Listening for Chirps, www.spectrum.ieee.org

Gráfico 1-3 Modulación de espectro de propagación de “Chirp” (CSS)

1.4 SOFTWARES UTILIZADOS

1.4.1 USR LoRa SET

Este software es un programa de gestión de configuración basado una interfaz gráfica de usuario y se utiliza para la configuración directa de parámetros del módulo LoRa seleccionado mediante comandos AT, lo que simplifica enormemente la configuración de los módulos ya que se cuenta con una casilla determinada para cada valor que se desea ingresar según la configuración requerida. En este caso se utilizará para la configuración específica que se requiere para cumplir con las condiciones de transmisión entre ambos módulos LoRa.

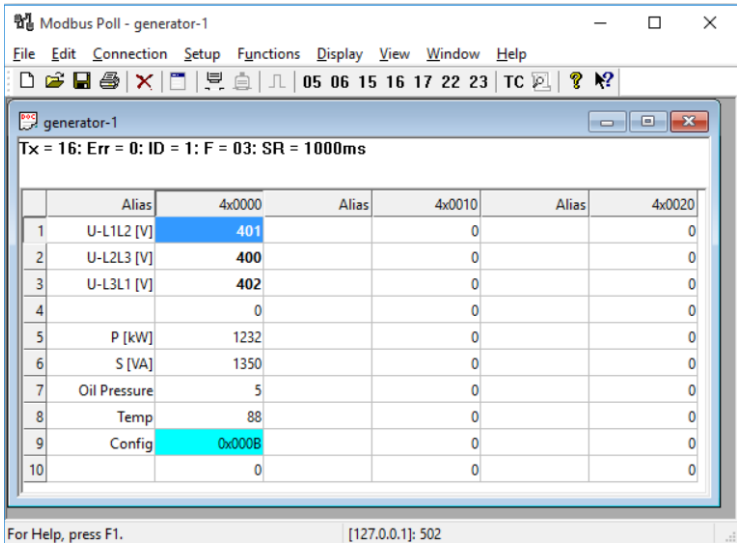


Fuente: www.pusr.com (2025)

Figura 1-13 Pantalla inicial software USR LoRa SET

1.4.2 Modbus Poll

Modbus Poll es un simulador maestro Modbus diseñado para acceder a dispositivos que trabajen con la comunicación modbus. Para los fines de este trabajo, este programa se utilizará para acceder a los datos enviados desde el Smart Meter al inversor para el caso de las pruebas a distancia realizadas en el simulador construido en laboratorio. La interfaz gráfica de este programa se puede observar en la figura 1-14.

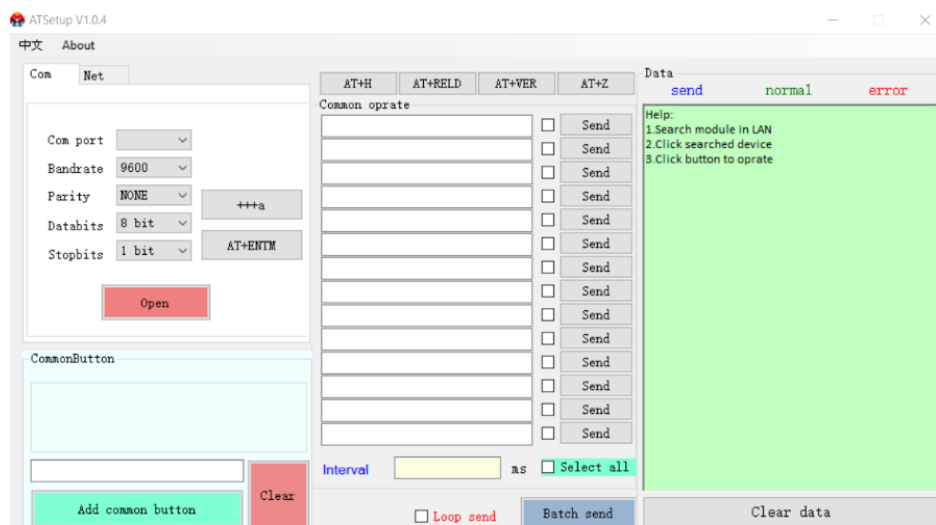


Fuente: Plataforma Modbus Poll

Figura 1-14 Pantalla de registro en Modbus Poll

1.4.3 AT Setup

El software, que se presenta en Figura 1-15, permite la configuración de convertidores seriales a RS485 mediante parámetros AT. Este programa facilita la gestión y ajuste de parámetros para lograr una transmisión de datos transparente y bidireccional entre interfaces RS232/RS485.



Fuente: www.pusr.com (2025)

Figura 1-15 Pantalla inicio AT Setup

1.5 **OBJETIVOS DEL PROYECTO**

Con la información detallada en este capítulo, y habiendo presentado el problema a resolver, se establecerán los lineamientos a seguir durante el desarrollo del problema. Para lograr esto de la forma más correcta, es necesario dejar establecidos previamente los objetivos a cumplir.

1.5.1 Objetivo General

Diseño de extensión de sistema de monitoreo de un sistema fotovoltaico mediante un enlace inalámbrico.

1.5.2 Objetivos Específicos

- ❖ Determinar la forma de conexión más idónea para el problema presentado.
- ❖ Diseño y configuración de la solución.
- ❖ Instalar la extensión inalámbrica de la comunicación en terreno o en una simulación equivalente.
- ❖ Presentar los resultados obtenidos.

CAPÍTULO 2: DESARROLLO DE LA SOLUCIÓN

2 DESARROLLO DE LA SOLUCIÓN

En este capítulo se llevan a cabo las principales actividades comprendidas para lograr la extensión de comunicación inalámbrica, situado en el contexto del proyecto fotovoltaico base.

Se presentarán las configuraciones requeridas para el correcto funcionamiento de los módulos LoRa, la adecuación a los tableros eléctricos existentes y los acondicionamientos técnicos requeridos para lograr la comunicación.

Es necesario recalcar que la empresa ejecutora ya tuvo un primero intento de extender la comunicación de forma inalámbrica bajo estas mismas condiciones sin embargo los resultados fueron negativos. Por esta razón, durante el análisis e investigación para llevar a cabo la implementación de la solución se han identificado situaciones a mejorar y que pueden haber afectado negativamente a los primeros intentos de lograr una comunicación exitosa.

2.1 EXPLICACIÓN DEL CASO A SOLUCIONAR

En base a la información presentada hasta este punto, no es posible realizar la conexión entre el inversor y el Smart Meter sin que se infrinjan las recomendaciones del proveedor y los estándares de métodos guiados. Además, existe la complicación de que el consumo del medidor corresponde, en realidad, al de al menos 25 subdivisiones internas, si se considera la cantidad de socios o usuarios finales de la energía. Esta situación genera un sistema de cobro más complejo de lo habitual, por esta razón, es fundamental que el sistema fotovoltaico cuente con un control completo del consumo de energía, que identifique la inyección del sistema fotovoltaico a la red y ayude a corroborar un cobro adecuado por parte de la compañía eléctrica. Esta solución debe ser de un costo reducido, considerando que estos proyectos son beneficiados en parte por instituciones gubernamentales y aportes de los mismos usuarios, por lo que se cuenta con fondos limitados.

Módulo USR-LG206



Fuente: Imagen Real del modulo

Figura 2-1 Módulo USR-LG206

Este módulo USR-LG206-H-P, presentado en Figura 2-1, es el modelo con el cual se cuenta para realizar la extensión inalámbrica, dicho modulo es un convertidor semidúplex de serial (232/485) a LoRa que transmite/recibe datos por serie y puede realizar comunicación uno a uno o uno a muchos mediante conexión LoRa. Sus características principales son las que se presentan en la tabla 2-1:

Tabla 2-1. Parámetros Modulo USR-LG206

Modelo		USR-LG206-H-P	
Parámetros inalámbricos	Banda de frecuencia	803Mhz ~ 930Mhz	
	Potencia de transmisión	10dBm ~ 20dBm	
	Sensibilidad de recepción	-138.5dBm / 0.268Kbps	
	Distancia de transmisión	3500 m	
Parámetros de Hardware	Interfaz de datos	RS232/RS485 Baudios: 1200bps a 115200bps	
	Voltaje de trabajo	5 a 36V	
	Corriente de trabajo	45mA a 12V	
	Temperatura de trabajo	-30°C ~ +80°C	
	Temperatura de almacenamiento	-45°C ~ +90°C	
	Humedad de trabajo	10~90%RH	
	Humedad de almacenamiento	10~90%RH	

Fuente: USR IOT. (2018). USR-LG206-P User Manual

2.1.1 Diseño de la solución

El primer paso para establecer la comunicación entre el inversor y el Smart Meter consiste en seleccionar el modo de operación más adecuado según las necesidades específicas del sistema que se quiera intervenir. El dispositivo USR-LG206-H-P ofrece tres modos de funcionamiento diseñados para diferentes escenarios de transmisión de datos.

A continuación, se describen las características y aplicaciones principales de cada uno, lo que permitirá evaluar cuál se adapta mejor al proyecto en cuestión para garantizar un monitoreo eficiente y una transmisión confiable de información.

2.1.1.1 Diseño de configuración

Modo de comando AT: Este modo se utiliza para configurar y controlar el módulo LoRa a través de comandos AT (textuales). Se utiliza principalmente cuando se necesita configurar parámetros como la frecuencia, potencia, dirección, y además trabajar en una plataforma propia de visualización de datos y donde solo se necesite recibir la información desde un dispositivo sensor.

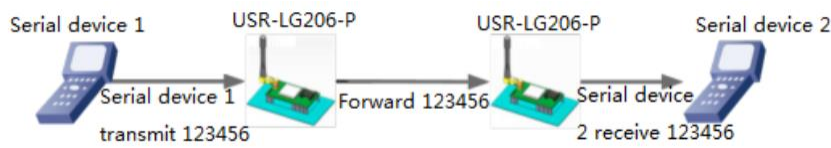
Sin embargo, no es adecuado para la transmisión continua de datos entre el inversor y el Smart Meter, ya que no está diseñado para la comunicación de datos en tiempo real, solo es útil para la configuración inicial del dispositivo.

Modo de transmisión transparente: En este modo, el módulo transmite los datos de forma transparente sin necesidad de procesarlos o modificarlos. En este modo, los dispositivos que estén conectados al USR-LG206-H-P (como el inversor y el Smart Meter) no necesitan saber que se está utilizando LoRa para la transmisión; simplemente se comunican usando Modbus RTU como lo harían normalmente.

Condiciones para una correcta comunicación:

- Mismo nivel de tasa de transferencia de bits (bps)
- Mismo canal de transmisión
- Misma dirección de destino o dirección de transmisión

Modo de transmisión de punto fijo: Este modo es adecuado cuando se requiere transmitir datos predefinidos o periódicos (por ejemplo, información de sensores o datos de medición en intervalos fijos). En este modo, el módulo LoRa transmite datos a una dirección fija a intervalos predefinidos. Queda en evidencia que la forma correcta de utilizar el módulo LoRa es mediante su modo de trabajo de transmisión transparente y por esta razón se deben cumplir los requisitos que solicita este modo de trabajo para realizar una correcta comunicación , la que puede entenderse de mejor manera en la figura 2-2.

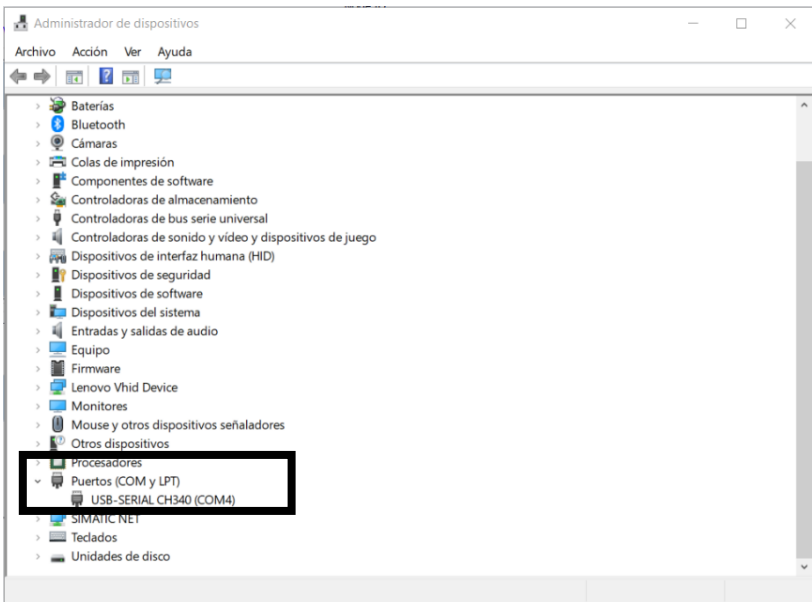


Fuente: USR IOT. (2018). USR-LG206-P User Manual

Figura 2-2 Esquema conexión modo transparente

Configuración de módulo USR-LG206

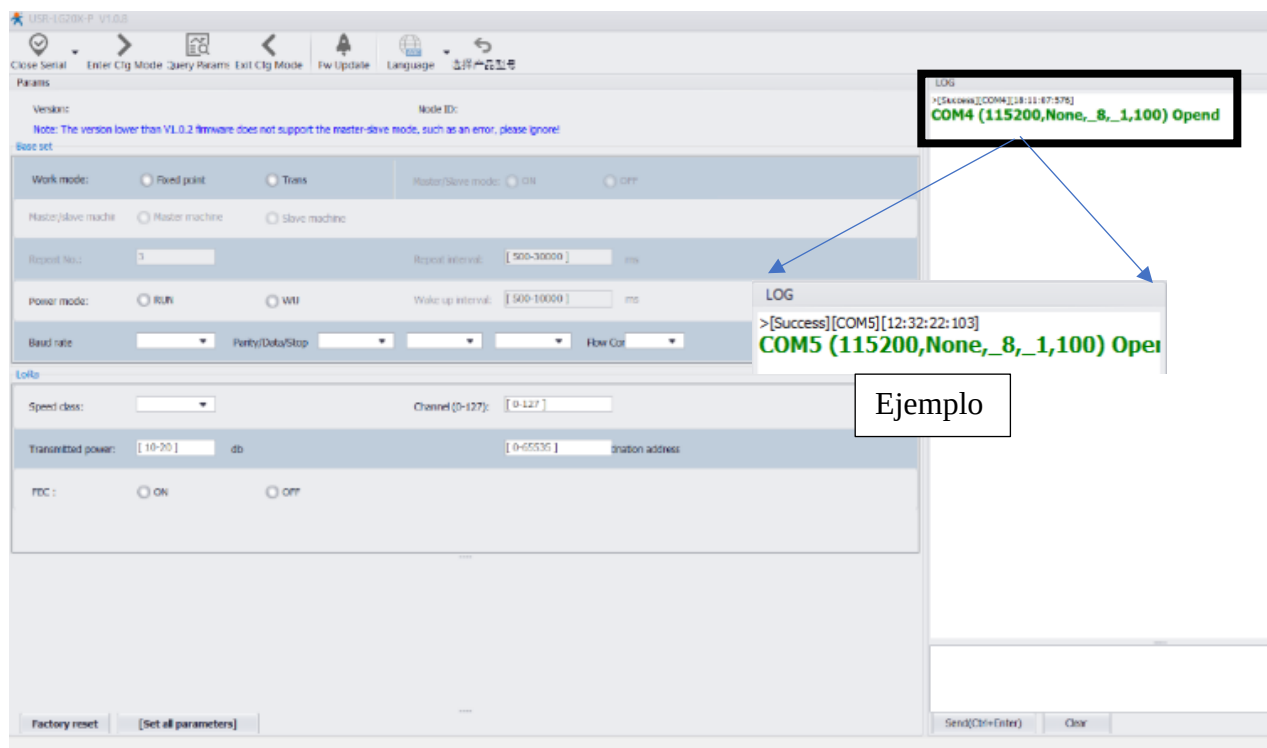
1. Verificación de conexión en puerto COM, según lo presentado en Figura 2-3, Módulo LoRa USR-LG206 es reconocido en puerto COM4.



Fuente: Administrador de dispositivos, 2024. WIN 10.

Figura 2-3 Identificación de puerto COM

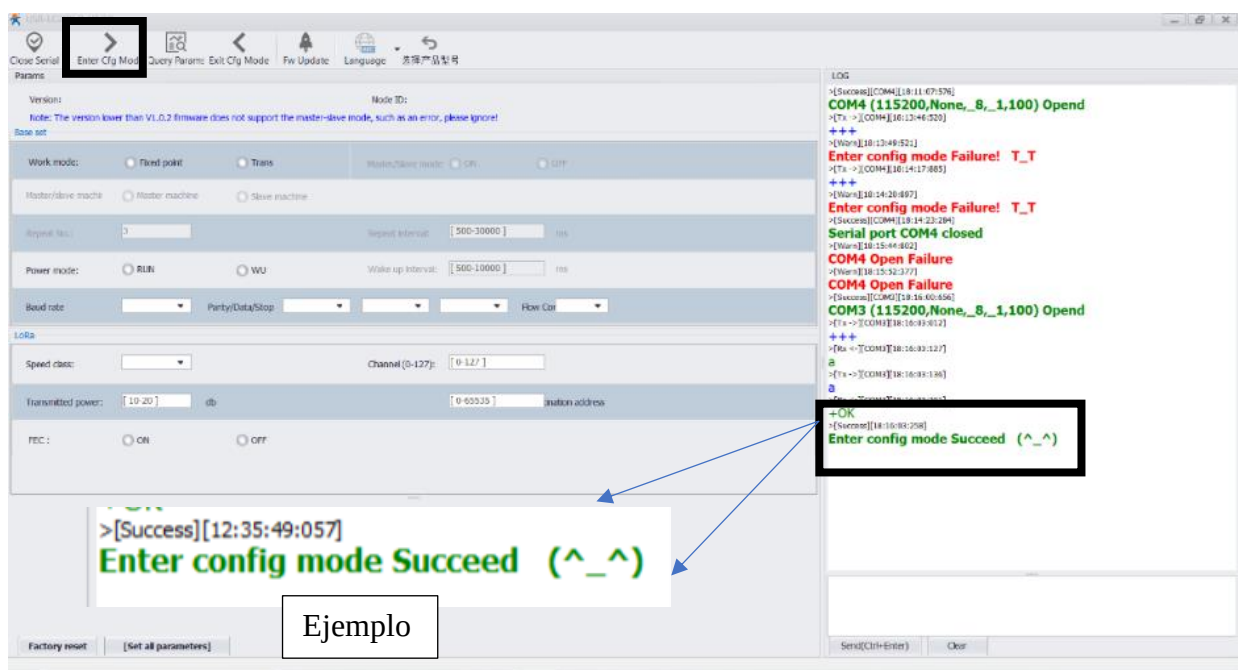
2. Pantalla de software de configuración de Módulo LoRa USR-LG206, se muestra en Figura 2-4 en recuadro azul del lado derecho de imagen la confirmación de comunicación exitosa entre módulo y computador a través de la conexión serial.



Fuente: Imagen real, software USR_LoRa para configurar modulo.

Figura 2-4 Software USR_LoRa 1

3. Pantalla de software de configuración de Módulo LoRa USR-LG206, se muestra en figura 2-5 en recuadro azul en lado superior izquierdo el botón de ingreso al menú de configuración y en recuadro de lado inferior derecho de la misma figura se observa mensaje de ingreso exitoso a menú de configuración de módulo.



Fuente: Imagen real, software USR_LoRa para configurar modulo

Figura 2-5 Software USR_LoRa 2

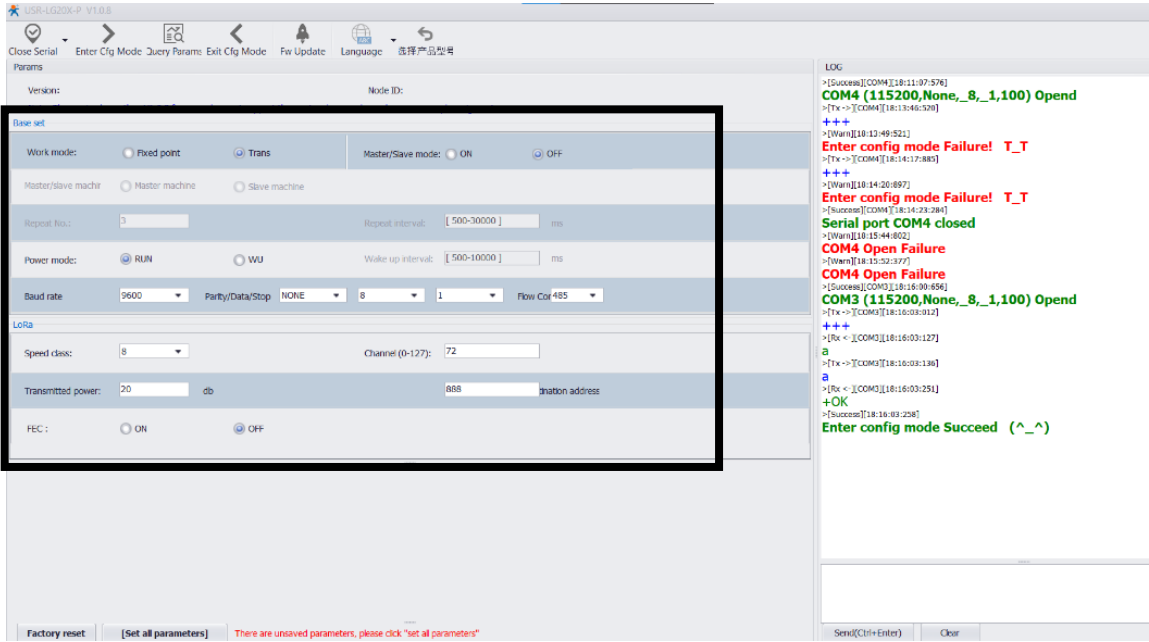
4. Al acceder al menú de configuración, se completan los parámetros de acuerdo con lo indicado en Tabla 2-2.

Tabla 2-2. Parámetros configuración Modulo USR-LG206

Parámetro	Valor	Función
Work mode	Trans	Selección modo de transmisión transparente
Master/Slave mode	OFF	OFF; ambos dispositivos pueden enviar/recibir datos
Power Mode	RUN	Equipo se encuentra siempre energizado
Baud Rate	9600	Se elige la misma tasa de transmisión entre inversor y Smart Meter
Parity	NONE	Tipo de paridad utilizado para la detección de errores en la transmisión de datos.
Data	8	Número de bits de datos en cada byte transmitido
Stop	1	Número de bits de parada al final de cada byte transmitido
Flow Control	485	Tipo de conexión de entrada al módulo LoRa
Speed Class	8	Ajusta la velocidad de transmisión del módulo LoRa
Channel	72	Canal de frecuencia en el que el dispositivo LoRa transmitirá
Tramited power	20	Ajusta la potencia de transmisión (en dBm) del dispositivo LoRa
Destination address	888	Canal de transmisión de datos
FEC	OFF	Corrección de pérdida de datos

Fuente: Elaboración propia en base a investigación.

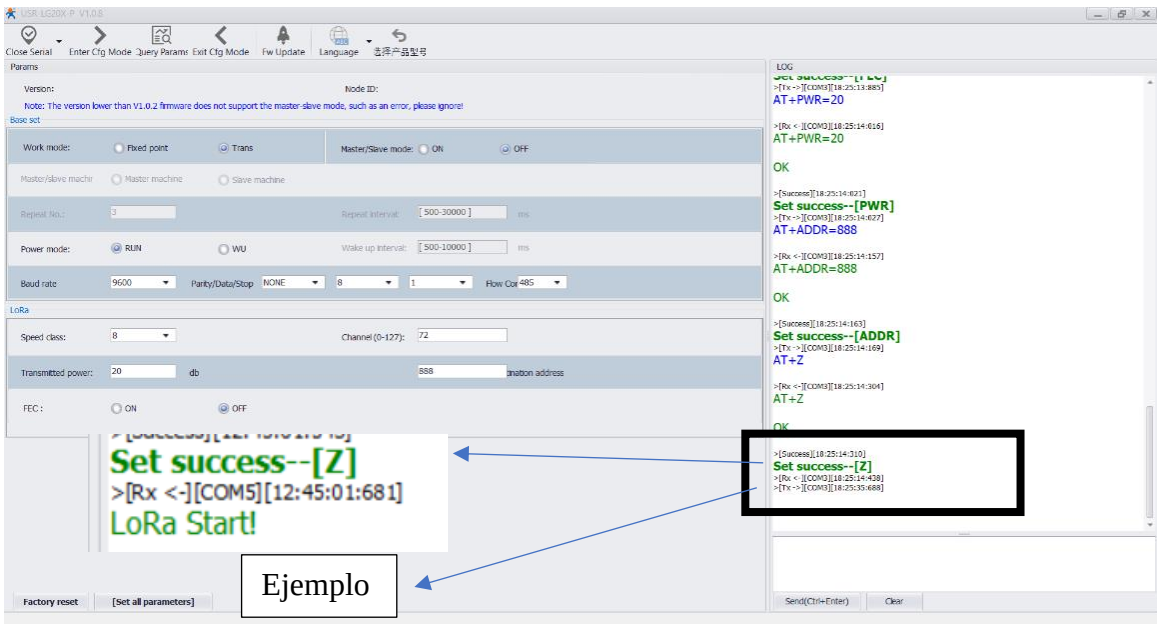
Se observa en figura 2-6, en recuadro azul central los parámetros descritos en Tabla 2-2 ya ingresados al menú de configuración del Módulo LoRa USR-LG206.



Fuente: Imagen real, software USR_LoRa para configurar módulo

Figura 2-6 Software USR_LoRa 3

5. Pantalla de software de configuración de Módulo LoRa USR-LG206, se muestra en figura 2-7 en recuadro de lado inferior derecho de imagen mensaje de ingreso exitoso que la configuración de parámetros fue aceptada exitosamente.



Fuente: Imagen real, software USR_LoRa para configurar modulo

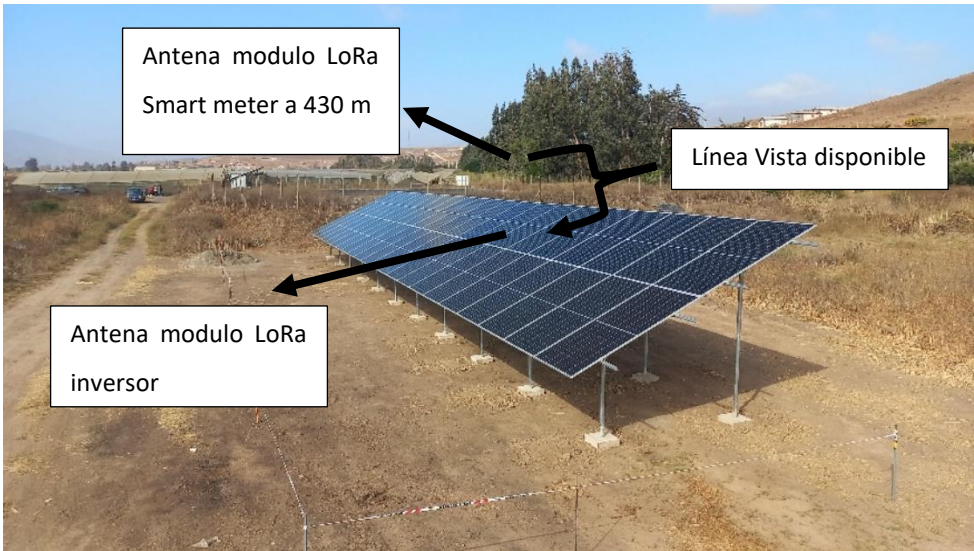
Figura 2-7 Software USR_LoRa 4

Diseño físico de la solución

Se debe entender primero que el sector es un lugar con mucha vegetación y bosque, además de ser un emplazamiento privado, con muchos usuarios. Por lo cual rebajar árboles o mover obstáculos que se encuentren en el camino no son opciones viables, se debe poder adecuarse a las condiciones y buscar una comunicación exitosa bajo estos términos.

Dentro de las condiciones que se cuenta para la construcción del proyecto, se buscara alcanzar los mejores indicadores para las condiciones físicas de una instalación con antenas, a continuación, se enumeran las más importantes:

- a) Línea vista: Corresponde a un camino directo, despejado y sin obstrucciones entre la antena transmisora y la antena receptora, puede afectar en la perdida de señal y atenuación, disminución de la velocidad de transmisión y reducción del alcance de transmisión, esta situación puede apreciarse en Figura 2-8.



Fuente: Foto real proyecto fotovoltaico, Coop. M. Alfonso, Longotoma

Figura 2-8 Análisis línea vista

b) Zona de Fresnel: La zona de Fresnel es una serie de regiones en forma de elipse alrededor de la línea de visión directa que también debe estar libre de obstrucciones para evitar la degradación de la señal, usualmente se evalúa hasta la tercera zona de Fresnel, para fines de este trabajo, se considera solo la primera zona. Por lo cual se buscará confirmar una disponibilidad de al menos un 60% de espacio en la primera zona.

Fórmula simplificada Z.F:

$$r = 17.32\sqrt{\frac{d}{f}}$$

r = radio de la zona de Fresnel en metros.
 d = distancia total entre las dos antenas en kilómetros.
 f = frecuencia de la señal en GHz.

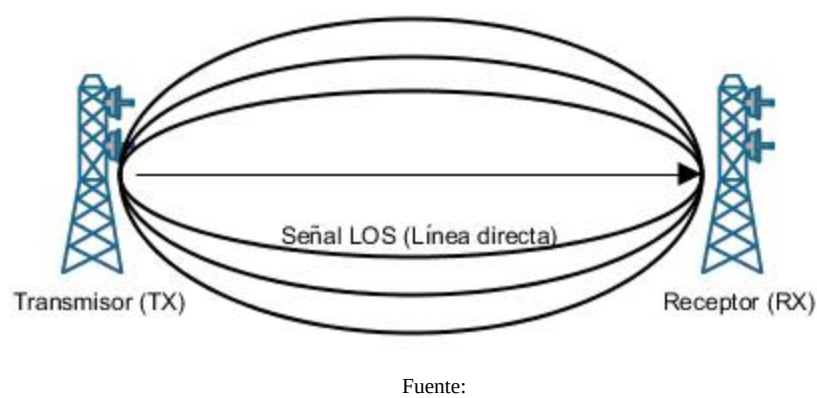


Figura 2-9 Esquema explicativo Zona de Fresnel

Los parámetros que se relacionan con el cálculo de la zona de Fresnel se pueden observar en figura 2-9, y sus resultados son presentados en tabla 2-3, con los cuales se obtiene los valores finales de:

Valor zona de Fresnel: 12.19 m
Valor 60% libre: 7.3 m

Tabla 2-3. Parámetros de cálculo Z.F

Parámetro	sigla	Valor
Radio de la zona de Fresnel	r	12.19 m
Distancia entre las antenas	d	0,43 km
Frecuencia en GHz.	f	0.868 GHz

Fuente: Elaboración propia en base a formula simplificada de ZF

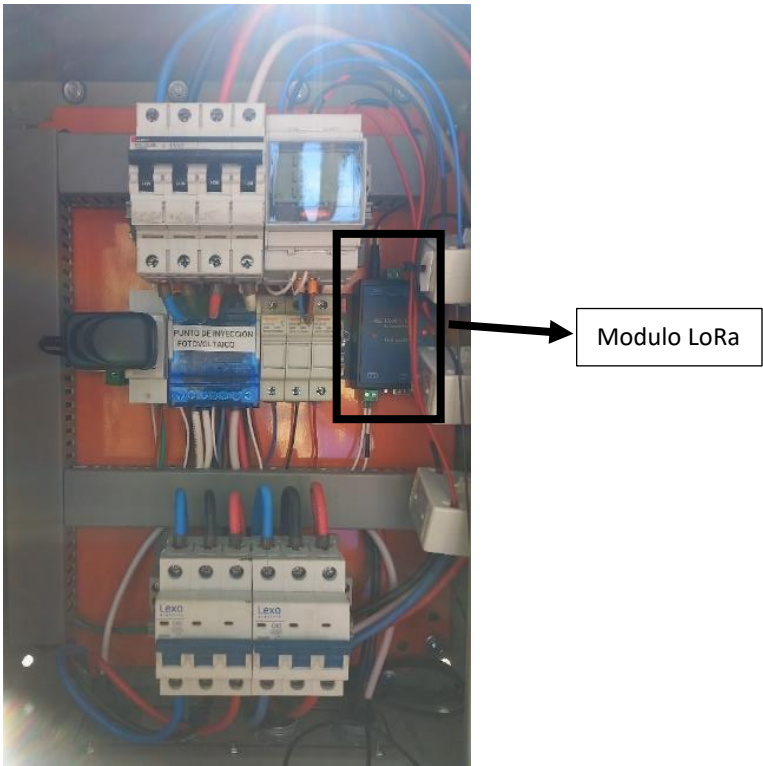
2.2 **DESARROLLO DE LA SOLUCIÓN**

En esta sección se abordará el proceso de implementación de la solución y los resultados obtenidos en la primera prueba.

Se ajustaron los tableros eléctricos perteneciente al inversor y al Smart Meter para acoplar los módulos LoRa USR-LG206 de la forma más segura posible, dado que es una instalación a la intemperie, y, además, evitar el manejo por parte de usuarios no calificados, pensando en que puedan quedar instalados de forma permanentes.

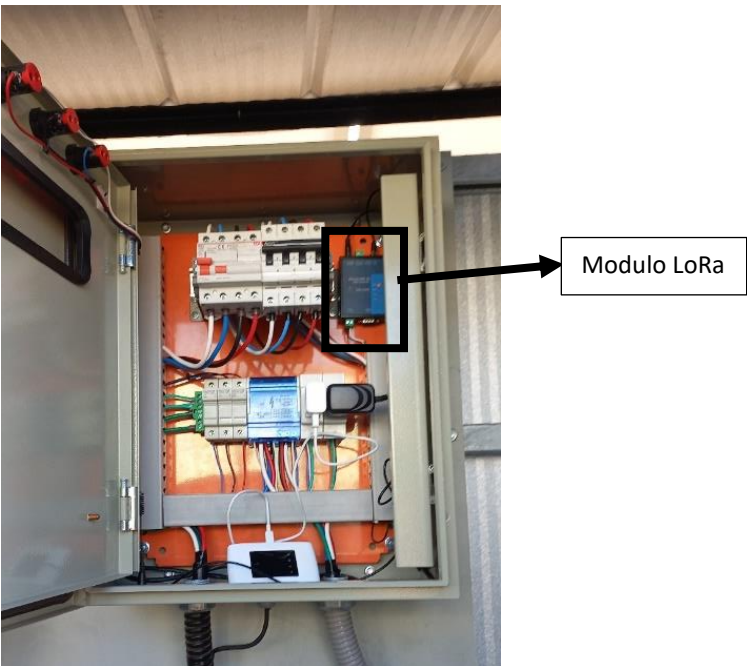
2.2.1 **Implementación de la solución**

En las figuras que se presentan a continuación se muestran los tableros eléctricos existentes reales de la instalación fotovoltaica. Con los módulos instalados de forma preliminar al interior del tablero. Donde en la figura 2-10 se observa el tablero eléctrico que aloja al Smart Meter y en figura 2-11 el tablero eléctrico que aloja las protecciones eléctricas pertenecientes al inversor fotovoltaico, éste se encuentra en la caseta instalada debajo de la estructura de los paneles fotovoltaicos.



Fuente: Foto real proyecto fotovoltaico, Coop. M. Alfonso, Longotoma

Figura 2-10 Tablero eléctrico original Smart Meter



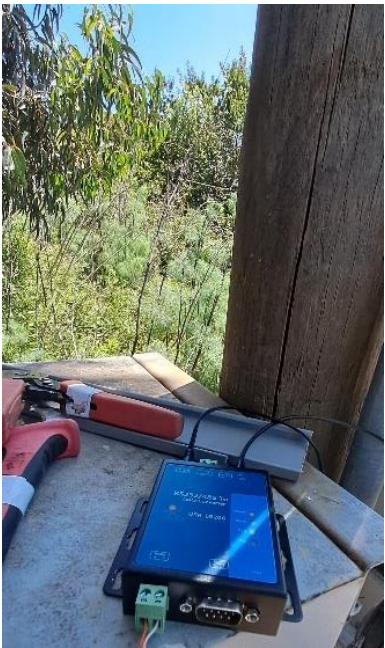
Fuente: Foto real proyecto fotovoltaico, Coop. M. Alfonso, Longotoma

Figura 2-11 Tablero eléctrico original Fotovoltaico

Los tableros presentados en las figuras 2-10 y 2-11 fueron intervenidos para mejorar las condiciones de trabajo en la prueba en terreno. Estas pruebas fueron llevadas a cabo en las mismas instalaciones de la instalación fotovoltaica de Coop. Mariano Alfonso.

En primer lugar, los módulos LoRa fueron retirados de los tableros para obtener la mayor distancia posible para la instalación de las antenas, buscando evadir la mayor cantidad de obstáculos posibles considerando que ya se cuenta con obstáculos por la vegetación del sector.

Esta situación es posible observarla en la figura 2-12, la cual esta capturada desde la perspectiva del tablero eléctrico que aloja el Smart Meter, es decir, en la misma posición del medidor eléctrico de la compañía eléctrica (CGE) y el tablero general de la instalación. A continuación, se muestra en la figura 2-12 al módulo LoRa fuera del tablero eléctrico que aloja el Smart Meter, desde donde se encontraba instalado según figura 2-10.



Fuente: Foto real proyecto fotovoltaico, Coop. M. Alfonso, Longotoma

Figura 2-12 Módulo fuera del tablero Smart Meter

De acuerdo con lo explicado en el párrafo anterior, en figura 2-12 el módulo LoRa ya se encuentra fuera del tablero eléctrico, y además en figura 2-13, se pueden apreciar que las conexiones del Smart Meter fueron extendidas para lograr la mayor distancia posible de desplazamiento de la antena de señal.



Fuente: Foto real proyecto fotovoltaico, Coop. M. Alfonso, Longotoma

Figura 2-13 Extensión de conexión de comunicación Smart Meter

Las conexiones al módulo LoRa desde el Smart Meter constan de 2 cables de comunicaciones, los que se denominan entrada A y B, esas conexiones equivalen a las conexiones RS485A y RS485B de la conexión D+ y D- del Smart Meter a inversor, sin embargo, el módulo LoRa no cuenta con conexión de GND. Con esto se refiere a que de forma física no necesita la conexión, siendo una condición del diseño del módulo.

En figura 2-14, se puede observar la vegetación que existe al frente de la antena emisora de la señal del módulo LoRa que corresponde al Smart Meter.



Fuente: Foto real proyecto fotovoltaico, Coop. M. Alfonso, Longotoma

Figura 2-14 Obstáculos de vegetación

Para disminuir el efecto que se pudiera ocasionar por esta condición del terreno, se levantó la antena hasta el punto más alto posible que correspondía al rollizo de madera que sostiene el cable del tendido eléctrico interno, aproximadamente a una altura de 4 metros. Tal como se puede observar en figura 2-15.



Fuente: Foto real proyecto fotovoltaico, Coop. M. Alfonso, Longotoma

Figura 2-15 Extensión de conexión de comunicación

Esta misma situación se replicó en el tablero que está situado en la instalación de los paneles fotovoltaicos y que aloja al segundo módulo LoRa que se conecta al inversor, a continuación, se presentan los cambios introducidos a la instalación original del módulo LoRa correspondiente al tablero del inversor fotovoltaico, con el fin de lograr ganar la mayor distancia para la instalación de las antenas de comunicación. En figura 2-16 se puede notar como el módulo LoRa perteneciente al tablero fotovoltaico se encuentra fuera del tablero y con una extensión del cableado de comunicación que llega al inversor.



Fuente: Foto real proyecto fotovoltaico, Coop. M. Alfonso, Longotoma

Figura 2-16 Módulo LoRa de Tablero FV

Además, en figura 2-17 se puede ver el lugar donde fue situada la antena, puesta en pilares de la estructura fotovoltaica, es importante recalcar que las fotos se tomaron con la antena en forma paralela al piso para ayudar con la captura de la imagen, situación que fue corregida posteriormente para corregir la posición a una vertical.



Fuente: Foto real proyecto fotovoltaico, Coop. M. Alfonso, Longotoma

Figura 2-17 Antena en soporte estructura FV

Con estas mejoras se logró obtener una línea vista descubierta desde el punto del tablero fotovoltaico hasta un tercio de la distancia total, esto se puede apreciar en figura 2-18. Se debe considerar que el poste de la estructura fotovoltaica se encuentra a unos 4 metros de altura.



Fuente: Foto real proyecto fotovoltaico, Coop. M. Alfonso, Longotoma

Figura 2-18 Línea vista desde tablero FV

Una vez que se completaron estos cambios se procedió a realizar la puesta en marcha del sistema fotovoltaico, el cual tiene una serie de pasos a seguir dependiendo del fabricante de cada equipo, para este caso al ser Fronius se siguieron los pasos sugeridos por este fabricante.

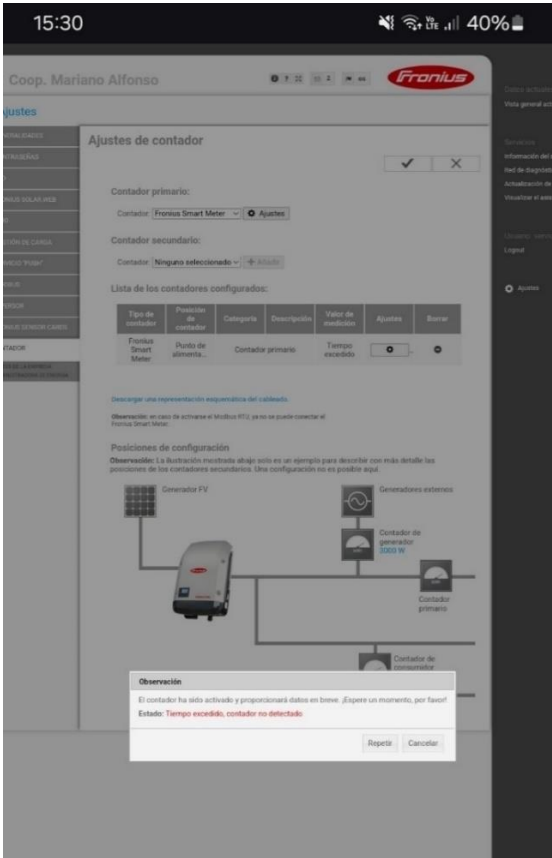
Dentro de estos pasos se encuentra el reconocimiento del Smart Meter con el Inversor fotovoltaico, siendo éste el paso inicial que debe cumplir la extensión de comunicación inalámbrica. El procedimiento seguido para el comisionamiento y creación de la planta fotovoltaica en el sistema de monitorio de Fronius fueron los siguientes:

Tabla 2-4. Actividades de comisionamiento

Número	Acción	Descripción
1	Energizar sistema fotovoltaico	Encender seccionador CC en ON y subir protección de AC
2	Datos iniciales de configuración de inversor	Ingresar valores de parámetros iniciales, fecha, hora, estándar eléctrico Chile, etc.
3	Activación de punto wifi de inversor	Activar punto wifi de inversor en herramientas de configuración del inversor
4	Enlazar inversor fotovoltaico con router de internet	En dirección IP local de inversor, designar el método de conexión a red por medio de un router inalámbrico.
5	Crear planta en sistema de monitoreo de Fronius	Seguir pasos de creación de planta fotovoltaica en monitoreo Fronius
6	Crear usuario service en sistema de monitoreo Fronius	Crear contraseña de usuario service para acceder a la configuración de contador, siendo este el nombre por el cual se idéntica al Smart Meter en el sistema.
7	Detección de contador fotovoltaico	Seleccionar contador como Smart Meter y activar su detección con la plataforma para seguir con la configuración de este componente.

Fuente: Recomendaciones de fabricante

De la forma como se detalla en la Tabla 2-4, es como se realiza la puesta en marcha inicial de casi cualquier planta fotovoltaica, siendo el paso número 7 el correspondiente en específico a esta marca de inversores. A pesar de muchos intentos, diversas modificaciones en la conexión y cambios sobre la marcha durante el día de prueba, no fue posible detectar el Smart Meter en la plataforma de monitoreo, el mensaje obtenido a través de la plataforma fue el que se presenta en la Figura 2-19.



Fuente: Plataforma de monitoreo proyecto fotovoltaico, Coop. M. Alfonso, Longotoma

Figura 2-19 Respuesta detección monitoreo en prueba terreno

Es importante detallar que las actividades descritas en los últimos puntos se realizaron durante un día completo laboral, en Longotoma, que se encuentra a 1 hora aproximadamente desde la oficina de la empresa ejecutora, a pesar de que se utilizó todo el tiempo disponible en acondicionar las conexiones e intentar distintos cambios para lograr el reconocimiento del Smart Meter en la plataforma, el resultado obtenido fue idéntico en todos los casos, tal como se muestra en la figura 2-19, no logrando completar la detección de este componente.

Con los resultados obtenidos en la prueba realizada en terreno, es posible formular algunas conjeturas. Una de las preguntas clave es si el desempeño observado puede atribuirse a las condiciones técnicas de la instalación, como la presencia de obstáculos naturales, incluyendo árboles, o quizás la excesiva distancia entre las antenas.

Otra posibilidad es que la extensión inalámbrica para una conexión mediante el protocolo RS485 entre un inversor y su Smart Meter pueda no ser técnicamente viable. Estos aspectos serán evaluados con mayor detalle en el desarrollo del siguiente capítulo.

CAPÍTULO 3: ANÁLISIS DE RESULTADOS

3 ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se muestran los resultados de las pruebas realizadas en un entorno simulado, gracias al apoyo de la Universidad Técnica Federico Santa María y de la empresa ejecutar, donde se pudo poder contar con la misma marca y modelo de inversor, además la empresa a cargo del proyecto base facilito los módulos LoRa y un segundo equipo Smart Meter, siendo este el mismo modelo usado en la instalación real.

Es importante recalcar que esta simulación no podrá cumplir con las mismas condiciones técnicas de la instalación del proyecto base, dado que no existe un cable eléctrico que conecte el inversor al punto de conexión donde se encuentra el Smart Meter, ya que el inversor utilizado se encuentra fijo en una sala de laboratorio y no existen las condiciones para izar un cable eléctrico de más de 400 metros.

Por lo que el propósito de estas pruebas es validar si es posible la comunicación entre inversor y Smart Meter, situación que no se logró cumplir en la prueba de terreno, ya que el inversor utilizado nunca pudo detectar la señal del Smart Meter en el proceso de puesta en marcha.

Durante estas pruebas se realizarán ciertas adecuaciones para lograr el cometido de cumplir con la comunicación entre ambos equipos, dentro de ellas la más importante es el reemplazo de la antena de comunicación original de los módulos por una antena omnidireccional, situación que es posible de observar en la presentación de las pruebas N°4 a N°6.

3.1 PRUEBA EN LABORATORIO

Como se indicó al final del capítulo 2, la prueba en terreno fue realizada siguiendo todas las condiciones teóricas que podrían haber asegurado una conexión exitosa entre Smart Meter e inversor por medio de la extensión inalámbrica.

El hecho de que la prueba no haya entregado los resultados esperados indica una condición de diseño que debe ser evaluada. Sin embargo, no es suficiente con los resultados obtenidos para asegurar que la extensión no es posible. Se deben contrastar los resultados con otra prueba que simule la situación que se presenta en la instalación real.

Por otro lado, es importante recalcar que la opción de extender la comunicación debe ser una opción más viable que utilizar la opción recomendada por el fabricante, que es de un costo mayor. Por lo cual modificar los componentes con los que ya se cuenta no es una opción que pueda ser considerada. Es por esta razón que se construyó una simulación en laboratorio de un sistema de la forma más similar posible al proyecto real.

Esta simulación se realizó en los laboratorios de la carrera de T.U en Energías Renovables de UTFSM, edificio X, sede Viña del Mar. Esta simulación fue elaborada con los siguientes componentes

- 1 x Inversor Fronius Symo 3kW trifásico.
- 8 x paneles 335Wp.
- 1 x Smart Meter TS 5kA-3.
- 2 x Módulo LoRa USR LG206.

- Tablero eléctrico para pruebas.
- Antena omnidireccional 915Mhz para exterior, pruebas N° 4 y 5.

Los componentes utilizados en la construcción de la simulación son presentados en la Tabla 3-1.

Tabla 3-1. Detalle de componentes simulación laboratorio

Inversor fotovoltaico Fronius Symo 3kW montado en pared de laboratorio.	 
Tablero eléctrico de pruebas de elaboración propia.	
Smart Meter Fronius, modelo TS 5kA-3	

Fuente: Elaboración propia, en base a información real del proyecto.

Con respecto a las condiciones obtenidas en las pruebas de laboratorio, es necesario indicar que solo se contaba con los stocks de equipos disponibles, por lo cual descartar la opción de un mal funcionamiento de alguno de ellos reemplazando el mismo equipo, no era una opción posible, por el costo de un inversor o Smart Meter en un contexto de investigación universitaria.

Por otra parte, los módulos LoRa han sido sometidos a varios viajes de trabajo para realizar pruebas, en ambientes hostiles para equipos eléctricos por lo que su estado es algo que igual debe considerarse.

Con estos antecedentes se siguió el mismo el procedimiento de puesta en marcha que se detalló para las pruebas en terreno descritas en tabla 2-4 de actividades de comisionamiento.

Después de muchas pruebas y modificaciones a la conexión, y con más de un día de pruebas, el resultado que se obtuvo fue exitoso para distancias pequeñas, sin embargo, al separarse a una distancia mayor (248 metros) similar a la distancia que se presenta en terreno, no fue posible obtener una detección del Smart Meter por parte del inversor, solo se obtuvo el mensaje de la plataforma de detección fallida del Smart Meter o contador a través de la plataforma de monitoreo. Por esta razón para las pruebas 4, 5 y 6 se decidió reemplazar las antenas originales de los módulos por una antena omnidireccional. Estos resultados se exponen a continuación.

3.1.1 Prueba N°1

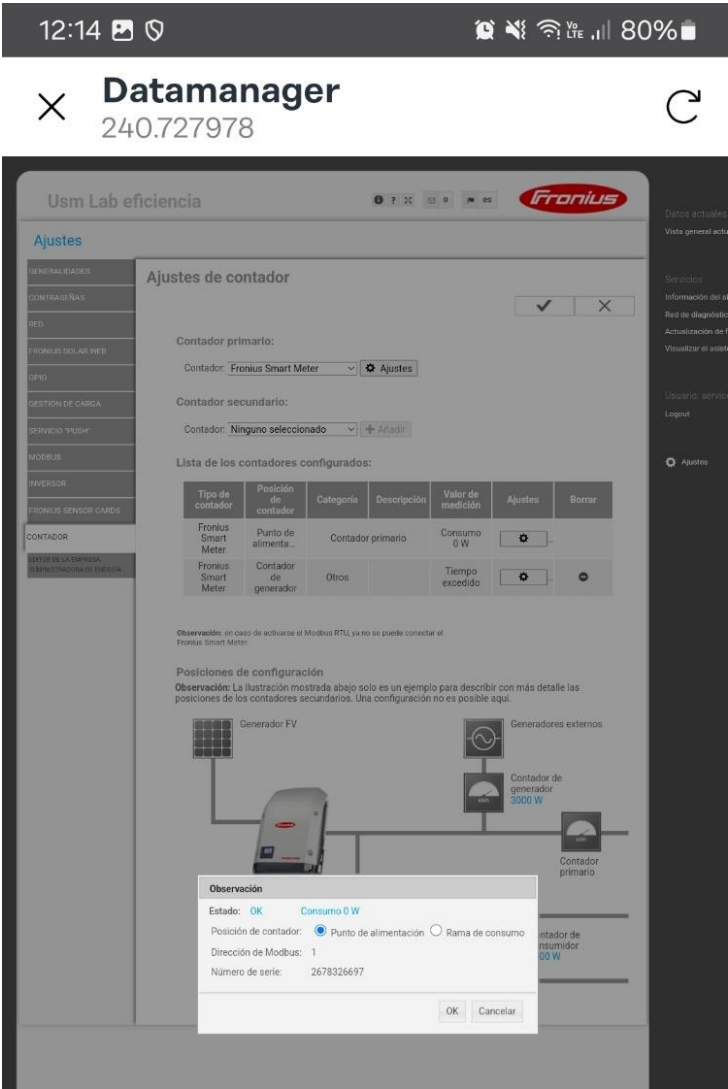
El resultado de esta prueba fue exitoso, ya que se logró una detección del Smart Meter por parte del monitoreo en línea del sistema Fronius. Las antenas de los módulos se instalaron a una distancia de 1 metro, tal como se aprecia en la Figura 3-1.



Fuente: Simulación en laboratorio, prueba 1, T.U en Energías Renovables de UTFSM, sede Viña del Mar

Figura 3-1 Módulos LoRa a 1 metro

Y en figura 3-2 se puede observar como el contador fue detectado por la plataforma de monitoreo, siendo ésta la condición técnica para confirmar que la extensión inalámbrica funciona.



Fuente: Plataforma de monitoreo prueba laboratorio, prueba 1, T.U en Energías Renovables de UTFSM, sede Viña del Mar.

Figura 3-2 Detección de Smart Meter en prueba 1

3.1.2 Prueba N°2

El resultado de esta prueba al igual que el de la prueba 1 fue exitoso. Se logró una detección del Smart Meter por parte del monitoreo en línea del sistema Fronius. En este caso los módulos se instalaron a una distancia de 8 metros, teniendo una pared de concreto como obstáculo, tal como se aprecia en la figura 3-3.



Fuente: Simulación en laboratorio, prueba 2, T.U en Energías Renovables de UTFSM, sede Viña del Mar.

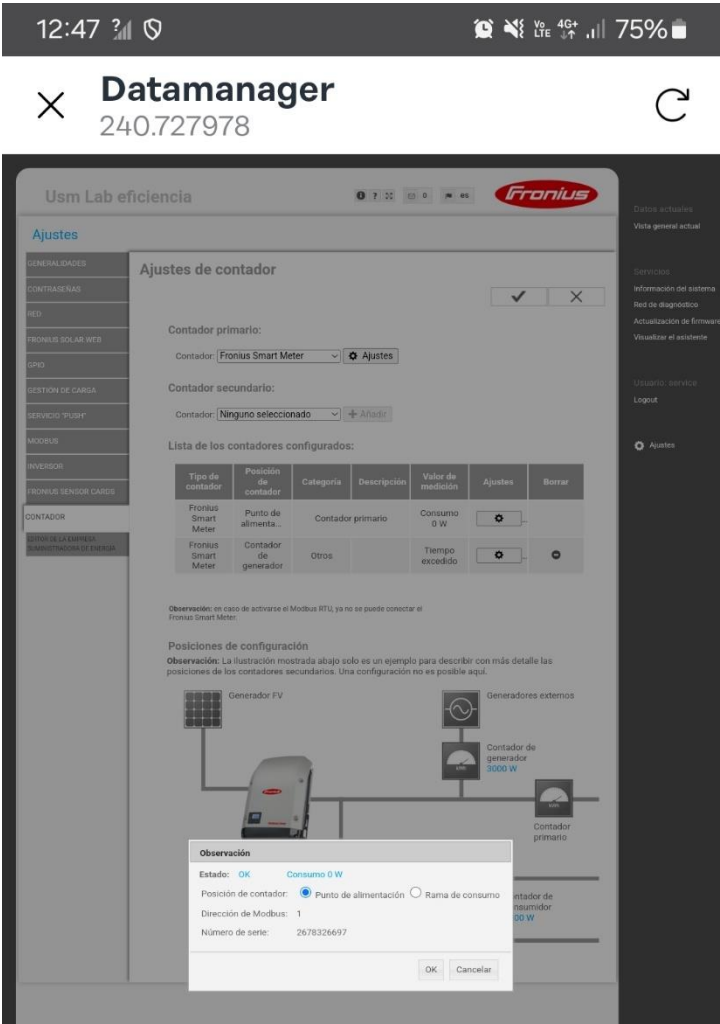
Figura 3-3 Lugar de instalación en prueba 2



Fuente: Simulación en laboratorio, prueba 3, T.U en Energías Renovables de UTFSM, sede Viña del Mar.

Figura 3-6 Lugar de instalación en prueba 3

En figura 3-7 se puede observar como el contador fue nuevamente detectado por la plataforma de monitoreo en la prueba N°3.



Fuente: Plataforma de monitoreo prueba laboratorio, prueba 3, T.U en Energías Renovables de UTFSM, sede Viña del Mar.

Figura 3-7 Detección de Smart meter en prueba 3

3.1.4 Prueba N° 4

Inicialmente esta prueba había dado un resultado negativo para el mismo procedimiento realizado en las pruebas 1,2 y 3, teniendo como respaldo el hecho de que la comunicación se había logrado en distancias cercanas, se decidió reemplazar la antena original del módulo LoRa por una de tipo de omnidireccional y mayor ganancia. La nueva antena utilizada se presenta en figura 3-8.



Fuente: Simulación en laboratorio, prueba 4, T.U en Energías Renovables de UTFSM, sede Viña del Mar.

Figura 3-8 Antena omnidireccional 915Mhz para exterior

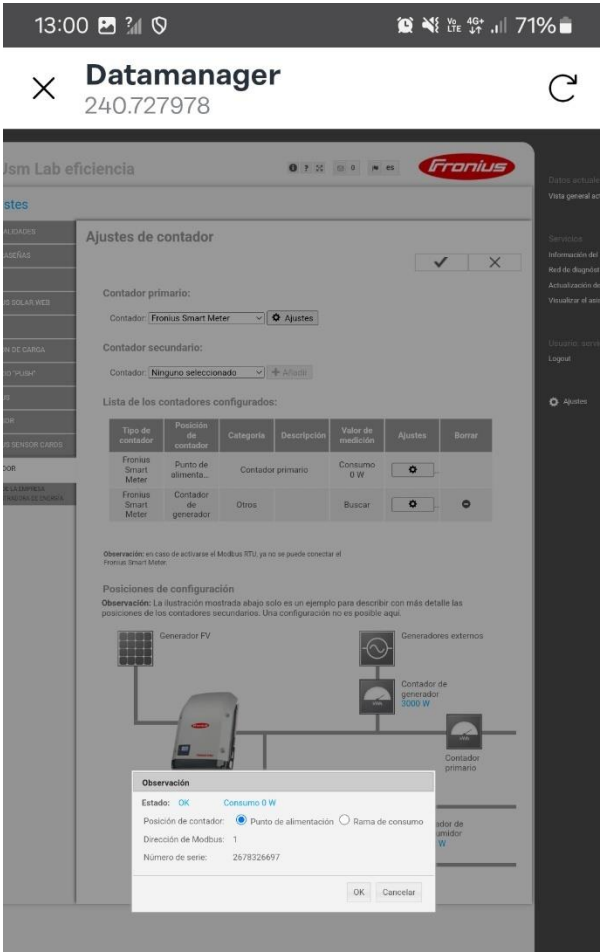
Esta prueba fue realizada situando el Smart Meter en el edificio C de la sede Viña del Mar y el inversor, como en todas las pruebas, conectado en el edificio X. Ambos edificios se encuentra a una distancia lineal de 285 metros y con un perfil de elevación con una diferencia de 1 metro de altura, estando el edificio C a145 ms.n.m. y el edificio X a 146 ms.n.m. La distancia entre ambos edificios de presenta en la figura 3-9.



Fuente: Google Earth. UTFSM, sede Viña del Mar

Figura 3-9 Esquema distancia entre edificio C y X, en prueba N°4

En Figura 3-10 se puede observar como el contador fue detectado por la plataforma de monitoreo correspondiente a la prueba N°4.



Fuente: Plataforma de monitoreo prueba laboratorio, prueba 4, T.U en Energías Renovables de UTFSM, sede Viña del Mar.

Figura 3-10 Detección de Smart meter en prueba 4

3.1.5 Prueba N°5 y adquisición de datos

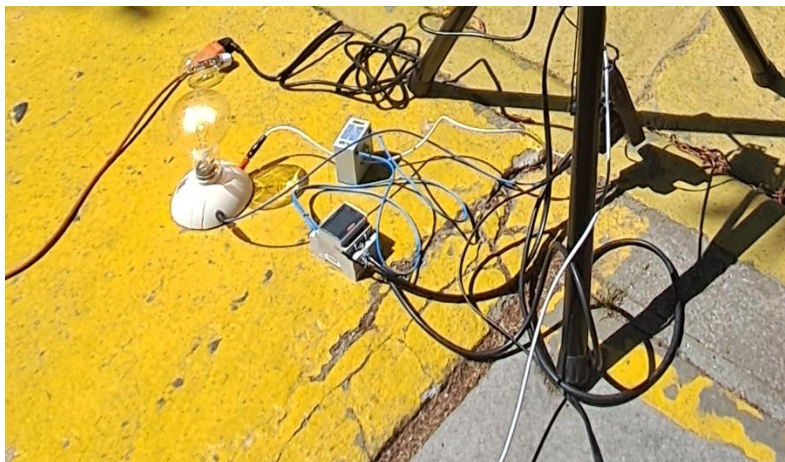
Como se indicado al inicio de este capítulo, las condiciones para replicar el proyecto base en este estudio, en términos de la extensión de la línea eléctrica de 400 metros hasta el tablero eléctrico que aloja el Smart Meter, no son viables. En este caso, la comunicación establecida entre el Smart Meter y el inversor en las pruebas anteriores alcanza la distancia de 285 metros, la cual se ha considerado similar a la del caso real en cuanto a la cobertura de las antenas. Por lo tanto, es necesario ahora verificar que el Smart Meter transmita información al inversor. Sin embargo, a diferencia de otros contadores digitales, el dispositivo utilizado en instalaciones fotovoltaicas no proporciona información visualizable directamente en el inversor, ya que este equipo consolida todos los datos recibidos y es en el portal de monitoreo, donde se visualizan en gráficos como los mostrados en las figuras 1-6 y 1-7.

Para esto se usó una carga simulada, leyendo su consumo a través del toroide del Smart Meter que utiliza para esta función, el consumo correspondió a un foco de luz de potencia variables entre 100W a 300W, la instalación completa puede observarse en las figuras 3-11 y 3-12. La distancia de separación entre antes fue la misma que la utilizada en prueba N°4.



Fuente: Simulación en laboratorio, prueba 5, T.U en Energías Renovables de UTFSM, sede Viña del Mar.

Figura 3-11 Instalación para prueba N° 5



Fuente: Simulación en laboratorio, prueba 5, T.U en Energías Renovables de UTFSM, sede Viña del Mar.

Figura 3-12 Consumo eléctrico simulado para prueba N° 5

El Smart Meter de forma local pudo leer el consumo a través del toroide y entregaba la información presentada en pantalla del equipo, en valores en kW, por esta razón en la pantalla se puede leer como 0.1 de consumo en la línea 1 (L1), esta situación se puede observar en la figura 3-13.

Finalmente, el consumo de corriente que se utilizó para la lectura fue de 0.3 A, correspondiente a lo presentado en figura 3-14.



Fuente: Simulación en laboratorio, prueba 5, T.U en Energías Renovables de UTFSM, sede Viña del Mar.

Figura 3-13 Información en pantalla de Smart Meter

Para poder leer la información enviada por el Smart Meter al inversor se utilizó el software Modbus Poll de esta manera se recibió la misma señal inalámbrica enviada al inversor. Para poder lograr esta situación se tuvo que averiguar las direcciones modbus de cada parámetro que envía el Smart Meter Fronius al inversor.

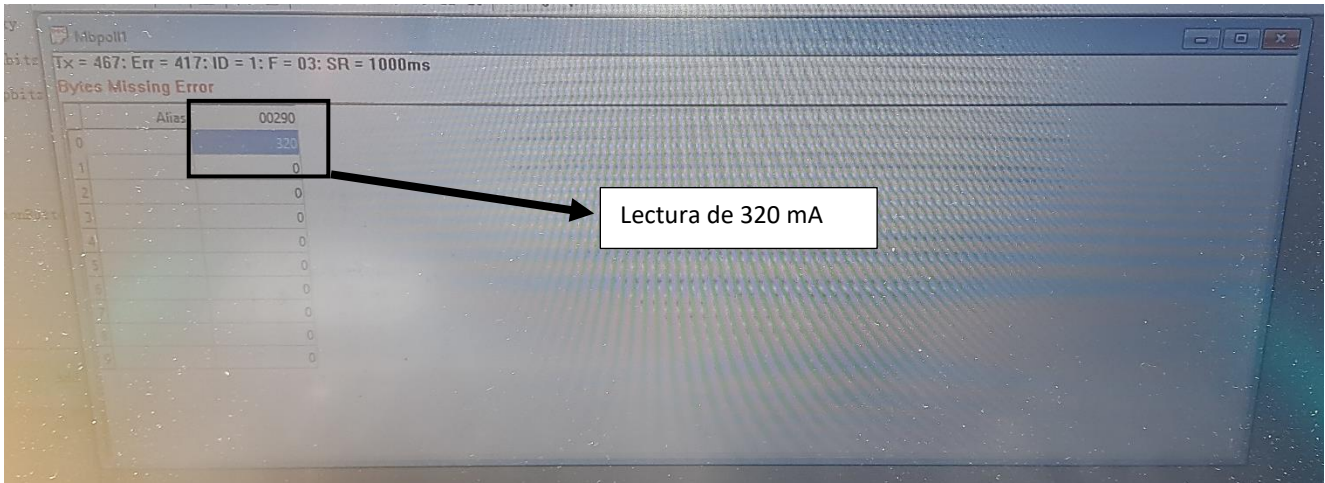
Algunas de estas direcciones se presentan la siguiente tabla 3-2.

Tabla 3-2 Registro de dirección Modbus

Registro	Descripción	Unidad
286 - 287	Voltaje AC -Fase a Fase	0.1 V
288 - 289	Voltaje AC Fase 1	0.1 V
290 - 291	Corriente AC Fase 1	mA
292 - 293	Potencia Real Fase 1	0.1 W
294 - 295	Potencia Aparente Fase 1	0.1 VA
296 - 297	Potencia Reactiva Fase 1	0.1 var
298 - 299	Factor de potencia Fase 1	0.001

Fuente: Elaboración propia, en base a información de registro Modbus Fronius.

Para presentar las informaciones correspondientes a potencia, el Smart Meter necesita tener conectada las cargas de las 3 líneas y las líneas de referencia, para este caso práctico solo se consideró una carga conectada a través del sensor de corriente de fase 1, por lo cual el registro solicitado fue el correspondiente al 290.



Fuente: Lectura de datos desde Smart Meter por software Modbus Poll.

Figura 3-14 Adquisición de datos por Software Modbus Poll

3.1.6 Prueba N° 6

Al tener la confirmación de que la conexión con antenas permite que el inversor fotovoltaico detecte al Smart Meter se hace necesario evaluar la intensidad de la transmisión de datos entre antenas, que es el punto de conexión más susceptible a pérdidas de paquetes de información. Sin embargo, se tiene la situación que en esta transmisión de información existe la comunicación alámbrica RS485 en los puntos finales de inversor y Smart Meter, y comunicación inalámbrica entre cada antena por medio de comunicación LoRa. Dada la poca distancia entre antenas e inversor y Smart Meter (2 m) se justifica asumir que no habrá pérdida de transmisión en este punto.

Bajo el punto anterior, la prueba elaborada para medir los parámetros de comunicación entre las antenas fue una transmisión de datos aleatorios, en formato numérico que son el mismo tipo utilizado para el envío de información entre Smart Meter al inversor, al enviar estos datos se utiliza el programa AT Setup para visualizar los valores de esta transmisión.

El emplazamiento donde se dispusieron las antenas fue la distancia entre el edificio M y el edificio R de la universidad, obteniendo una distancia de 213 metros.



Fuente: Google Earth. UTFSM, sede Viña del Mar

Figura 3-15 Esquema distancia entre edificio M y R, en prueba N° 6

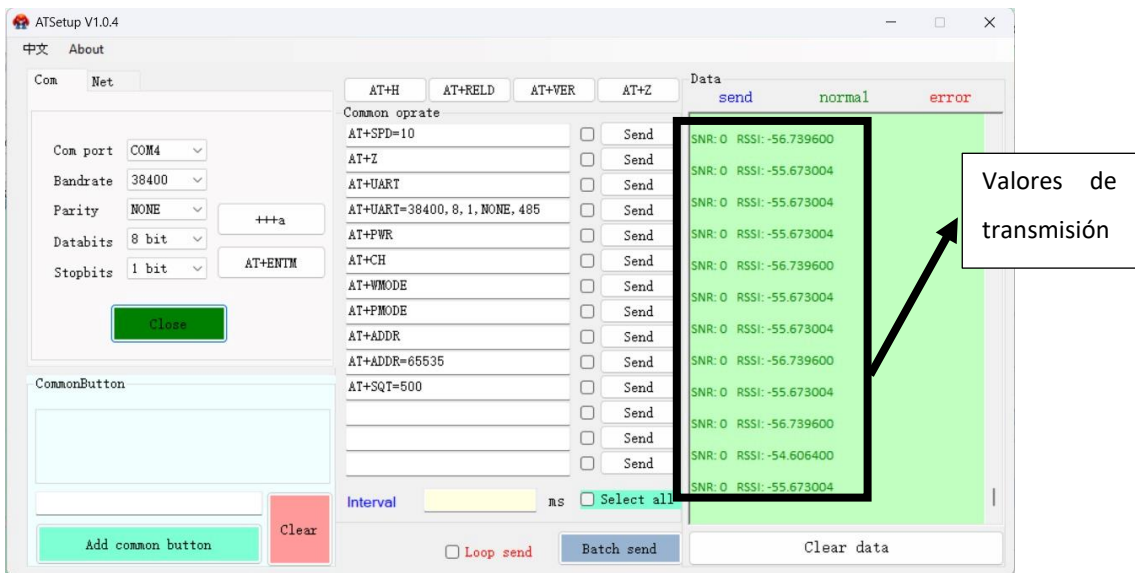
La figura 3-16 muestra la perspectiva desde la antena situada en la cercanía del edificio R de la universidad.



Fuente: Simulación en laboratorio, prueba 6, UTFSM, sede Viña del Mar.

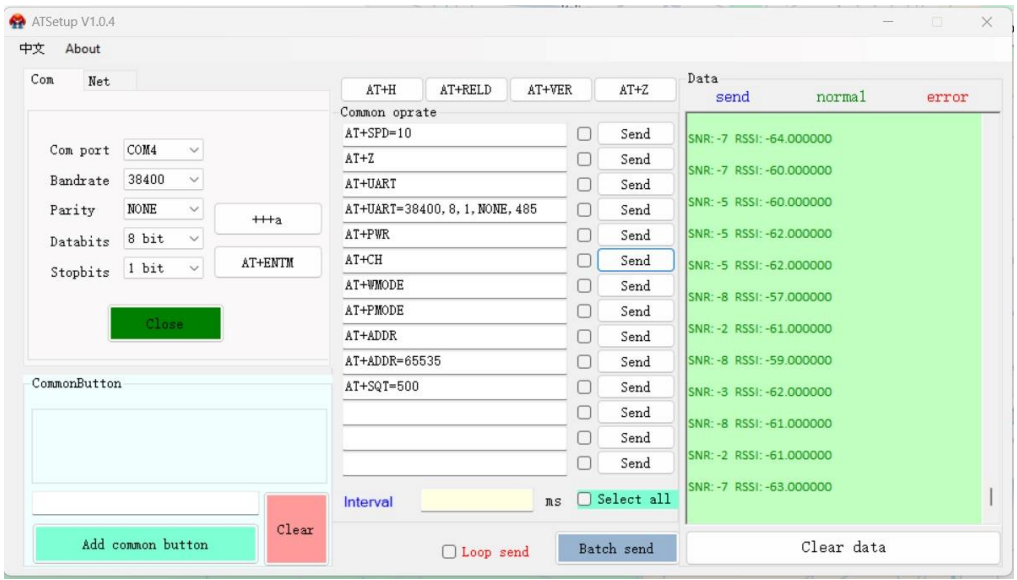
Figura 3-16 Antena omnidireccional 915Mhz para exterior en prueba N°6

Con las antenas instaladas en los edificios R y M, y procurando mantener una línea vista lo más directa posible, se obtuvieron los valores de transmisión presentados en la figura 3-17, siendo estos resultados los considerados para el posterior análisis, de igual manera se fue variando la posición de las antenas dentro del perímetro cercano a los edificios M y R, obteniendo cambios en los valores de transmisión, como por ejemplo los de la figura 3-18, lo que demuestra que la posición y la posibilidad de tener una línea vista libre y despejada de obstáculos, genera un efecto en la calidad de la transmisión de los datos.



Fuente: Lectura de datos entre antenas por software AT Setup

Figura 3-17 Software AT Setup Valores transmisión de datos



Fuente: Lectura de datos entre antenas por software AT Setup

Figura 3-18 Software AT Setup Valores transmisión de datos 2

Por medio de la figura 3-18, que muestra a través de datos, que el cambio de una posición que afecte a la línea visa entre antenas provoca cambios en la calidad de transmisión por medio de la caída del parámetro SNR, comprobando que además de los componentes técnicos requeridos para lograr la conexión inalámbrica se debe asegurar las mejores condiciones de instalación.

De acuerdo con la información presentada en las figuras 3-17 y 3-18, se debe explicar que los parámetros asociados a la calidad de transmisión de datos como el SNR o relación Señal/Ruido y RSSI o indicador de intensidad de señal recibida tienes las siguientes características: El primero se mide en dB y usualmente mientras mayor sea el valor mejor comunicación, este parámetro corresponde a la diferencia entre la potencia de la señal útil y la potencia del ruido en el canal de comunicación. En el caso del RSSI, que se mide en dBm, es la potencia de la señal inalámbrica recibida y mientras más cercano a 0 mejor será la calidad de señal. En el caso de una señal inalámbrica ambos parámetros deben ser evaluados en conjunto para concluir si una transmisión es eficiente.

Ambos parámetros pueden analizarse según lo explicado en la Tabla 3-3.

Tabla 3-3 Rangos SNR y RSSI

Interpretación de rangos SNR y RSSI	
SNR	RSSI
SNR positivo (> 0 dB): Señal más intensa que ruido.	0 a -50 dBm: Intensidad de señal fuerte.
SNR cercano a 0 dB: Señal y ruido al mismo nivel, intensidad neutral.	-51 a -70 dBm: Intensidad de señal buena.
SNR negativo (< 0 dB): Ruido más fuerte que señal.	-71 a -85 dBm: Intensidad de señal aceptable.
	-86 a -100 dBm: Intensidad de señal débil.
	< -100 dBm: Sin intensidad de señal.

Fuente: Elaboración propia, en base a información requerida

Para el caso de los módulos utilizados modelo USR-LG206, los valores de sensibilidad de recepción y potencia en la transmisión inalámbrica detallados en Tabla 2-1. son los siguientes:

- Potencia de transmisión 10dBm ~ 20dBm
- Sensibilidad de recepción -138.5dBm

Esto quiere decir que el módulo LoRa funcionara correctamente hasta un nivel de recepción de -138.5dBm, y compensara el nivel de ruido con una potencia de transmisión de 10dBm ~ 20dBm. Por esta razón los valores obtenidos en la prueba de transmisión de datos presentados en figura 3-17 de un SNR = 0 y RSSI de -55, confirman que las antenas son capaces de transmitir datos de forma correcta a la misma vez que son reconocidas por el inversor fotovoltaico según lo explicado prueba Numero 5.

3.2 **RESUMEN DE PRUEBAS**

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en cada prueba y una evaluación critica con los datos obtenidos de cada una de ellas, la cual puede visualizarse en la tabla 3-4.

Tabla 3-4 Pruebas realizadas

Nombre prueba	Descripción	Resultado
Prueba terreno	Instalación de módulos en la instalación fotovoltaica base, con las antenas originales de los módulos y diseño teórico final.	Prueba negativa en la conexión, se teoriza que antenas originales de módulos no son aptas para condiciones del terreno.
Prueba Laboratorio N°1	Conexión entre inversor y Smart Meter con antenas originales de los módulos a 1 metro de distancia.	Prueba con resultados positivos, dispositivos logran conectarse.
Prueba Laboratorio N°2	Conexión entre inversor y Smart Meter con antenas originales de los módulos a 8 metros de distancia.	Prueba con resultados positivos, dispositivos logran conectarse.
Prueba Laboratorio N°3	Conexión entre inversor y Smart Meter con antenas originales de los módulos a 30 metros de distancia.	Prueba con resultados positivos, dispositivos logran conectarse.
Prueba Laboratorio N°4	Conexión entre inversor y Smart Meter con nuevas antenas omnidireccionales a 285 metros de distancia ya que antenas originales no logran conectar a esta distancia. Se confirma que problema son las antenas de transmisión.	Prueba con resultados negativos con la antena original, se mejora a antena omnidireccional.
Prueba Laboratorio N°5	Adquisición de datos enviados a inversor a 285 metros de distancia.	Registro de datos enviados a inversor.
Prueba Laboratorio N°6	Evaluación de valores de transmisión inalámbricos a 215 metros de distancia	Registro de datos valores de transmisión

Fuente: Elaboración propia, en base a información obtenida en pruebas.

3.3 PROPUESTA DE SOLUCIÓN

Por medio de las pruebas realizadas en el simulador de laboratorio se logró comprobar que es posible extender la comunicación inalámbrica entre inversor y Smart Meter por medio de una comunicación tipo LoRa, sin embargo, se debe utilizar una antena de transmisión con mejores prestaciones técnicas, esta situación deberá ser analizada según la distancia a cubrir.

Es por esta razón que la prueba en terreno dio resultados negativos, específicamente porque se utilizó la antena original del módulo LoRa USR-LG206.

En el caso de las pruebas 1, 2 y 3, donde la distancia entre antenas para cada prueba fue de 1 metro, 8 metros y 30 metros respectivamente, a pesar de que no se contaba con una línea vista libre aun así se obtuvo una detección del Smart Meter, y se utilizó la antena original del módulo, con lo que se puede asumir que la línea vista no es un impedimento para distancias cercanas, diferente a lo sucedido con distancias más grandes, como en las pruebas 4,5 y 6 donde la distancia entre antenas para cada prueba fue de 385 metros pruebas 4 a 5 y 213 metros para prueba 6, y se tuvo que utilizar la antena de tipo omnidireccional y mejores prestaciones técnicas, para lograr la conexión entre antenas.

Algunas de las similitudes presentadas entre la prueba en terreno y la prueba de laboratorio N°4, 5 y 6, son las que se listan a continuación:

- Distancia considerable de separación entre antenas de comunicación.
- Sin línea vista directa.
- Interferencias en el camino de comunicación entre antenas.

Por lo cual se puede confirmar que, para corregir las condiciones de terreno, se debe considerar la adición de una antena de mayor capacidad de transmisión, como las utilizadas en las pruebas N°4, 5 y 6.

Para fines de este trabajo, se puede dar por confirmado que una extensión inalámbrica por medio de módulos LoRa es una opción viable y posible para una comunicación inalámbrica entre inversor fotovoltaico y Smart Meter, sin embargo, las condiciones físicas de la instalación serán las que determinen finalmente la capacidad técnica de las antenas de transmisión, ya sea un para distancias mayores a las estudiadas en este trabajo (Kilómetros) o demasiado obstáculos en el camino.

3.4 ANÁLISIS DE COSTOS

Para el siguiente análisis de costos se analizaron todos los componentes requeridos para llevar a cabo tanto las pruebas como las correcciones técnicas necesarias para lograr una correcta comunicación inalámbrica, mismos componentes que permitieron el conjunto de pruebas realizadas en laboratorio como la realizada en terreno. Lo que finalmente permite contar con un prototipo de solución para una extensión de una comunicación inalámbrica en un sistema de monitoreo fotovoltaico con distancias mayores a 300 metros entre inversor y Smart Meter.

Para el siguiente análisis de costos el valor de la UF corresponde a CLP 38.663, correspondiente al 01 de marzo del 2025 y el valor del sueldo de Ing. en Control e Instrumentación se ha tomado del estudio hecho por EducaLT para el año 2024 el cual asciende a un valor de \$2.018.726.

Tabla 3-5. Componentes para diseño de prototipo

N°	Componente	Valor mercado	Valor UF	Cantidad
1	Módulo LoRa USR LG206	\$58.731	1.519	2 und.
2	Cable conexión CAT 6E exterior	\$793	0.02	20 m
3	Terminal eléctrico de punta 22-18awg	\$180	0.004	12 und.
4	Antena externa omnidireccional 915Mhz, con 20 m de cable	\$100.000	2.58	2 und.
5	Cable coaxial para antena omnidireccional + conectores	\$1.090	0.03	20 m
6	Mástil para antena de transmisión 3 m con accesorios	\$61.459	1.58	1 und.
7	Conectores para tablero eléctrico (riel din, terminal PG, etc.)	\$20.000	0.51	1 und.
9	logística (transporte, alimentación)	\$25.000	0.64	4 días
10	Sueldo Ing. en Control e Instrumentación	\$67.290	1.74	6 días
11	Imprevistos	\$47.124, 10% valor total	1.21	N/A

Fuente: Elaboración propia, en base a información real del proyecto.

Algunas consideraciones importantes son por ejemplo que la cantidad total de días utilizados para las pruebas son de 4 días, donde se separan en 1 día para la prueba de terreno y 3 días para las pruebas de laboratorio. Además, el gasto de logística que considera el valor de transporte a la prueba a terreno y las pruebas realizadas en laboratorio de universidad son valorizadas dentro del mismo ítem, por lo que se presenta solo un valor total, lo mismo sucede con los costos de alimentación. Por otra parte, en cuando al sueldo del Ing. En Control e Instrumentación se calculan 6 días en total, siendo 4 días utilizados para las pruebas y 2 días para el diseño teórico de la solución y planificación de las pruebas, finalmente se considera un ítem de imprevistos correspondiente al 5% del valor total de los costos que asciende a \$942.481.

De esta forma el valor total de los costos asociados a desarrollar el prototipo para una comunicación inalámbrica a asciende al monto de:

- Valor CLP \$989.605
- Valor UF 25.59

Sin embargo, ahora que ya se cuenta con la confirmación del funcionamiento del prototipo es posible evaluar el costo de la aplicación del prototipo en una situación real, como la del proyecto base de esta investigación, para este cambio es necesario considerar solo 1 día para los ítems 9 y 10 de Tabla 3-6, considerando solo el día (1) de la instalación del prototipo y descartando los días requeridos para el diseño teórico, ya que se contaría previamente con este diseño gracias a lo

investigado en este trabajo. Los materiales de instalación que corresponden del ítem 1 - 8 y 11, se mantienen igual, con este cambio se actualiza el valor del prototipo al siguiente:

- Valor CLP \$557.582
- Valor UF 14.42

Siendo este el valor final para la solución conocida como Modulo Lora, presentada en la tabla de evaluación de soluciones de la Tabla 1-3.

CONCLUSIONES

El proceso de evaluar distintas opciones de desarrollo para una problemática real puede llegar a ser un proceso complejo y extenuante, especialmente si es una actividad con la que no se tiene experiencia. Pasar por las etapas de diseño conceptual, construcción del prototipo y evaluación de los resultados implica un arduo trabajo que usualmente presenta más situaciones de error que de éxito. Pero estas situaciones no deberían ser suficientes para no innovar en el desarrollo de un problema técnico.

La tecnología inalámbrica conocida como LoRa es un integrante reciente de la familia de las conexiones inalámbricas, por lo que apostar por ella es tremendamente rescatable, especialmente si no se tiene la certeza de que el diseño final sea exitoso.

El diseño conceptual revisado en esta investigación sienta un precedente sobre las condiciones que técnicas se deben asegurar para que los módulos LoRa puedan considerarse como una opción válida, al presentarse problemas de distancias excesivas (mayores a 300 metros) entre la conexión alámbrica del inversor fotovoltaico y su Smart Meter, si la conexión entre estos dispositivos es por medio del protocolo RS485, se puede tomar una opción válida al enlace inalámbrico de la tecnología de comunicación LoRa, lo que se espera que genere un precedente en futuras revisiones sobre este tema.

Se espera que las conclusiones extraídas en este trabajo contribuyan a mejorar la implementación de tecnologías LoRa en aplicaciones similares, promoviendo la innovación continua en el sector de la energía fotovoltaica y la comunicación inalámbrica.

BIBLIOGRAFÍA

Fronius (2015). How to set up Export Limiting Using the Fronius Smart Meter

Cárdenas, V. (2024). Comunicación de datos, UTFSM.

Fronius. (2023). Guía Rápida de inicio Fronius Smart Meter TS 5kA-3

Fronius. (2023). Instrucciones de operación Fronius Smart Meter TS 5kA

Cabrera, M. Rey, F. Tarrés, F. Técnicas de comunicación de espectro ensanchado, Universidad Oberta de Catalunya. 2012

Telecommunications Industry Association (TIA). (1998). TIA/EIA-485-A: Electrical Characteristics of Generators and Receivers for Use in Balanced Digital Multipoint Systems. Arlington, VA: Telecommunications Industry Association.