

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE LA SANTÍSIMA CONCEPCIÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA



UCSC

Análisis y caracterización del diseño de un Sistema Perfilador de Turbulencia Autónomo, proyecto de colaboración Chile-China

Hernán Daniel Abarzúa Riquelme

Informe de Habilitación Profesional para optar al título de:
Ingeniero Civil Eléctrico

Profesores Patrocinante:

Dr. Jaime A. Cariñe C.

Profesores Informantes:

Dr. Ricardo A. Bustos P.

Dr. Pablo F. García F.

Concepción, agosto de 2024

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE LA SANTISIMA CONCEPCION
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Eléctrica

Profesor Patrocinante:
Dr. Jaime A. Cariñe C.

Análisis y caracterización del diseño de un Sistema Perfilador de Turbulencia Autónomo, proyecto de colaboración Chile-China

Hernán Daniel Abarzúa Riquelme

Informe de Habilitación Profesional
para optar al Título de

Ingeniero Civil Eléctrico

Agosto 2024

Resumen

En este informe se entregan los aspectos fundamentales del estudio de un dispositivo medidor de turbulencia autónomo, diseñado para instalarse en el Observatorio Cerro Ventarrones (OCV), ubicado en Antofagasta, Chile. El dispositivo, conocido como Self-contained Turbulence Profiler (STP, por sus siglas en inglés), se ha diseñado para medir y caracterizar la turbulencia atmosférica en ubicaciones astronómicas remotas. En particular, se describe en detalle el diseño del medidor, sensor que utilizará, energía empleada para operar de forma independiente, su sistema de comunicación, procesamiento y almacenamiento de datos.

El informe también aborda la elección del lugar de instalación, destacando las razones para seleccionar Cerro Ventarrones, como lugar de implementación del medidor de turbulencia. Este lugar se está convirtiendo en un centro de desarrollo astronómico en colaboración con instituciones de renombre, ofreciendo condiciones atmosféricas favorables para la astronomía. El medidor de turbulencia autónomo presentará ventajas clave sobre otros dispositivos de medición de turbulencia, como su capacidad de movilidad, bajo mantenimiento y su autonomía en términos de energía y comunicación.

Este informe proporciona una visión detallada de un dispositivo que podría ser crucial para la caracterización de la turbulencia atmosférica en entornos difíciles como el Cerro Ventarrones, y su aplicabilidad en otras ubicaciones similares a nivel global.

Dedicado a Abdón Riquelme Rojas.

Agradecimientos

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento, primero a mi madre, Elsa Riquelme, por su amor incondicional, su fortaleza y por ser mi mayor apoyo en este camino. Agradezco también al Dr. Jaime Cariñe por su confianza y continuo aliento durante todo este proceso académico. A mi hermano Esteban Abarzúa, quien ha sido mi modelo a seguir e inspiración, le agradezco de corazón por su apoyo constante. A Evelyn Espinoza, mi compañera y confidente, gracias por tu apoyo incondicional y por estar a mi lado en cada paso. A mi familia, gracias por recordarme siempre la importancia de seguir adelante y por ser mi fuente constante de motivación. Asimismo, agradezco a mis compañeros, tanto a los presentes como a los que ya no están, por los buenos momentos compartidos y por hacer de esta experiencia algo inolvidable.

Además, quiero agradecer al proyecto CASSACA CCJRF2101, por brindarme el soporte necesario y la oportunidad de llevar a cabo este trabajo. Su apoyo ha sido fundamental para el desarrollo de esta investigación.

*“El hombre que mueve montañas
comienza cargando pequeñas piedras”*

CONFUCIO (551-479 a.C)
Escritor y filósofo chino

Tabla de Contenidos

LISTA DE TABLAS	VIII
LISTA DE FIGURAS	IX
NOMENCLATURA.....	X
ABREVIACIONES	XI
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. INTRODUCCIÓN GENERAL	1
1.2. PROBLEMA.....	1
1.3. ESTADO DEL ARTE.....	3
1.3.1 Análisis del estado del arte	5
1.4. MOTIVACIÓN	5
1.5. OBJETIVOS	6
1.5.1 Objetivo General.....	6
1.5.2 Objetivos Específicos	6
1.6. ALCANCES Y LIMITACIONES	6
1.7. METODOLOGÍA	6
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO	8
2.1. INTRODUCCIÓN	8
2.2. INFLUENCIA DE LA ATMÓSFERA EN LA OBSERVACIÓN ASTRONÓMICA.....	8
2.2.1 Turbulencia atmosférica	9
2.2.2 Seeing	10
2.2.3 Impacto en la calidad de observaciones astronómicas	11
2.2.4 Importancia del perfil de turbulencia local	12
2.3. TECNOLOGÍAS EXISTENTES	12
2.4. CARACTERÍSTICAS DE DISEÑO DEL STP	13
2.4.1 Arquitectura del STP	13
2.4.2 Estructura y diseño de Baseline para el STP	14
2.4.3 Electrónica	17
2.4.4 Sistema de alimentación del STP.....	18
2.4.5 Soluciones de comunicación.....	19
2.4.6 Adquisición de datos.....	19
2.5. IDENTIFICACIÓN DE DIFERENCIAS CLAVE Y VENTAJAS	20
2.6. CERRO VENTARRONES COMO LUGAR DE INSTALACIÓN.....	20
2.7. SUMARIO	22
CAPÍTULO 3. EVALUACIÓN Y DISEÑO DEL STP.....	23
3.1. INTRODUCCIÓN	23
3.2. CONTENIDOS.....	23
3.3. COMPARACIÓN CON OTRAS TÉCNICAS	24
3.4. DISEÑO DEL STP PARA OCV	25
3.5. SOFTWARE DE ADQUISICIÓN DE DATOS.....	27
3.6. ESTRUCTURA DE DATOS.....	29
3.7. REDUCCIÓN DE DATOS	29
3.8. SISTEMA DE COMUNICACIÓN.....	30
3.9. SISTEMA DE SUMINISTRO DE ENERGÍA PARA EL STP	30
3.10. SUMARIO	31
CAPÍTULO 4. ANÁLISIS ELECTRÓNICO DE LA OPERACIÓN DEL STP	32
4.1. INTRODUCCIÓN	32
4.2. EVALUACIÓN DE CARGA ELÉCTRICA DE OPERACIÓN DEL STP	32

4.2.1	Rapsberry Pi 4b	33
4.2.2	Driver ADC	35
4.2.3	Parámetros de operación	37
4.2.4	Sensor HAMAMATSU serie S1336.....	38
4.3.	CONSIDERACIONES	40
4.4.	ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS DE OPERACIÓN	41
4.5.	EVALUACIÓN FOTOVOLTAICA.....	44
4.5.1	Datos geográficos	45
4.5.2	Sitio.....	45
4.6.	CONDICIONES METEOROLÓGICAS DEL SITIO.....	47
4.6.1	Radiación	47
4.6.2	Ciclo diario de radiación.....	48
4.6.3	Viento	49
4.6.4	Inclinación de la instalación FV	50
4.7.	DISEÑO DEL SISTEMA FOTOVOLTAICO AISLADO	51
4.7.1	Dimensionamiento del panel solar.....	51
4.7.2	Dimensionamiento del sistema de respaldo	54
4.7.3	Dimensionamiento del regulador de carga	56
4.8.	EVALUACIÓN DE COSTO DEL SISTEMA FOTOVOLTAICO AISLADO.....	56
4.9.	SUMARIO	58
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES		60
5.1.	CONCLUSIONES.....	60
5.2.	TRABAJO FUTURO.....	60
BIBLIOGRAFÍA.....		61
ANEXO A. DATASHEETS.....		63
A.1.	PANEL SOLAR YI.SOLAR 150 W.....	63
A.2.	REGULADOR DE CARGA MPPT VICTRON.....	64
A.3.	BATERÍA ATEMPower 50AH / 12V	65
A.4.	BATERÍA RITAR 100AH / 24V	66
ANEXO B. SCRIPTS		69
B.1.	ESTIMACIÓN DE DATOS OBTENIDOS EN LABORATORIOS	69
B.2.	GRÁFICO DE RADIACIÓN GLOBAL MENSUAL PROMEDIO	70
B.3.	CICLO ANUAL Y DIARIO DE LA MAGNITUD DEL VIENTO	71
B.4.	RADIACIÓN GLOBAL DIARIA.....	72

Lista de Tablas

Tabla 3.1 Métodos para medir turbulencia atmosférica.....	25
Tabla 3.2 Formato de Mensaje RTU de MODBUS.....	28
Tabla 4.1 Voltaje y corriente en distintas condiciones de operación mostradas en fuente DC.	40
Tabla 4.2 Mediciones obtenidas en laboratorio. NAOC, China.....	40
Tabla 4.3 Parámetros estimados a partir de los valores de las mediciones en laboratorio.....	42
Tabla 4.4 Parámetros de los componentes del Sistema STP.....	44
Tabla 4.5 Ubicación geográfica del sitio Cerro Ventarrones.	45
Tabla 4.6 Radiación incidente global en plano horizontal e inclinado.	47
Tabla 4.7 Promedio horario de la radiación incidente en unidades de $[W/m^2]$	48
Tabla 4.8 Promedio mensual de la magnitud del viento.	49
Tabla 4.9 Promedio de la magnitud del viento para cada hora.	50
Tabla 4.10 Consumo energético diario del STP.....	52
Tabla 4.11 Peak Sun Hour inclinada en Cerro Ventarrones.	52
Tabla 4.12 Panel solar 150 W SLD-TECH.	53
Tabla 4.13 Verificación de suficiencia de potencia del sistema FV.	53
Tabla 4.14 Capacidad de respaldo de batería para diferentes duraciones.	55
Tabla 4.15 Evaluación de costos para 1 día de operación.....	57
Tabla 4.16 Evaluación de costos para 2 días de operación.	57
Tabla 4.17 Resumen del diseño y dimensionamiento del sistema fotovoltaico aislado.	59

Lista de Figuras

Fig. 2.1 Ilustración de cómo las montañas descomponen el flujo de aire estable en turbulencias.	9
Fig. 2.2 La arquitectura del STP.	13
Fig. 2.3 Arctic Turbulence Profiler (ATP).	14
Fig. 2.4 Ilustración del principio del perfilador de turbulencia de tipo LuSci.	15
Fig. 2.5 Baseline en espacio logarítmico y posición de los sensores (diseño a optimizar).	16
Fig. 2.6 Anillo de conexión que permite alternar entre sensores (diseño a optimizar).	17
Fig. 2.7. Electrónica del STP: Placa del sensor fotodiodo.	18
Fig. 2.8. Sistema de alimentación, Estación Lenghu, China.	19
Fig. 2.9 Mapa mostrando la ubicación de Cerro Ventarrones.	21
Fig. 2.10 Vista Panorámica desde la Cima de Cerro Ventarrones.	21
Fig. 3.1 Diseño de viga (a optimizar).	25
Fig. 3.2 Posición lunar en el Observatorio Cerro Ventarrones.	26
Fig. 3.3 Configuración de la baseline para Cerro Ventarrones.	27
Fig. 3.4 Estructuras de datos.	29
Fig. 3.5 Diagrama de flujo del proceso de reducción de datos.	30
Fig. 4.1 Diagrama de comunicaciones en el STP.	33
Fig. 4.2 Raspberry Pi 4B+.	34
Fig. 4.3 Driver ADC del STP.	35
Fig. 4.4 Esquema del driver de adquisición de datos ADC del STP.	36
Fig. 4.5 Comunicación RS422-RS232- USB.	37
Fig. 4.6 Sensor fotodiodo de Silicio, HAMAMATSU serie S1336.	38
Fig. 4.7 Prototipo STP ensamblado en laboratorio. NAOC, China.	39
Fig. 4.8 Grafica estimada de Voltaje, Corriente y Potencia en STP con respecto a cada sensor.	43
Fig. 4.9 Explorador Solar indicando la ubicación de Cerro Ventarrones, Antofagasta.	46
Fig. 4.10 Promedio mensual de la radiación diaria global en plano horizontal e inclinado.	47
Fig. 4.11 Promedio horario de radiación global en plano horizontal e inclinado.	49
Fig. 4.12 a) Ciclo anual de la magnitud del viento, b) Ciclo diario de la magnitud del viento.	50

Nomenclatura

m	: Metro.
Km	: Kilometro.
Mbps	: Megabits por segundo.
ms	: Milisegundo.
G	: Giga.
GB	: Gigabyte.
TB	: Terabyte.
m.s.n.m	: Metros sobre el nivel del mar.
°	: Grados.
bits	: Dígito binario.
Hz	: Hertz.
GHz	: Gigahertz.
mm	: Milímetro.
Kbps	: Kilobits por segundo.
nm	: Nanómetro.
V	: Voltaje.
A	: Amperios.
W	: Watt.
kW	: Kilowatt
Wh	: Watt-hora.
kWh	: Kilowatt-hora.
mA	: Miliamperio.
Uds	: Unidades.
m ²	: Metro cuadrado.
m/s	: Velocidad.
$C_I(r_i)$	: Covarianza del índice de refracción en la posición r_i .
C_n^2	: Coeficiente de estructura del índice de refracción.
$W(r_i, z)$	: Función peso.
z	: Profundidad o distancia a lo largo de la línea de visión.
ζ	: Ángulo cenital.
Γ	: Función gamma.
k	: Frecuencia espacial.
r_i	: Posición.
r	: Largo de baseline
θ	: Diámetro angular
$F_L(\kappa)$	: Funciones de filtro.
$F_K(\kappa, z)$	: Funciones de filtro.
$F_\Omega(\kappa)$	: Funciones de filtro.
$F_D(\kappa)$	: Funciones de filtro.
E_d	: Consumo de energía diario.
P	: Potencia del conjunto STP
P_{FV}	: Potencia Fotovoltaica.
PSH_{min}	: Hora peak solar menor.
η	: Eficiencia del sistema.

Abreviaciones

AO	: Óptica adaptativa (Adaptative Optics).
AAOS	: Automatic Astronomical Observatory Operating System.
ATP	: Perfilador de turbulencia en el Ártico (Arctic Turbulence Profiler).
DIMM	: Differential Image Motion Monitor.
LuSci	: Lunar Scintillometer
STP	: Perfilador de turbulencia Autónomo (Self-contained Turbulence Profiler)
MASS	: Multi-Aperture Scintillation Sensor.
NAOC	: National Astronomical Observatories of China.
TP	: Perfilador de turbulencia. (Turbulence Profiler).
AWS	: Estación Meteorológica Automática (Automatic Weather Station).
SBC	: Single-board computer.
WRF	: Weather Research and Forecasting.
CAS	: Academia China de Ciencias.
CASSACA	: Centro Sudamericano de Astronomía de la CAS
RS-422	: Recomend Standard-422.
RS-232	: Recomend Standard-232.
RAM	: Random Access Memory.
SD	: Secure Digital.
SSD	: Unidad estado sólido.
SATA	: Serial Advanced Technology Attachmen.
UCN	: Universidad Católica del Norte.
MoU	: Memoria de entendimiento.
ME	: Máxima entropía.
SCIDAR	: Scintillation Detection And Ranging.
SLODAR	: Slope Detection and Ranging.
SHABAR	: SHAdow BAnd Ranger.
SNODAR	: Surface layer NON-Doppler Acoustic Radar.
AAOS	: Automatic Astronomical Observatory Operating System.
ARM	: Advanced RISC Machine.
MODBUS	: Protocolo de comunicación.
RTU	: Remote Terminal Unit.
CRC	: Cyclic Redundancy Check.
DC	: Direct Current.
FITS	: Flexible Image Transport System.
ADC	: convertidores analógico-digital.
LAN	: Local Area Network.
UV	: Ultravioleta.
IR	: Infrarrojo.
CV	: Cerro Ventarrones
OCV	: Observatorio Cerro Ventarrones
PTO	: Perfil de Turbulencia Óptica
4G	: Cuarta generación.
5G	: Quinta generación.
μC	: Microcontroller.

Capítulo 1. Introducción

1.1. Introducción General

La medición y caracterización de la turbulencia atmosférica son aspectos importantes en el campo de la astronomía, especialmente cuando se trata de seleccionar ubicaciones óptimas para observatorios astronómicos y para el funcionamiento eficiente de sistemas de óptica adaptativa (AO) en telescopios. La turbulencia atmosférica puede distorsionar significativamente la calidad de las imágenes astronómicas, afectando directamente la capacidad de los astrónomos para capturar imágenes nítidas y detalladas del espacio profundo.

Este informe se centra en el análisis y caracterización del diseño de un perfilador de turbulencia autónomo, conocido como STP (Self-contained Turbulence Profiler). Este dispositivo fue diseñado para abordar los desafíos asociados con la medición de la turbulencia en ubicaciones astronómicas remotas y adversas. Si bien la medición de la turbulencia se ha realizado durante décadas con instrumentos como el Multi Aperture Scintillation Sensor (MASS) y el Differential Image Motion Monitor (DIMM), estos sistemas a menudo requieren mantenimiento y no son idóneos para ubicaciones sin infraestructura desarrollada.

El STP se presenta como una solución autónoma que podría ser desplegada en ubicaciones remotas, como el Cerro Ventarrones en Antofagasta, Chile, sin depender de recursos externos. Este informe proporciona una visión general del diseño del STP, su estructura, fuentes de energía, sistemas de comunicación y procesamiento de datos. Además, se explora por qué el Cerro Ventarrones ha sido seleccionado como lugar de instalación y se destacan las ventajas significativas que ofrecería este dispositivo en términos de autonomía y movilidad en comparación con sistemas de medición de turbulencia convencionales.

El desarrollo de este dispositivo representa un avance significativo al abordar las limitaciones de los instrumentos existentes, ofreciendo una solución práctica y autónoma para la monitorización a largo plazo de las condiciones atmosféricas en sitios astronómicos, lo que beneficia directamente a la calidad y eficacia de las observaciones astronómicas.

1.2. Problema

La turbulencia atmosférica representa un desafío significativo en los lugares de observación astronómica, con implicaciones críticas para la identificación y evaluación de sitios óptimos. En primer lugar, la turbulencia atmosférica introduce distorsiones en las imágenes astronómicas,

afectando la calidad de las observaciones. Este fenómeno, conocido como seeing atmosférico, se manifiesta como fluctuaciones en la densidad del aire que distorsionan la luz de los objetos celestes y limitan la resolución angular de los telescopios.

En entornos astronómicos, como el Cerro Ventarrones y otros lugares similares en todo el mundo, la variabilidad de la turbulencia atmosférica puede ser especialmente pronunciada debido a condiciones climáticas locales y geográficas. La presencia de capas turbulentas en la atmósfera, conocidas como la capa límite atmosférica y la capa libre, complica la caracterización precisa del seeing. Además, la distribución y la intensidad de la turbulencia varían con la altitud y pueden influir en la calidad de las observaciones astronómicas en diferentes rangos espectrales.

Los DIMMs se han utilizado para medir y monitorear el seeing atmosférico durante medio siglo, convirtiéndose en la opción estándar de instrumento para este propósito^[6]. Dado que la técnica moderna de óptica adaptativa (AO) se usa ampliamente en grandes telescopios, el monitoreo del seeing por sí solo no es suficiente. Parámetros atmosféricos adicionales, como el tiempo de coherencia y el ángulo isoplanático, también son importantes para el diseño y la operación de los sistemas de AO. Estos parámetros pueden derivarse del perfil de turbulencia vertical en un sitio dado, que puede medirse mediante instrumentos específicos como un MASS^[12]. Además, la combinación MASS-DIMM es una herramienta poderosa para la caracterización de sitios en observatorios astronómicos ópticos/infrarrojos alrededor del mundo^[4]. Sin embargo, tanto el DIMM como el MASS deben utilizar un telescopio de pequeño diámetro para rastrear estrellas brillantes. El telescopio necesita mantenimiento regular, si no frecuente, ya que sus partes móviles son vulnerables a fallos mecánicos, especialmente en sitios remotos y no desarrollados con entornos adversos, como el sitio Cerro Ventarrones en el norte de Chile. Por lo tanto, obtener datos a largo plazo e ininterrumpidos para un sitio astronómico no desarrollado es un desafío, pero es de gran importancia para evaluar y monitorear sus condiciones atmosféricas.

Ante estos desafíos, el desarrollo del STP ofrece una solución innovadora. Este, emplearía tecnología que supera las limitaciones de los instrumentos convencionales al ser autónomo, fácil de mantener y capaz de proporcionar mediciones continuas y fiables de la turbulencia atmosférica en ubicaciones astronómicas críticas, contribuyendo a una comprensión más profunda de las condiciones atmosféricas en estos entornos únicos.

1.3. Estado del Arte

❖ El estudio de Hickson, P. (2020)^[3], presenta una evaluación detallada del Arctic Turbulence Profiler (ATP, por sus siglas en inglés) en el sitio Ali. Este instrumento demostró su capacidad para realizar mediciones continuas de turbulencia atmosférica, con una interrupción debido a fallas en el amplificador AC en el anillo 6. A pesar de esta limitación, la recopilación de datos se realizó, totalizando 101.5 horas distribuidas en 26 noches. La capacidad del ATP para operar en condiciones remotas y adversas destaca como una ventaja significativa, brindando información valiosa sobre la turbulencia atmosférica. En cuanto a desventajas, se destaca la falla en el amplificador de AC reduciendo el número de baselines y afectando la resolución vertical más allá de los 500 metros. Este instrumento demuestra ser una herramienta valiosa para el estudio de la turbulencia atmosférica, con ventajas en su capacidad de operar en entornos remotos y desafíos en la detección de nubes y problemas técnicos específicos.

❖ Hickson, P. (2004)^[1], describe un enfoque innovador para medir la turbulencia atmosférica utilizando una matriz de escintilómetros lunares. La investigación se centra en desarrollar un método preciso para evaluar la turbulencia en la atmósfera, lo que es esencial para la observación astronómica de alta calidad. Los autores presentan los resultados de sus mediciones y demuestran la eficacia de esta tecnología en la caracterización de la atmósfera en sitios remotos y difíciles de acceder.

❖ Hickson, P. (2013)^[2] se enfoca en la turbulencia atmosférica y su influencia en la calidad de la observación astronómica en el Ártico canadiense. Los investigadores analizan en detalle las condiciones de turbulencia en esta región y cómo afectan la visibilidad y la resolución de las observaciones astronómicas. Los resultados destacan la importancia de comprender y cuantificar la turbulencia para optimizar las observaciones.

❖ En el estudio de Tokovinin, A. (2003)^[12], se presenta el Sensor Multi-Apertura (MASS) como un perfilador de turbulencias que utiliza centelleo para monitorizar los perfiles de turbulencia atmosférica. Este instrumento permite una evaluación continua y asequible de la atmósfera durante observaciones astronómicas. El MASS ofrece ventajas significativas, como su bajo costo y fácil integración, lo que lo convierte en una opción económica para la comunidad astronómica. Su capacidad de proporcionar datos ininterrumpidos sobre la turbulencia y su compatibilidad con sistemas de óptica adaptativa lo posicionan como una herramienta valiosa en entornos observacionales. Sin embargo, presenta desventajas, como su limitada resolución espacial y su sensibilidad a cambios rápidos en la turbulencia atmosférica. Además, su rendimiento puede estar

influenciado por condiciones atmosféricas cambiantes y la contaminación lumínica.

❖ Vernin, J. (2011)^[10] destaca el uso del MASS como un dispositivo clave para la medición de la turbulencia atmosférica en diferentes alturas. Entre las ventajas de este instrumento se encuentra su capacidad para proporcionar perfiles verticales detallados de la estructura de la turbulencia, permitiendo una evaluación exhaustiva de la atmósfera. Su integración con otros instrumentos, como DIMM y AWS (Automatic Weather Station), ofrece una perspectiva completa de las condiciones atmosféricas desde la capa límite hasta la estratósfera. La principal ventaja del MASS radica en su capacidad para contribuir a la comprensión detallada de los efectos de la turbulencia en la calidad de las observaciones astronómicas. Al proporcionar perfiles verticales, permite una caracterización más precisa de la distribución de la turbulencia en la atmósfera, lo que es esencial para la selección de sitios astronómicos óptimos. Sin embargo, algunas desventajas pueden incluir posibles limitaciones en la cobertura espacial y temporal, así como la necesidad de calibración y validación continua para garantizar la precisión de las mediciones. Además, la complejidad instrumental podría requerir un mantenimiento cuidadoso y la participación de personal técnico especializado.

❖ En el estudio realizado por Sarazin, M. (1990)^[6], refiere al DIMM como un dispositivo sofisticado diseñado para cuantificar la turbulencia atmosférica en observatorios astronómicos. Su funcionamiento se basa en la medición del movimiento relativo de imágenes estelares duales generadas por dos aperturas circulares en la pupila de entrada, conocidas como agujeros de Hartmann. Este enfoque permite evaluar las inclinaciones locales del frente de onda inducidas por la turbulencia atmosférica. Este instrumento ofrece varias ventajas significativas. En primer lugar, proporciona mediciones cuantitativas objetivas, lo que facilita la evaluación precisa de la calidad de la imagen. Además, su versatilidad le permite adaptarse a diferentes telescopios, y su capacidad para proporcionar mediciones en tiempo real con tasas de muestreo sustanciales permite la evaluación continua de las condiciones atmosféricas. Sin embargo, presenta desafíos y limitaciones. La sensibilidad del DIMM a condiciones climáticas adversas, como fuertes ráfagas de viento, puede introducir errores en las mediciones. La capacidad para medir estrellas débiles puede estar restringida por el ruido fotométrico y la necesidad de mantener una relación señal-ruido aceptable.

❖ En el estudio de Kornilov, V. (2020)^[4] demuestra que al integrar los instrumentos MASS-DIMM, se produce una contribución significativa al estudio y monitoreo de la turbulencia atmosférica. Combinando estos dos dispositivos se ofrece un enfoque integral, abordando las limitaciones individuales de cada instrumento y mejorando la calidad de las mediciones. En términos de instrumentación, el texto destaca la importancia de la calibración independiente de MASS y DIMM.

Este enfoque garantiza mediciones precisas y confiables al considerar detenidamente la variabilidad de cada instrumento. La capacidad de re-procesar datos, corregir parámetros erróneos y ajustar el reloj del sistema demuestra una preocupación proactiva por la integridad de los resultados. El algoritmo específico para corregir los efectos del centelleo atmosférico fuerte resalta la adaptabilidad del MASS-DIMM a condiciones desafiantes. Esta mejora en la corrección de errores consolida la robustez del perfilador, proporcionando mediciones más precisas incluso en presencia de condiciones atmosféricas adversas. En cuanto a las aplicaciones, la capacidad del MASS-DIMM para diferenciar la turbulencia en la capa límite terrestre emerge como una ventaja distintiva. La colaboración de MASS y DIMM revela detalles cruciales para la caracterización de sitios astronómicos, mejorando la comprensión de las condiciones atmosféricas en ubicaciones específicas. Una de las desventajas de este instrumento es que utiliza un telescopio de pequeña apertura para hacer seguimiento. El telescopio requiere mantenimiento regular, ya que sus piezas móviles son vulnerables a fallas mecánicas, especialmente en sitios remotos y subdesarrollados con entornos adversos.

❖ Shang, Z. (2021)^[5] menciona los conceptos clave del desarrollo e implementación de un perfilador de turbulencias autónomo. Se indica que el desarrollo de este instrumento pretende abordar los desafíos de la recopilación continua de datos a largo plazo en sitios astronómicos remotos y difíciles de acceder. El dispositivo se diseñará para ser completamente autosuficiente, incluyendo su sistema de suministro de energía, sistema de datos y sistema de comunicación. El equipo cuenta con experiencia en pruebas de sitio y desarrollo de instrumentación, lo que respalda la implementación exitosa del dispositivo.

1.3.1 Análisis del estado del arte

La revisión de la literatura evidenció la presencia de enfoques convencionales para medir la turbulencia atmosférica, como los sensores MASS y DIMM, así como la combinación de estos (MASS-DIMM) y un enfoque más especializado, el ATP. No obstante, el desarrollo del STP propuesto por Shang, Z. (2021) ofrece ventajas notables en cuanto a movilidad, mantenimiento reducido y capacidad de operación continua. Estas características posicionarían al STP como un dispositivo de vanguardia en la investigación de la turbulencia atmosférica.

1.4. Motivación

La motivación detrás de este documento radica en comprender el diseño, la estructura y el funcionamiento del medidor de turbulencia autónomo propuesto en el proyecto de la Chinese

Academy of Science South America Center for Astronomy (CASSACA CCJRF2101).

1.5. Objetivos

1.5.1 Objetivo General

Evaluar la operación de un Sistema de Perfilador de Turbulencia autónomo para su utilización en los países de China y Chile.

1.5.2 Objetivos Específicos

- Estudiar el estado del arte en perfiladores de turbulencia.
- Analizar el diseño del STP como medidor de turbulencia.
- Analizar electrónicamente la operación del STP.
- Estudiar el consumo de energía del STP con el propósito de dimensionar su sistema fotovoltaico aislado, para su instalación en Chile.

1.6. Alcances y Limitaciones

Este informe se centra en el estudio de un dispositivo que está siendo diseñado y desarrollado en laboratorios de NAOC (Observatorios Astronómicos Nacionales de China).

1.7. Metodología

Para estudiar el estado del arte en perfiladores de turbulencia, se realizará una revisión de la literatura científica y técnica disponible. Este análisis permitirá identificar las tecnologías, métodos y equipos utilizados actualmente para medir la turbulencia atmosférica, así como sus características, ventajas y limitaciones. Con esta información, se obtendrán las herramientas necesarias para desarrollar el segundo objetivo, que consiste en analizar el diseño del STP como medidor de turbulencia.

En este análisis se procederá a examinar detalladamente el diseño del STP, evaluando sus componentes y su funcionalidad. Esta etapa incluirá la identificación de los sensores utilizados, el sistema de comunicación, el procesamiento de datos y su almacenamiento, con el fin de proporcionar una comprensión profunda del dispositivo, lo cual es esencial para analizarlo electrónicamente.

En el análisis electrónico de la operación del STP, se evaluarán los circuitos electrónicos y los sistemas de control del dispositivo, que asegurarán su correcto funcionamiento y eficiencia. Este

análisis permitirá identificar posibles mejoras en el diseño, garantizando así que el dispositivo funcione de manera óptima en diversas condiciones operativas.

Por último, se realizará un estudio del consumo de energía del STP con el fin de dimensionar un sistema fotovoltaico aislado adecuado para su instalación en Chile. Este estudio incluirá el análisis de los requisitos energéticos del dispositivo, la evaluación de las condiciones solares del sitio de instalación y la evaluación de los costos de los componentes del sistema. Con estos datos, se diseñará un sistema fotovoltaico que garantice el suministro energético continuo y fiable del STP, asegurando su autonomía operativa.

Capítulo 2. Marco Teórico

2.1. Introducción

Imagina una noche clara en la que estás observando el cielo estrellado. A simple vista, las estrellas parecen parpadear, un fenómeno que se debe a la turbulencia y al "seeing" atmosférico. La turbulencia son los movimientos irregulares del aire en la atmósfera, causados por cambios en su temperatura y densidad. Estos movimientos afectan la claridad con la que vemos los objetos celestes.

El "seeing" describe cómo estas variaciones atmosféricas distorsionan las imágenes de las estrellas y planetas, haciendo que parezcan borrosas o en movimiento, comprender estos conceptos es esencial para mejorar las observaciones astronómicas. La definición y contexto del STP se enmarcan en su capacidad única para medir la turbulencia atmosférica de manera autónoma y sin depender de recursos externos. El STP se presenta como un instrumento diseñado para evaluar la calidad de observación astronómica al caracterizar la turbulencia en la atmósfera, un factor crítico en la distorsión de imágenes y la limitación de la resolución angular en telescopios.

En el contexto específico de este proyecto, este instrumento aborda desafíos asociados con la turbulencia atmosférica en lugares remotos y difíciles de acceder. Su autonomía se destaca al contar con su propio sistema de energía, comunicación y capacidad de operación continua, lo que lo diferencia de instrumentos convencionales que requieren mantenimiento frecuente y recursos externos, esto lo convierte en una herramienta versátil para la caracterización de sitios astronómicos en diversas condiciones atmosféricas.

2.2. Influencia de la atmósfera en la observación astronómica

La observación astronómica desde la superficie terrestre se ve significativamente influenciada por las condiciones atmosféricas. La atmósfera, lejos de ser un medio transparente e inalterable, introduce fenómenos que afectan la calidad y la precisión de las imágenes captadas por los telescopios. Entre estos fenómenos, la turbulencia atmosférica juega un papel crucial. Este efecto, conocido como seeing, describe la medida en que las condiciones atmosféricas afectan la nitidez y la estabilidad de las imágenes astronómicas. Comprender cómo la turbulencia atmosférica influye en el seeing y cómo se mide este fenómeno es esencial para la ubicación estratégica de observatorios y la optimización de la calidad de las observaciones.

2.2.1 Turbulencia atmosférica

La turbulencia atmosférica se refiere a las fluctuaciones en la densidad del aire que afectan la propagación de las ondas electromagnéticas. Esto ocurre debido a diferencias de temperatura y densidad en el aire, que causa variaciones en el índice de refracción, provocando que las ondas de luz se desvíen y cambien de dirección. Este fenómeno es responsable de la borrosidad en las imágenes obtenidas por los telescopios, ya que la luz se distorsiona al atravesar la atmósfera antes de llegar a la superficie terrestre [14].

En 1953, Babcock^[15] propuso una solución innovadora al utilizar la luz de una estrella de referencia para medir y corregir las fluctuaciones de fase en el frente de onda utilizando un espejo deformable. Esta técnica revolucionaria se conoce como óptica adaptativa (OA), mitigando eficazmente los efectos de borrosidad en los objetos astronómicos y permitiendo a los telescopios acercarse a su límite de difracción teórico. Los sistemas de OA se han vuelto indispensables en la instrumentación astronómica contemporánea, especialmente para telescopios de gran tamaño [14]. Un parámetro clave en estos sistemas es la constante de estructura refractiva atmosférica, C_n^2 , que representa la intensidad de la turbulencia óptica atmosférica en función de la altura [17].

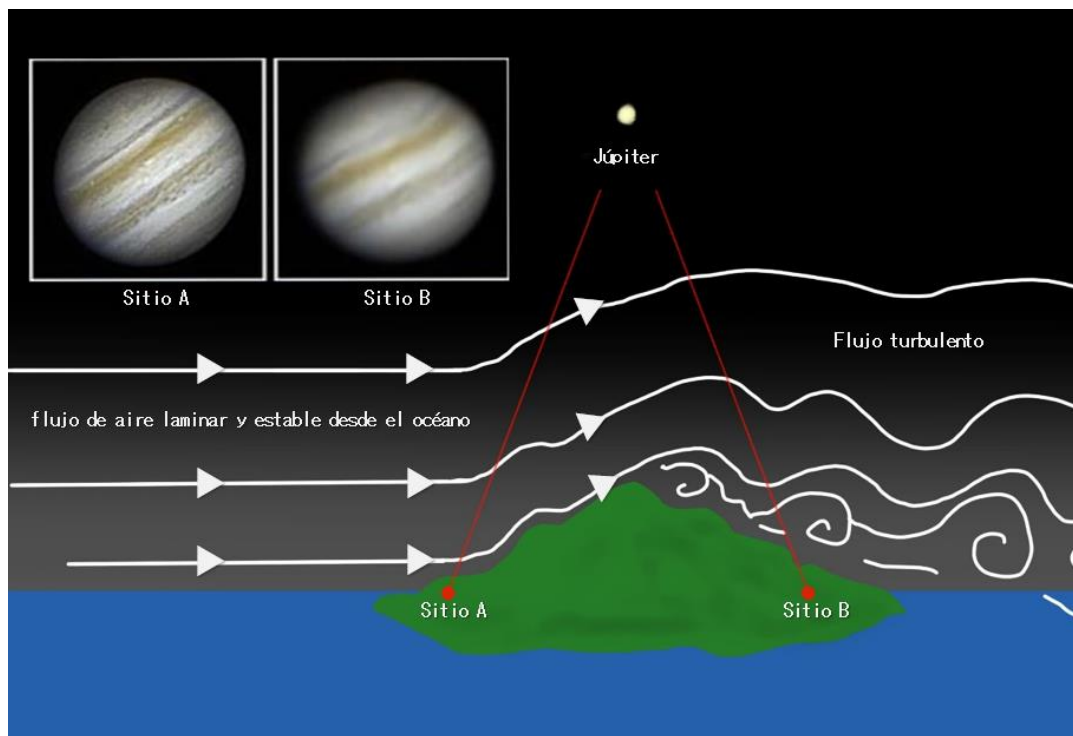


Fig. 2.1 Ilustración de cómo las montañas descomponen el flujo de aire estable en turbulencias.
Fuente: Elaboración propia.

En la figura 2.1 se muestran las vistas probables desde dos sitios diferentes. El sitio A está ubicado a barlovento, es decir, en el lado de las montañas que enfrenta directamente los vientos predominantes que vienen del océano. En este sitio, bajo los efectos de un flujo laminar y estable, la calidad de la imagen es nítida y clara. En contraste, el sitio B se encuentra a sotavento, el lado opuesto de las montañas protegido del viento, donde predomina un flujo turbulento. En este sitio, la borrosidad es notable, lo que impide obtener una imagen precisa del objeto astronómico en estudio.

2.2.2 Seeing

Es conocido a través de la teoría de turbulencia de Kolmogorov [24][25] que cuando la rapidez de un flujo de aire aumenta gradualmente, el flujo transforma su estado laminar a turbulento, produciendo vórtices y remolinos decrecientes en tamaño, mezclando masas de aire adyacentes entre sí, para dar paso a las fluctuaciones de temperaturas locales, con lo cual modifica la densidad del aire y consecuentemente el índice de refracción del medio. Estos cambios aleatorios, perturban la fase y la amplitud del frente de onda óptico causando variaciones en la intensidad o centelleo, efecto típicamente conocido como seeing atmosférico, responsable de la degradación de la resolución en imágenes astronómicas, y cuya corrección es posible gracias a óptica adaptativa.

El seeing se mide utilizando el diámetro de coherencia atmosférica, también conocido como el parámetro r_0 . Este parámetro indica el tamaño del área sobre el cual las ondas de luz permanecen coherentes. El valor de r_0 es crítico para determinar la calidad del seeing: cuanto mayor es r_0 , mejor es la calidad del seeing. En términos prácticos, r_0 se mide observando el ancho de las imágenes estelares producidas por telescopios y calculando la cantidad de distorsión presente.

La turbulencia atmosférica ocurre principalmente en tres áreas: cerca del suelo (0-100 metros), en la tropósfera central (100 m - 2 km) y en la alta tropósfera (6-12 km). Cada área presenta características distintas, que se detallan a continuación.

Altura cercana al suelo (0-100 metros): La turbulencia atmosférica a esta altura es causada principalmente por la interacción del aire con la superficie de la Tierra y estructuras como edificios. Durante el día, el Sol calienta el suelo y, por la noche, este calor se irradia de vuelta al aire, creando corrientes de convección. Estas fluctuaciones de temperatura provocan gran parte de la turbulencia que afecta a los observadores amateurs, causando imágenes borrosas y el centelleo visible en las estrellas.

Tropósfera Central (100 m - 2 km): En la tropósfera central, la turbulencia está influenciada por la topografía del terreno y los patrones climáticos a barlovento del sitio de observación. La variabilidad en la elevación y el tipo de superficie terrestre, como montañas y colinas, genera diferentes patrones de flujo de aire. Estas perturbaciones pueden prevalecer hasta 100 km a sotavento de una montaña. En esta área, las variaciones en el índice de refracción del aire pueden causar distorsiones adicionales en las imágenes astronómicas.

Región de Transición (2-6 kilómetros): Entre 2 y 6 kilómetros de altitud, la atmósfera se caracteriza por una relativa estabilidad en comparación con las capas inferior y superior. En esta región la turbulencia atmosférica es moderada a baja. El flujo de aire es más laminar y menos perturbado, resultando en una atmósfera más tranquila. Esta estabilidad relativa permite que las condiciones de observación sean menos afectadas por turbulencias significativas, proporcionando una mejor calidad de imagen en comparación con las capas adyacentes.

Alta Tropósfera (6-12 kilómetros): En la alta tropósfera, la turbulencia es causada por corrientes en chorro (jet streams), que son ríos de aire en movimiento rápido a gran altitud. Estas corrientes pueden cambiar de posición con las estaciones, moviéndose más al sur durante el invierno y la primavera. Los cortes de viento a este nivel de altitud pueden hacer que las imágenes parezcan estables pero muy borrosas y sin detalles finos. Aunque los observadores no pueden evitar estos efectos, las previsiones meteorológicas pueden ayudar a predecir la presencia de una corriente en chorro. La alta turbulencia en esta región puede deteriorar significativamente la calidad de las observaciones astronómicas.

Tropopausa (>12 kilómetros): Por encima de los 12 kilómetros, en la tropopausa, la turbulencia disminuye nuevamente. En esta región, la atmósfera es generalmente estable, y los efectos de los Jet streams comienzan a disiparse. Esta estabilidad hace que la tropopausa sea menos relevante para la discusión de la turbulencia atmosférica en la observación astronómica, pero sigue siendo un punto de referencia importante en la estructura de la atmósfera.

2.2.3 Impacto en la calidad de observaciones astronómicas

La calidad del seeing es crítica para la observación astronómica detallada y precisa. Un seeing óptimo permite captar imágenes nítidas y menos distorsionadas, facilitando el estudio detallado de estructuras celestes y mejorando la precisión científica de las investigaciones. Por el contrario, un seeing deficiente debido a alta turbulencia atmosférica reduce la capacidad de resolver detalles finos y complejos, limitando el potencial de descubrimientos científicos.

2.2.4 Importancia del perfil de turbulencia local

Conocer el perfil de turbulencia atmosférica de una ubicación es esencial para seleccionar sitios óptimos de observación astronómica. Esto permite a los astrónomos identificar áreas con condiciones atmosféricas más estables y menos turbulentas, maximizando la calidad de las observaciones realizadas desde telescopios terrestres. La comprensión de cómo varía la turbulencia con factores como la altitud, la geografía y las condiciones meteorológicas locales facilita la planificación estratégica de observaciones, minimizando los efectos adversos del seeing y optimizando la eficiencia científica en la exploración del universo.

2.3. Tecnologías existentes

Para medir la constante de estructura refractiva atmosférica C_n^2 , se han desarrollado varias técnicas, que se dividen en métodos ópticos y no ópticos. Entre los métodos ópticos se encuentran el MASS, Scintillation Detection and Ranging (SCIDAR), Slope Detection And Ranging (SLODAR), Shadow Band Array (SHABAR) y el Lunar Scintillometer (LuSci).

El MASS utiliza cuatro aperturas concéntricas para analizar el flujo de luz de una estrella brillante, actuando como un filtro espacial. El perfil de turbulencia óptica (PTO) se determina a partir de las variaciones en la intensidad de la luz de las mediciones de diferentes aperturas. Este método requiere un telescopio pequeño y puede medir C_n^2 hasta altitudes de 16 km con baja resolución, aunque es menos eficaz para turbulencias menores a 500 m.

El método SCIDAR calcula la covarianza utilizando imágenes de corta exposición del patrón de centelleo de una estrella doble [20][21], deduciendo C_n^2 a partir de estos datos. Requiere un telescopio de 1 metro que pueda detectar C_n^2 hasta 20 km de altura con una resolución media de 300 m para el PTO. La resolución vertical de SCIDAR depende de la separación angular entre las estrellas binarias objetivo y el ángulo cenital [18][19].

SLODAR mide las pendientes del frente de onda de dos estrellas guía usando sensores de Shack-Hartmann, y calcula el PTO basado en la correlación cruzada y autocorrelación de estas pendientes [22][23]. Al igual que SCIDAR, SLODAR necesita un telescopio de 1 metro.

Otra técnica óptica es observar fuentes extendidas como el Sol y la Luna. Beckers [16] propuso SHABAR, que utiliza el centelleo solar para perfilar la turbulencia en la capa terrestre. SHABAR está compuesto por seis sensores de fotones dispuestos linealmente. Las covarianzas de las fluctuaciones de intensidad de la luz solar entre sensores individuales se miden y se utilizan para reconstruir el PTO

hasta 500 metros [16].

LuSci, una variante de SHABAR, mide las fluctuaciones en la luz lunar para estimar el perfil nocturno de C_n^2 [1][3], utilizando una montura ecuatorial para seguir a la Luna. Para enfrentar las condiciones extremas del Ártico, Paul Hickson[2] desarrolló el Arctic Turbulence Profiler (ATP), que emplea 48 sensores dispuestos en seis anillos verticales a distintas alturas. La Luna ilumina secuencialmente un sensor en cada anillo mientras la Tierra rota, permitiendo un seguimiento sin movimiento físico del instrumento [2].

Los métodos no ópticos para medir la turbulencia atmosférica incluyen el uso de globos y radar acústico no Doppler de capa superficial (SNODAR). Los globos equipados con micro-sensores térmicos miden las fluctuaciones térmicas y ayudan a determinar la distribución vertical de C_n^2 [20]. Por el contrario, SNODAR utiliza la dispersión de ultrasonidos a través del aire turbulento para inferir las condiciones de turbulencia atmosférica [21].

2.4. Características de diseño del STP

La propuesta de diseño inicial especifica que el STP operará eficientemente en cualquier condición climática sin necesidad de recursos externos. Estas características particulares se detallarán en los siguientes puntos.

2.4.1 Arquitectura del STP

Se menciona que el STP estará compuesto por vigas con sensores combinados (Sensor beam), un sistema de suministro de energía, un sistema de datos y un sistema de comunicación, como se ilustra en la figura 2.2.

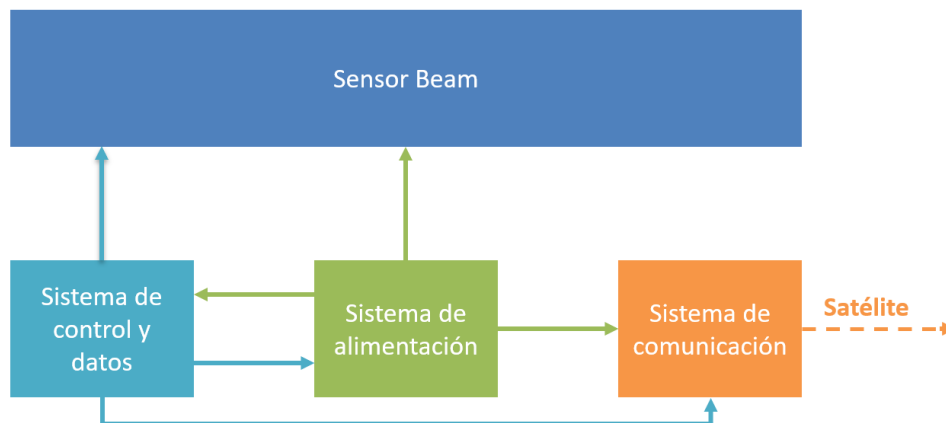


Fig. 2.2 La arquitectura del STP.
Fuente: Shang et al. (2021).

En los trabajos previos de Paul Hickson [2], se implementó un perfilador de turbulencia tipo LuSci, el ATP en la Isla Ellesmere, Canadá, y en el Tíbet, China. El diseño del STP está basado en el ATP (figura 2.3) con la intención de integrarlo junto con otros elementos para lograr su autonomía operativa.



Fig. 2.3 Arctic Turbulence Profiler (ATP).
Fuente: Hickson et al (2013).

2.4.2 Estructura y diseño de Baseline para el STP

En astronomía, el término "Baseline" se utiliza comúnmente para describir la separación angular o espacial entre dos puntos de observación. Cuando se menciona en el contexto del STP, se refiere a la distancia entre los sensores en el instrumento. En la descripción del STP, se menciona que su arquitectura está compuesta de vigas con sensores combinados para formar diferentes baselines. La variación en la intensidad de la luz lunar registrada por estos sensores se utiliza para derivar perfiles de turbulencia vertical en la atmósfera.

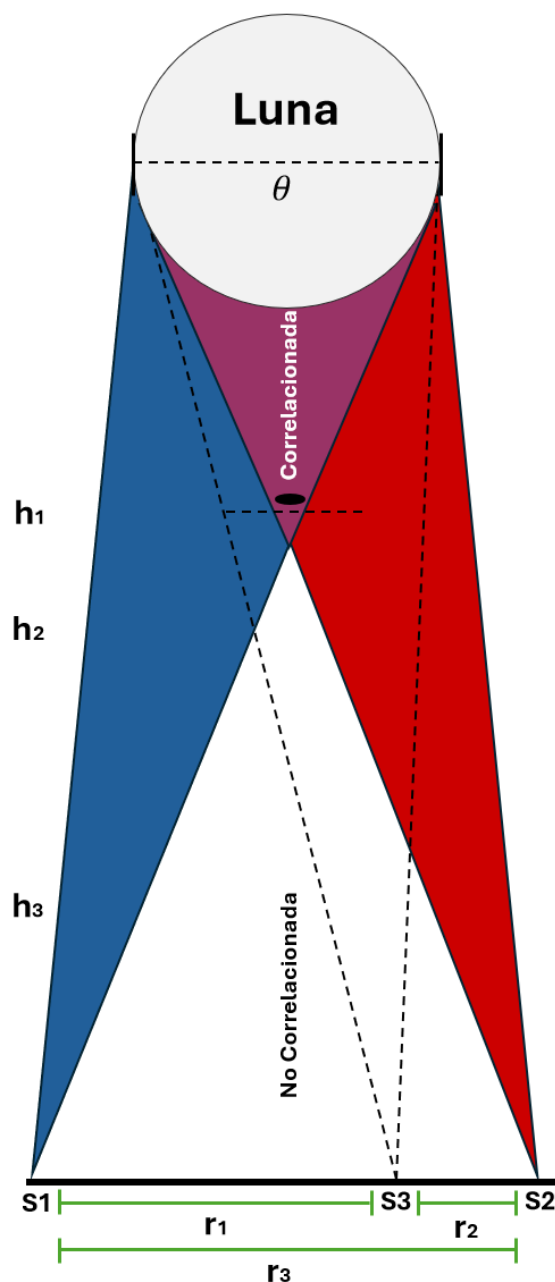


Fig. 2.4 Ilustración del principio del perfilador de turbulencia de tipo LuSci.
Fuente: Elaboración propia.

La figura 2.4 muestra el principio de funcionamiento del LuSci (Lunar Scintillometer), donde se observa que los caminos de luz hacia los sensores S1 y S2 se superponen a una altura específica, donde se registran las señales correlacionadas generadas por la turbulencia. La inclusión del sensor S3 añade dos baselines adicionales, correspondientes a alturas adicionales. Básicamente, estos sensores registran la intensidad de la luz incidente de la Luna. A medida que la luz lunar atraviesa la atmósfera turbulenta, la intensidad medida por cada sensor exhibe variaciones distintas. Los trayectos

de luz entre cualquier par de sensores se superponen a alturas específicas. Por consiguiente, la covarianza de las intensidades registradas por estos pares puede emplearse para calcular la turbulencia a diferentes alturas correspondientes a las baselines de los sensores. La altura de la capa de turbulencia puede aproximarse como $h(h_1, h_2, h_3) = r/\theta$, donde $r(r_1, r_2, r_3)$ es la longitud de la baseline y θ es el diámetro angular de la Luna.

La elección y diseño de las baselines son críticos para obtener información precisa sobre la turbulencia atmosférica. Las baselines más largas pueden proporcionar información sobre capas más altas de la atmósfera, mientras que las baselines más cortas se centran en la turbulencia a altitudes más bajas. Inicialmente, los investigadores plantean la necesidad de contar con un mínimo de cuatro vigas idénticas para abarcar 288° en dirección azimutal a lo largo de la trayectoria lunar. Cada viga estaría compuesta por ocho sensores, generando así 28 baselines distintas (figura 2.5), lo cual resulta adecuado para la toma de muestras del perfil vertical de turbulencia, es necesario recalcar que esto puede ser optimizado.

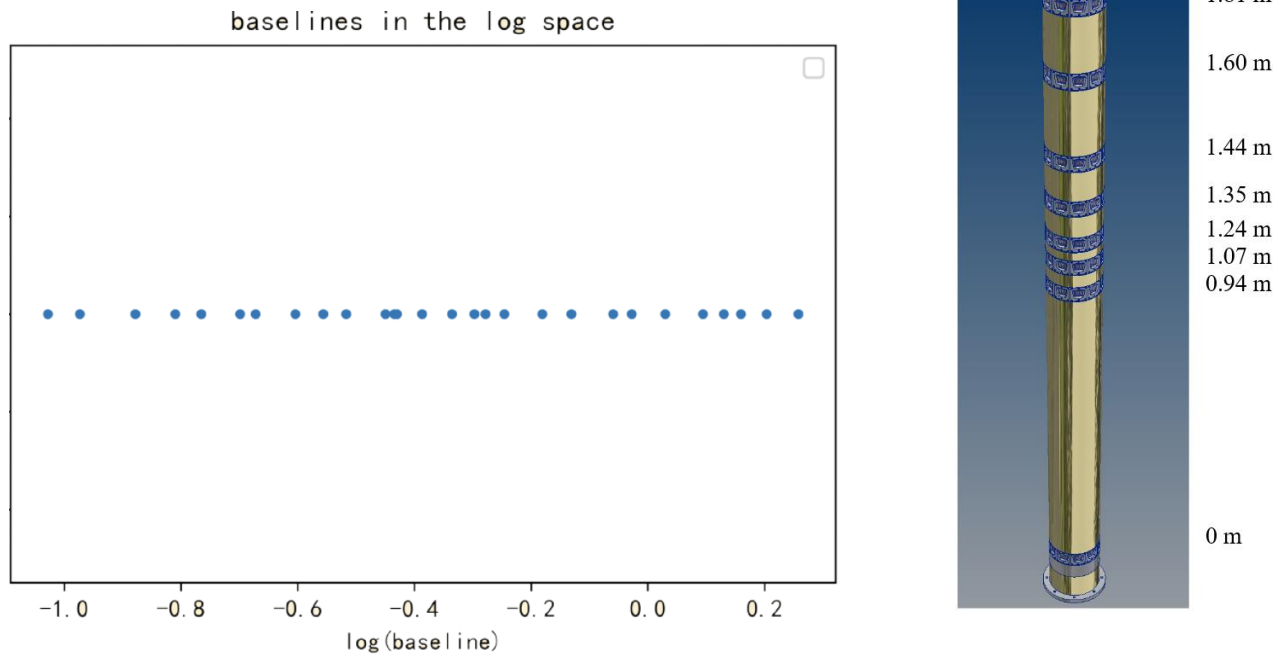


Fig. 2.5 Baseline en espacio logarítmico y posición de los sensores (diseño a optimizar).
Fuente: Shang, Z. (2023). Self-contained Turbulence Profiler (STP).

Este modelo preliminar, adopta la idea del ATP de Paul Hickson [3], la disposición estratégica de los sensores facilita la medición de la variación en la intensidad de la luz lunar desde múltiples ángulos. Además, este diseño incorpora un anillo de conexión que permite alternar entre sensores

(figura 2.6), esto mejoraría la eficiencia operativa del STP. En resumen, la estructura del STP se ha diseñado para ser versátil, portátil y capaz de adaptarse a una variedad de entornos astronómicos.

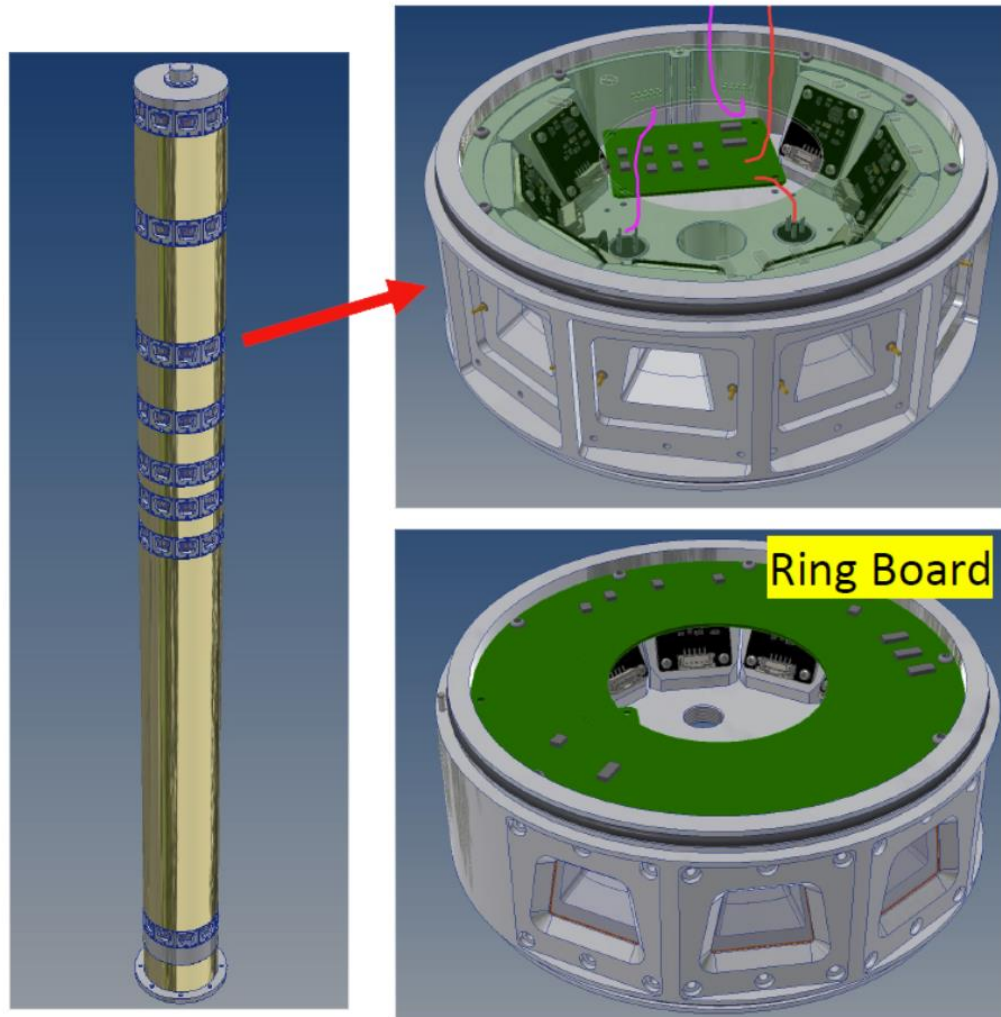


Fig. 2.6 Anillo de conexión que permite alternar entre sensores (diseño a optimizar).
Fuente: Shang, Z. (2023). Self-contained Turbulence Profiler (STP).

2.4.3 Electrónica

En lo que respecta a la electrónica del STP, se informa que el diseño ha sido completado. Actualmente, se están construyendo tanto el circuito de adquisición de datos como la placa del sensor, la cual incorpora un fotodiodo para verificar la efectividad del diseño. Esta fase es fundamental para confirmar la funcionalidad y eficacia del diseño electrónico en condiciones de laboratorio, antes de avanzar hacia la implementación completa del STP.

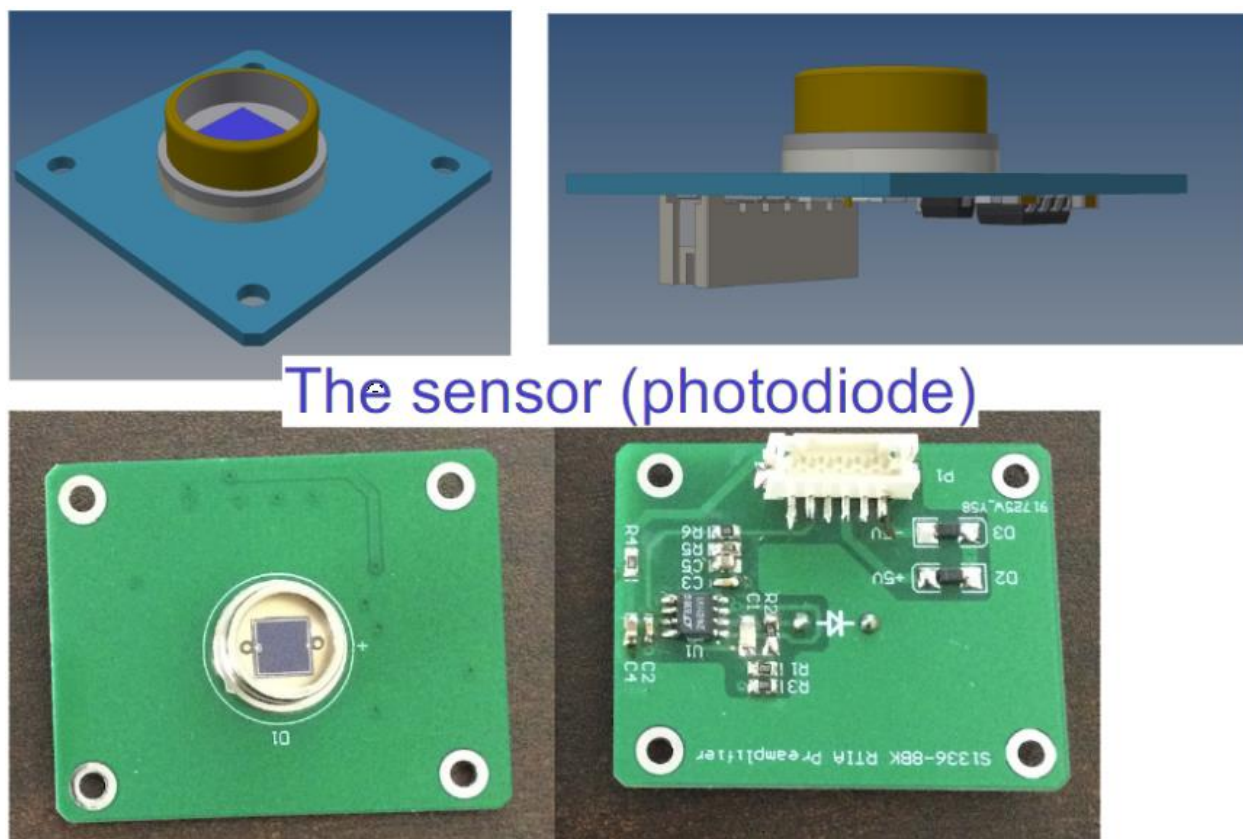


Fig. 2.7. Electrónica del STP: Placa del sensor fotodiodo.
Fuente: Shang, Z. (2023). Annual Report, Grant No. CCJRF2101.

2.4.4 Sistema de alimentación del STP

En cuanto al sistema de alimentación, se ha determinado que se utilizará una combinación de energía solar y baterías como sistema de respaldo (ver fig. 2.8). Esta elección es especialmente relevante dado que el instrumento operará predominantemente durante la noche. Se prevé que la duración operativa de este sistema sea de aproximadamente 3 años. Este enfoque sostenible no solo garantiza una solución robusta y autónoma, sino que también asegura un suministro de energía continuo y confiable a largo plazo.



Fig. 2.8. Sistema de alimentación, Estación Lenghu, China.
Fuente: Shang, Z. (2023). Annual Report, Grant No. CCJRF2101.

2.4.5 Soluciones de comunicación

En lo que respecta a la conectividad, se señala que Starlink está disponible y cubre el área del Observatorio Cerro Ventarrones (CV). Se proporcionan detalles sobre las tasas de transmisión, que oscilan entre 25-100 Mbps para descargas, 5-10 Mbps para cargas, y una latencia de 25-60 ms. En cuanto a Beidou Satellite, se indica que también cubre CV, aunque su disponibilidad no está confirmada. Además, se plantea la posibilidad de utilizar la red celular (3G, 4G, o 5G) en Cerro Ventarrones, y se menciona que si existe disponibilidad de esta red, podría ser una solución viable y económica.

2.4.6 Adquisición de datos

El diseño del STP especifica que para la adquisición de datos se utilizará comunicación RS-422 a RS-232 con una velocidad de baudios de 230,400. Se describe el protocolo de comunicación como similar a Modbus.

Modbus es un protocolo de comunicación serial utilizado ampliamente en la automatización industrial. Permite la comunicación entre dispositivos como sensores y controladores mediante una estructura de mensajes que define cómo se envían y reciben datos. La similitud con Modbus sugiere que el protocolo de comunicación en este caso también organiza los datos en una forma estructurada y utiliza una metodología de intercambio de mensajes eficiente.

Además, se informa que el software de adquisición de datos ya ha sido probado en un sistema Linux. Para la computadora de bajo consumo, se menciona el uso de una Raspberry Pi 4B+ con 8 GB de RAM, una tarjeta SD de 1 TB y un SSD SATA externo de 4 TB para respaldo.

2.5. Identificación de diferencias clave y ventajas

El STP es un sistema completo e integrado que abarca desde su estructura hasta sus componentes electrónicos, sistemas de alimentación y comunicación. Su principal fortaleza radica en su autonomía, ya que utiliza fuentes de energía renovable, lo que le permite realizar mediciones continuas y a largo plazo en entornos astronómicos remotos. A diferencia de otros instrumentos de medición de turbulencia atmosférica, como el MASS, el STP no requiere partes móviles para el seguimiento lunar, lo que reduce significativamente los requerimientos de mantenimiento y aumenta su fiabilidad.

El STP destaca por su capacidad para operar de manera estable y continua durante toda la noche, independientemente de la disponibilidad de estrellas dobles brillantes, como las que se requieren en técnicas como SCIDAR o SLODAR. En su lugar, utiliza la luz de la luna, que está disponible con mayor regularidad.

Una ventaja clave del STP es su capacidad para operar en tiempo real, lo que permite el monitoreo remoto constante de su estado. Esta funcionalidad es crucial para garantizar la disponibilidad continua del sistema y para detectar y analizar cualquier cambio de manera inmediata, manteniendo así la estabilidad operativa.

2.6. Cerro Ventarrones como lugar de instalación

Cerro Ventarrones es un sitio astronómico ubicado en la Región de Antofagasta, Chile, aproximadamente a 100 km al sur de Antofagasta, en el desierto de Atacama. Con una superficie de 25 km² y una cima que alcanza los 2.820 metros sobre el nivel del mar, se encuentra en la zona de los Cerros Paranal y Armazones.

Este sitio fue considerado candidato para los grandes proyectos de telescopios E-ELT y TMT, destacándose por su 85% de noches despejadas y un seeing total de 0.91 segundos de arco (ver Vernin et al. 2011, PASP 123, 1334; Vázquez et al. PASP, 124, 868, 2012). Además de su valor astronómico, Cerro Ventarrones contribuirá al desarrollo local al fomentar el astroturismo y la educación astronómica a través de la creación de un centro educativo.



Fig. 2.9 Mapa mostrando la ubicación de Cerro Ventarrones.
Fuente: Google Maps.



Fig. 2.10 Vista Panorámica desde la Cima de Cerro Ventarrones.
Fuente: iaucn.cl

En 2016 NAOC y UCN firmaron un Memoria de Entendimiento (MoU) para convertir el sitio Cerro Ventarrones, en un observatorio astronómico de clase mundial. El proyecto del Parque Astronómico Ventarrones busca convertirse en un destacado polo de investigación astronómica y desarrollo tecnológico en la Región de Antofagasta. La Universidad Católica del Norte (UCN), a través de este proyecto, ha obtenido la concesión del sitio por 20 años con el objetivo de desarrollar un observatorio astronómico que fortalezca las investigaciones y colaboraciones con instituciones extranjeras.

En este contexto, el STP desempeñaría un papel crucial al proporcionar datos precisos sobre la turbulencia atmosférica en el área. Además, al ser parte integral del desarrollo tecnológico en la

región, el STP se alinea con la visión del Parque Astronómico Ventarrones de convertirse en un centro de investigación astronómica de clase mundial.

2.7. Sumario

En el capítulo 2 se abordaron los conceptos de turbulencia atmosférica y seeing, destacando su impacto en la observación astronómica. Se presentó el STP, como un dispositivo autónomo diseñado para medir la turbulencia atmosférica y mejorar la calidad de las observaciones. Se discutieron las características de diseño del STP, incluyendo su estructura, electrónica, sistema de alimentación y soluciones de comunicación. Además, se comparó el STP con otros instrumentos existentes, resaltando sus ventajas. Finalmente, se menciona el rol de Cerro Ventarrones como el sitio de instalación, explicando su relevancia y potencial para la investigación astronómica.

Capítulo 3. Evaluación y diseño del STP

3.1. Introducción

En este capítulo se presenta una evaluación actualizada del diseño del STP, basada en la información más reciente. La evaluación cubre los principios de funcionamiento, las ventajas y desventajas frente a otros instrumentos, la configuración, la estructura de datos, el proceso de reducción y análisis de datos, así como el sistema de comunicación y el suministro de energía.

3.2. Contenidos

El perfilador de turbulencia autónomo se basa en el principio de un instrumento similar, el LuSci. Este diseño innovador, inspirado en el Lunar Scintillometer y el Arctic Turbulence Profiler, busca proporcionar una medición precisa y estable de la turbulencia atmosférica.

El STP utiliza un método de covarianza para medir la turbulencia atmosférica. La ecuación clave para este método es la siguiente:

$$C_I(r_i) = \int_0^\infty C_n^2(z \cos \zeta) W(r_i, z) dz \quad (3.1)$$

donde,

$C_I(r_i)$: Covarianza del índice de refracción en la posición r_i .

$C_n^2(z \cos \zeta)$: Coeficiente de estructura del índice de refracción, que describe la intensidad de las fluctuaciones del índice de refracción a una profundidad z y ángulo ζ .

$W(r_i, z)$: función peso que pondera las contribuciones de diferentes profundidades z a la covarianza en la posición r_i .

z : profundidad o distancia a lo largo de la línea de visión.

ζ : ángulo cenital.

La covarianza $C_I(r_i)$ cuantifica cómo las fluctuaciones de la intensidad de la luz en la posición r_i están correlacionadas con las fluctuaciones en otras posiciones debido a la turbulencia atmosférica.

$$W(r_i, z) = \frac{\Gamma(8/3) \sin(\pi/3) z^2}{2\pi} \int d^2 \kappa \kappa^{1/3} \exp(i\kappa \cdot r_i) \times F_L(\kappa) F_K(\kappa, z) F_\Omega(\kappa) F_D(\kappa) \quad (3.2)$$

donde,

$\Gamma(8/3)$: función gamma evaluada en $(8/3)$.

k : frecuencia espacial.

r_i : posición.

$F_L(\kappa), F_K(\kappa, z), F_\Omega(\kappa), F_D(\kappa)$: funciones de filtro.

La función de peso $W(r_i, z)$ actúa como un filtro que describe cómo las irregularidades atmosféricas a diferentes alturas y escalas espaciales afectan la imagen observada en una posición específica en el plano de imagen del telescopio.

Combina varias funciones de filtro, $F_L(\kappa), F_K(\kappa, z), F_\Omega(\kappa)$ y $F_D(\kappa)$ que representan aspectos del sistema de observación, como la distribución de energía de la turbulencia, la respuesta del telescopio, y la distribución de la fuente observada. Estos filtros se unen con el fin de modelar cómo la turbulencia atmosférica afecta la imagen en diferentes escalas espaciales y alturas.

Para resolver la integral que relaciona la covarianza $C_I(r_i)$ con el perfil de turbulencia $C_n^2(z)$ se utiliza el método de máxima entropía (ME). Este método permite obtener estimaciones precisas y objetivas a partir de datos incompletos, evitando suposiciones no justificadas y asegurando la coherencia con las restricciones observacionales, generando además soluciones únicas y estables, cruciales para medir con precisión.

3.3. Comparación con otras técnicas

La tabla 3.1 compara varios métodos para medir la turbulencia atmosférica, destacando que el STP, es una opción ventajosa debido a su simplicidad y robustez. A diferencia de métodos como SCIDAR, MASS y SLODAR que requieren partes móviles, el STP no las necesitara, reduciendo la complejidad y los costos de mantenimiento. Además, mientras técnicas como SHABAR dependen del sol y los otros métodos ópticos de estrellas brillantes, el STP utiliza la luna. La estabilidad de la fuente de luz, la menor influencia de la turbulencia térmica y la reducción de la contaminación lumínica hacen que las mediciones nocturnas sean más precisas y confiables, permitiendo una operación continua durante la noche. Aunque su resolución es baja y su rango de altura de detección está limitado a 200 m, estas características son adecuadas para muchas aplicaciones prácticas, ofreciendo una solución eficiente y de bajo costo frente a métodos más complejos y costosos.

Tabla 3.1 Métodos para medir turbulencia atmosférica.

Categoría	Método	Resolución	Altitud (km)	Partes móviles (telescopio)	Duty cycle
Óptico	SCIDAR	Media	<20	Sí	Doble estrella brillante
Óptico	MASS	Baja	<16	Sí	Estrella brillante individual
Óptico	SLODAR	Media	<1.5	Sí	Doble estrella brillante
Óptico	SHABAR	Baja	<0.5	No	Sol
Óptico	LuSci	Baja [b]	<0.5	No [a]	Luna
No Óptico	Globo	Alta	<20	No	Una vez
No Óptico	SNODAR	Alta	<0.5	No	En cualquier momento
Óptico	STP	Baja[b]	≤0.2	No[a]	Luna

Fuente: Hu, Y. (2024). Progress on self-contained turbulence profiler.

[a] Cabe mencionar que LuSci en el Observatorio Interamericano Cerro Tololo utiliza partes móviles para seguir la luna, mientras que la versión mejorada, desarrollada por Paul Hickson, elimina la necesidad de partes móviles para el seguimiento lunar.^{[2][13]}

[b] La resolución de instrumentos similares al LuSci (STP) depende de la configuración de la baseline y del control del ruido del sensor.

3.4. Diseño del STP para OCV

El diseño del perfilador de turbulencia autónomo para el Observatorio Cerro Ventarrones pretende medir en un rango de detección en altura de hasta 200 metros y cuenta con ocho sensores fotodiodo que forman 28 baselines (figura 3.2). La baseline máxima es de 1.75 metros, y los sensores están distribuidos uniformemente en el espacio logarítmico.

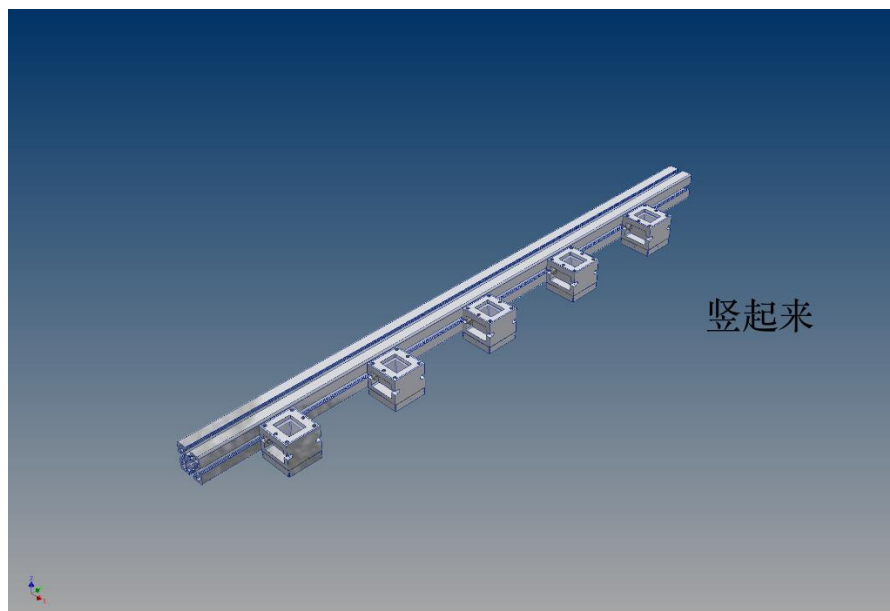


Fig. 3.1 Diseño de viga (a optimizar).

Fuente: Hu, Y. (2024). Progress on self-contained turbulence profiler.

El diseño incluye tres vigas (ejemplo en Fig.3.1) colocadas horizontalmente para facilitar su instalación. Estas vigas cubrirán 108° en azimuth y estarán orientadas hacia $(-36^\circ, 0^\circ, 36^\circ)$ y $(0^\circ, 36^\circ, 72^\circ)$. Esto proporciona una cobertura amplia y uniforme, optimizando la resolución espacial y reduciendo la redundancia en los datos.

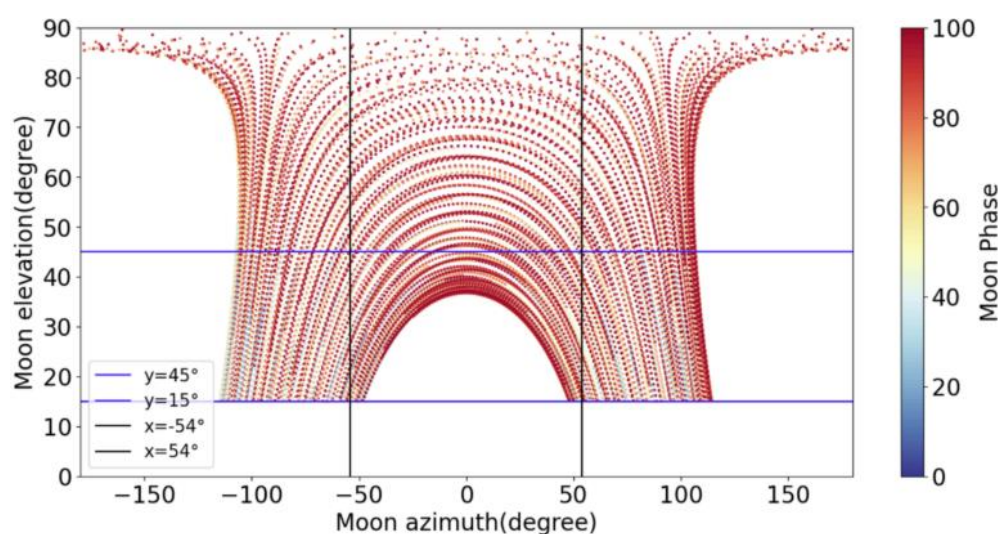


Fig. 3.2 Posición lunar en el Observatorio Cerro Ventarrones.

Fuente: Hu, Y. (2024). Progress on self-contained turbulence profiler.

En la figura 3.2 se muestra la posición de la Luna en Cerro Ventarrones, destacando su elevación y azimuth a lo largo de diferentes fases lunares. Esta información es vital para el STP, que utiliza la luz de la Luna para medir la turbulencia atmosférica nocturna, proporcionando una fuente de iluminación estable y predecible que facilita las observaciones. Además, la luz lunar se usa para calibrar los sensores ópticos del STP, asegurando mediciones precisas y fiables en condiciones de baja luminosidad.

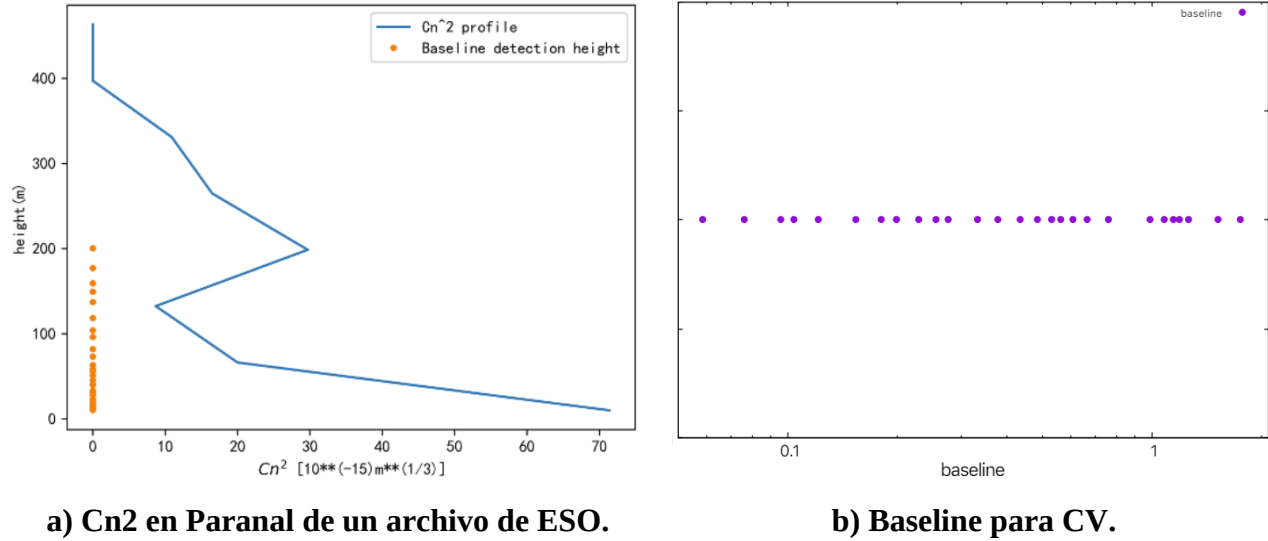


Fig. 3.3 Configuración de la baseline para Cerro Ventarrones.
Fuente: Hu, Y. (2024). Progress on self-contained turbulence profiler.

En la figura 3.3 se muestran dos elementos clave: el perfil de C_n^2 en Paranal y la configuración de baseline para el STP. La configuración de baseline está optimizada utilizando el perfil de turbulencia de Paranal (fig. 3.3 a), que se encuentra cerca del Observatorio Cerro Ventarrones, y los investigadores sugieren que esta configuración debería ser una buena aproximación para el área de estudio.

Las diferentes longitudes y orientaciones de la baseline permiten medir variaciones en la turbulencia atmosférica a distintas escalas espaciales. Una configuración bien diseñada asegura que las baselines cubran una amplia gama de distancias y ángulos, mejorando así la resolución espacial y angular de las observaciones. Además, la correcta alineación y optimización de esta configuración minimizan los errores sistemáticos, proporcionando datos precisos y fiables. El diseño de la baseline está completo y puede ajustarse fácilmente si es necesario mediante el uso de software personalizado.

3.5. Software de adquisición de datos

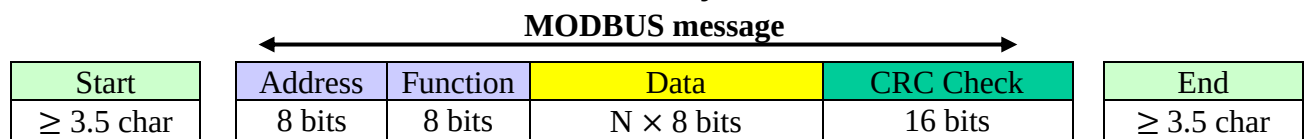
Actualmente, el software que se está desarrollando se basa en una infraestructura robusta y tecnologías avanzadas para facilitar la captura y gestión de datos de manera automatizada. A continuación, se detallan los principales aspectos del sistema:

- RS.422 a RS-232: velocidad de baudios 230400;
- Protocolo de comunicación similar a Modbus;

- El software de adquisición de datos está basado en AAOS (Automatic Astronomical Observatory Operating System);
- Un Daemon (seriald) se inicia automáticamente al arrancar y se ejecuta en segundo plano, adquiriendo automáticamente datos y guardándolos en archivos;
- Un cliente (serial) envía comandos de control;
- Un script de Bash para operación automática;
- Computadora basada en ARM de bajo consumo: Raspberry Pi 4B+, 8GB de RAM, tarjeta SD de 1 TB;
- SSD externo para respaldo de datos.

El software se distingue por su enfoque en la automatización eficiente y precisa de la captura de datos. Construido sobre la plataforma AAOS, diseñada para automatizar observaciones astronómicas, el software asegura una ejecución robusta y confiable de las tareas de adquisición de datos.

Tabla 3.2 Formato de Mensaje RTU de MODBUS.



Fuente: Hu, Y. (2024). Progress on self-contained turbulence profiler.

La tabla 3.2 detalla la estructura estándar de los mensajes utilizados en la comunicación serial MODBUS en modo RTU (Remote Terminal Unit). Cada campo en el mensaje tiene un propósito específico que asegura la correcta interpretación y verificación de los datos transmitidos entre dispositivos maestro y esclavo. El tiempo de inactividad requerido antes y después del mensaje (Start y End) facilita la sincronización y delimitación de este, mientras que el campo “Address” permite identificar al dispositivo receptor. La función específica la acción requerida, y el campo “Data” contienen la información necesaria para dicha acción. Finalmente, el campo “CRC” asegura la integridad del mensaje mediante un cálculo de verificación cíclica, esencial para detectar errores en la transmisión.

La implementación de un Daemon denominado "seriald" permite la adquisición automática y el almacenamiento continuo de datos en archivos, mientras que un cliente denominado "serial" facilita el control y ajuste de parámetros desde sistemas externos. Además, un script de Bash automatiza operaciones adicionales para asegurar un funcionamiento sin interrupciones.

3.6. Estructura de datos

La estructura de datos diseñada para este sistema se caracteriza por una tasa de muestreo de 600Hz, generando aproximadamente 100 GB de datos anuales. Cada archivo de datos se crea cada 120 segundos, con los primeros 10 segundos dedicados a datos DC y los últimos 110 segundos a datos AC. Estos datos se almacenan en formatos de raw binary y FITS, asegurando tanto la captura eficiente como la compatibilidad con estándares astronómicos.

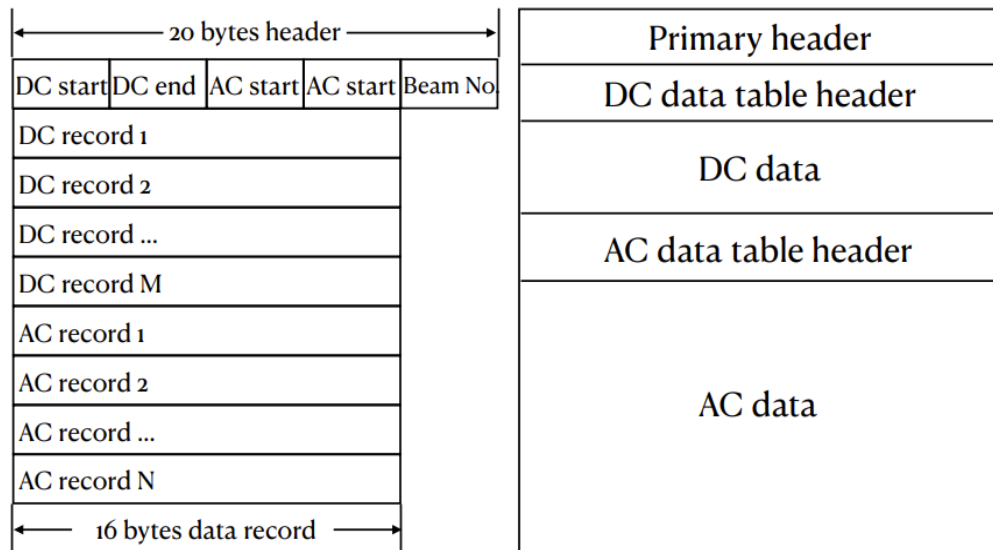


Fig. 3.4 Estructuras de datos.

Fuente: Hu, Y. (2024). Progress on self-contained turbulence profiler.

3.7. Reducción de datos

La reducción de datos es el proceso de transformar y simplificar los datos crudos obtenidos de las mediciones en una forma más manejable y útil, sin perder información crucial. El procesamiento de los datos se lleva a cabo en una Raspberry Pi, que ha demostrado ser suficiente para la reducción de datos, como se ha comprobado con datos de Ali [3].

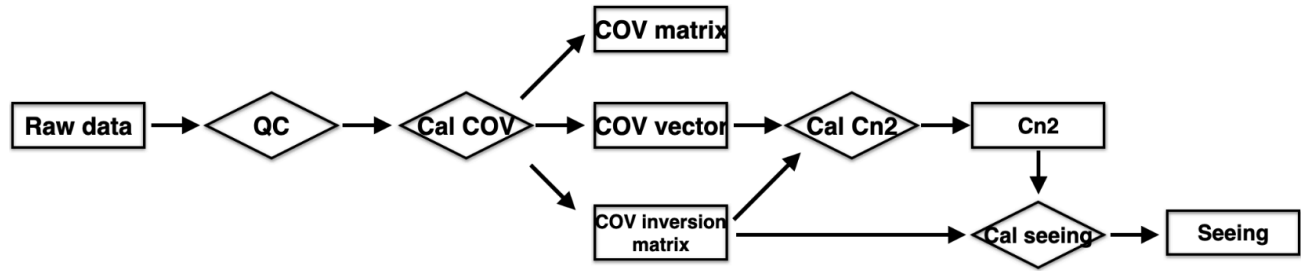


Fig. 3.5 Diagrama de flujo del proceso de reducción de datos.
Fuente: Hu, Y. (2024). Progress on self-contained turbulence profiler.

El diagrama de la figura 3.5 ilustra el proceso sistemático de reducción de datos. Comienza con la entrada de datos crudos, que pasan por un control de calidad para asegurar su precisión. A continuación, se calcula la covarianza de los datos, produciendo un vector que luego se utiliza para generar y posteriormente invertir la matriz de covarianza. Utilizando esta matriz invertida, se deriva el índice de refracción C_n^2 . Finalmente, C_n^2 se emplea para calcular el "seeing". Este proceso garantiza que los datos se procesen con la máxima precisión posible.

3.8. Sistema de comunicación

El sistema de comunicación del STP operará completamente de modo automático, está diseñado para facilitar la transferencia de datos en tiempo real. Dada la naturaleza remota del sistema, las intervenciones a distancia son inevitables para el mantenimiento y ajustes necesarios. Para facilitar estas intervenciones, es esencial contar con un servidor que tenga una dirección IP fija, permitiendo el acceso y control remoto sin interrupciones.

En términos de conectividad, se prefiere el uso de redes celulares como 3G, 4G o 5G debido a su costo accesible y amplia disponibilidad, estas redes proporcionan una solución económica y efectiva para la transferencia de datos en tiempo real. Sin embargo, en escenarios donde la cobertura de red celular puede ser limitada, Starlink se presenta como una alternativa viable, aunque más costosa.

3.9. Sistema de suministro de energía para el STP

Se pretende que el STP utilice un suministro de energía solar fotovoltaica, para proveer de energía tanto al instrumento como al sistema de comunicación y debe garantizar un abastecimiento continuo durante tres años. Además, debe contar con un sistema de respaldo adecuadamente dimensionado, considerando las condiciones geográficas de Cerro Ventarrones. Las condiciones

geográficas, como la intensidad y duración de la radiación solar en la zona, son críticas para determinar la capacidad necesaria del sistema de respaldo.

3.10. Sumario

En el capítulo 3, se presentó un análisis que abarca los principios de funcionamiento, ventajas y desventajas, configuración del diseño, estructura de datos, proceso de reducción y análisis de datos, sistema de comunicación y suministro de energía. Se menciona que el principio de operación del STP se basa en el método de covarianza para medir la turbulencia atmosférica inspirado en el Lunar Scintillometer y el Arctic Turbulence Profiler. Se emplea el método de máxima entropía para obtener estimaciones precisas a partir de datos incompletos.

Comparado con otros métodos, el diseño del STP destacará por su simplicidad y robustez, especialmente en operaciones nocturnas continuas utilizando la luz lunar. El diseño para Cerro Ventarrones incluye una configuración específica de baseline y sensores fotodiodo distribuidos para optimizar la medición de la turbulencia atmosférica .

El sistema de comunicación se ha diseñado para que el sistema opere automáticamente, facilitando la transferencia de datos en tiempo real mediante el uso de redes celulares y considerando alternativas como Starlink en áreas de cobertura limitada.

Con respecto al sistema de suministro de energía, se menciona que será alimentado por energía solar fotovoltaica, sistema que debe ser dimensionado para garantizar un abastecimiento continuo de tres años.

Capítulo 4. Análisis electrónico de la operación del STP

4.1. Introducción

En este capítulo se evaluará el sistema de comunicación digital, alimentación y respaldo del STP para Cerro Ventarrones. El objetivo principal es evaluar la carga eléctrica de operación y así encontrar la configuración óptima del sistema fotovoltaico que permita el funcionamiento eficiente y continuo del STP, considerando la potencia requerida por todos los elementos que lo componen, como la Raspberry Pi 4B+, el SSD de 4TB, el módem 4G y sensores.

Además, se considerarán las condiciones ambientales y la disponibilidad de recursos solares en Cerro Ventarrones para asegurar que el sistema funcione de manera óptima. Al final del capítulo, se propondrán recomendaciones para mejorar y favorecer el desempeño del instrumento. Estas recomendaciones abordarán tanto mejoras en la configuración del sistema fotovoltaico como estrategias de respaldo energético.

4.2. Evaluación de carga eléctrica de operación del STP

La evaluación se centra en determinar el consumo eléctrico de sus componentes para entender y gestionar eficientemente los requerimientos energéticos del sistema. El análisis no solo proporciona una visión clara de los requisitos energéticos específicos de cada dispositivo dentro del STP, sino que también permite planificar adecuadamente la fuente de energía necesaria para mantener el funcionamiento continuo y óptimo del sistema.

En el diagrama de la figura 4.1, muestra cómo se alimenta y comunica el STP. Este sistema como se ha mencionado pretende funcionar de forma autónoma, por lo que será alimentado por un sistema fotovoltaico aislado, esta energía generada será suministrada según el voltaje requerido por cada componente del sistema mediante convertidores DC-DC.

En cuanto a la comunicación del STP, las señales analógicas de los sensores son procesadas por el driver ADC y luego transmitidas a través de comunicación serial RS232 a USB al Raspberry Pi 4B+. Este dispositivo procesará todos los datos obtenidos, los transmitirá mediante el módem 4G y los almacenará en el disco SSD de 4 TB.

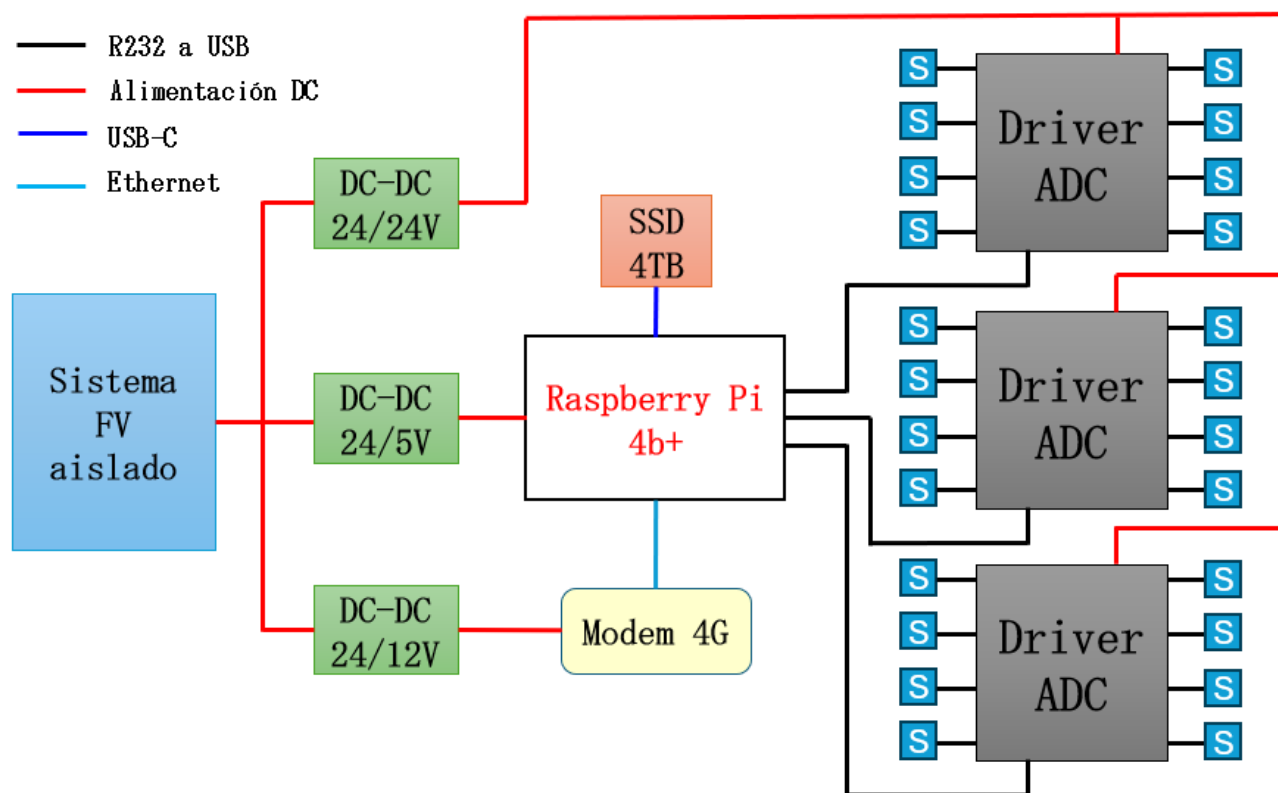


Fig. 4.1 Diagrama de comunicaciones en el STP.
Fuente: Elaboración propia.

4.2.1 Rapsberry Pi 4b

Se especifica que el sistema STP utilizará una Raspberry Pi 4 modelo B+. Entre las características de este microcomputador incluyen un procesador quad-core de 64 bits de alto rendimiento, LAN inalámbrica de banda dual 2.4/5.0 GHz, Bluetooth 5.0, Gigabit Ethernet, USB 3.0. Las especificaciones del modelo son las siguientes:

- Procesador: Broadcom BCM2711, Cortex-A72 de cuatro núcleos (ARM v8) SoC de 64 bits a 1,5 GHz.
- Memoria RAM: 8GB LPDDR4.
- Conectividad: LAN inalámbrica IEEE 802.11b / g / n / ac de 2.4 GHz y 5.0 GHz, Bluetooth 5.0, BLE.
- Gigabit Ethernet.
- 2 × USB 3.0.
- 2 × USB 2.0.
- Video y sonido: 2 puertos micro HDMI (hasta 4Kp60 admitidos).

- Puerto DSI para pantalla.
- Soporte de tarjeta SD: ranura para tarjeta micro SD para cargar el sistema operativo y almacenamiento de datos.
- Potencia de entrada: 5V DC a través del conector USB-C (mínimo 3A).
- 5V DC a través de los GPIO (mínimo 3A).
- Temperatura de funcionamiento 0–50°C.
- Dimensiones: (88 x 58 x 18,5mm).

En el contexto del STP, este dispositivo ofrece un almacenamiento amplio y una capacidad de procesamiento adecuado para manejar tareas de control en tiempo real, encargándose de procesar los datos, transmitirlos y almacenarlos.



Fig. 4.2 Raspberry Pi 4B+.
Fuente: Laboratorio NAOC, China.

4.2.2 Driver ADC

La placa de control gestiona la adquisición de datos del STP. Se comunica con la computadora principal mediante un bus RS422 a 230.4 kbps. La placa maneja la sincronización y la integridad de los datos con temporizaciones estrictas y utiliza buffers de memoria limitados para gestionar la comunicación eficiente en condiciones extremas.

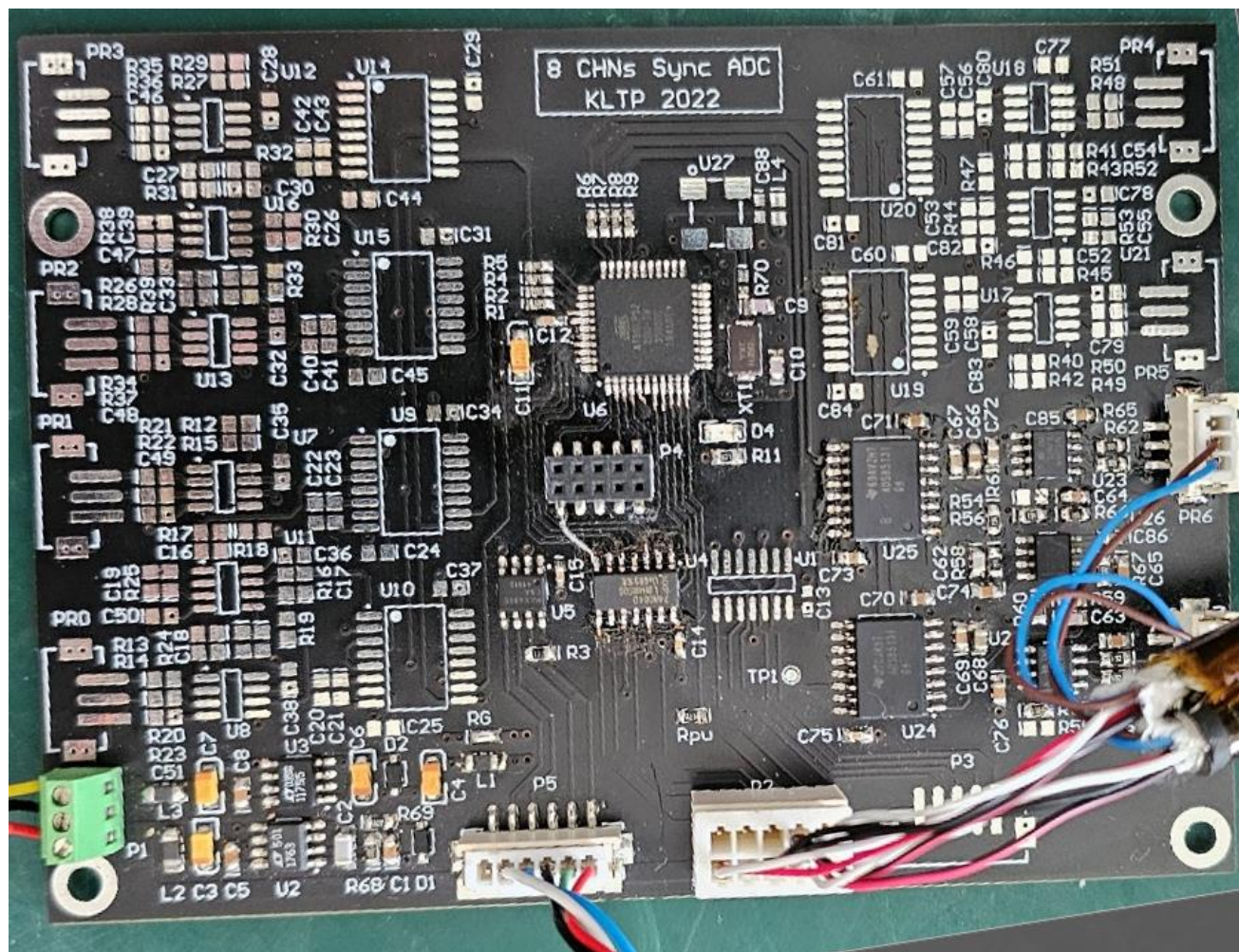


Fig. 4.3 Driver ADC del STP.
Fuente: Laboratorio NAOC, China.

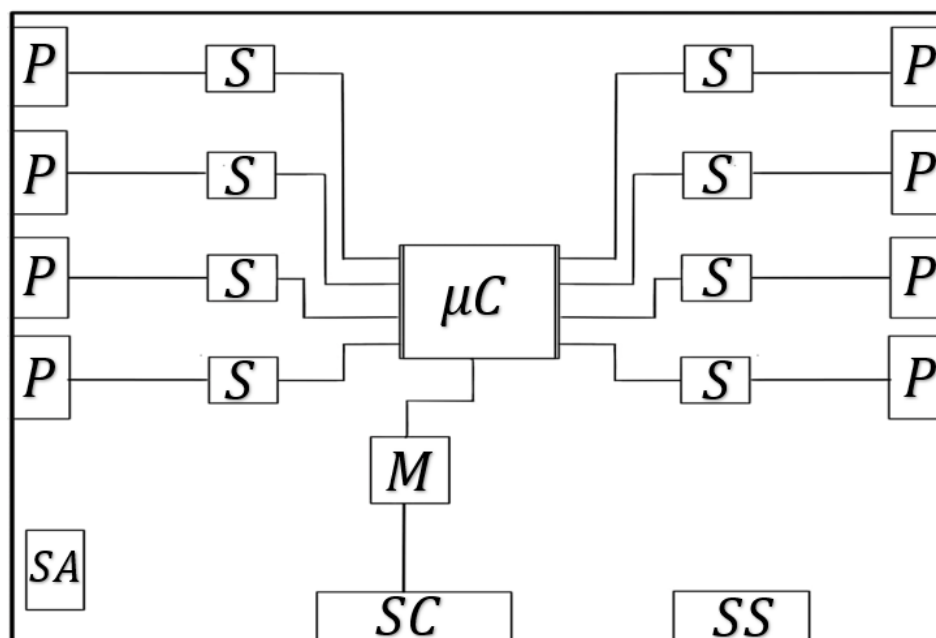


Fig. 4.4 Esquema del driver de adquisición de datos ADC del STP.

Fuente: Elaboración propia.

De la figura 4.4, se describe lo siguiente:

μC : Microcontrolador ATMEL AT892P52.

S: Convertidor analógico a digital de 16 bits, 40kSPS, conversión de baja potencia ADS8513.

P: Puerto señal del sensor.

M: Transceptor de bajo consumo para comunicación full- dúplex RS-422 MAX490E.

SA: Socket de alimentación de convertidores analógico-digital (ADC).

SC: Socket comunicación RS422 a RS232.

SS: Socket de alimentación de sensores.

El circuito de adquisición de datos del STP se alimenta el microcontrolador (μC) desde el socket de alimentación de ADC (SA), que también proporciona energía a los sensores a través del socket de alimentación (SS). Los sensores fotodiodo miden y envían sus señales al convertidor analógico a digital ADS8513, que convierte estas señales en datos digitales. Estos datos son luego procesados por el microcontrolador ATMEL AT89S52 y transmitidos al transceptor de bajo consumo MAX490E para comunicación serial RS-422. Finalmente, la información se envía a través del socket de comunicación (SC) por medio de un convertidor serial RS-422 a RS-232 (fig.4.5) que se conecta a un cable RS-232 a USB, donde será procesada por el Raspberry Pi 4B+.



Fig. 4.5 Comunicación RS422-RS232- USB.
Fuente: Laboratorio NAOC, China.

4.2.3 Parámetros de operación

A. *Velocidades de Transmisión:*

El sistema opera con una tasa de transmisión de 230.4 kbps, esta velocidad de transmisión asegura que los datos recolectados por los sensores sean enviados y procesados en tiempo real, minimizando latencias y garantizando una respuesta oportuna a las condiciones cambiantes.

B. *Tamaño de Paquetes*

Los mensajes en formato RTU tienen un tamaño máximo de 255 bytes, incluyendo hasta 252 bytes de datos útiles. En el caso de los mensajes de datos provenientes del ADC, cada paquete tiene una longitud fija de 21 bytes. Este tamaño de paquete permite una transmisión eficiente de datos, asegurando que la información se envíe en bloques manejables que optimizan el uso del ancho de banda disponible.

C. *Tiempo de Muestreo*

El sistema tiene una frecuencia de muestreo de 600 Hz, lo que significa que los datos se capturan 600 veces por segundo. El intervalo entre paquetes de datos es de 1.67 milisegundos, y el tiempo de transmisión de cada mensaje es de 0.87 milisegundos. Estos tiempos de muestreo y transmisión permiten una monitorización continua y precisa de las variables ambientales y del sistema, asegurando una alta resolución temporal en la recolección de datos.

D. Transmisión de Datos

Cada paquete de datos del ADC incluye una cabecera de 2 bytes, 16 bytes de datos del ADC y 2 bytes de verificación CRC16, sumando un total de 20 bytes por paquete. Con una frecuencia de muestreo de 600 Hz y un intervalo de 1.67 milisegundos entre paquetes, el sistema transmite datos de manera eficiente y rápida. La cantidad de datos transmitidos dependerá de la configuración específica y del número de sensores y canales activos en el sistema, asegurando que toda la información relevante se transmita de manera oportuna.

4.2.4 Sensor HAMAMATSU serie S1336

El sensor de fotodiodo de la serie S1336 posee capacidades excepcionales para la detección de luz en un rango espectral que abarca desde el ultravioleta (UV) hasta el infrarrojo cercano (IR), lo cual lo hace adecuado para aplicaciones que requieren alta sensibilidad en condiciones de baja luminosidad. Este sensor es especialmente útil en instrumentos analíticos y equipos de medición óptica debido a su alta fiabilidad y baja capacitancia. Además, la serie S1336 incluye varias configuraciones, cada una con tamaños de área fotosensible específicos que permiten una integración flexible en diferentes dispositivos.

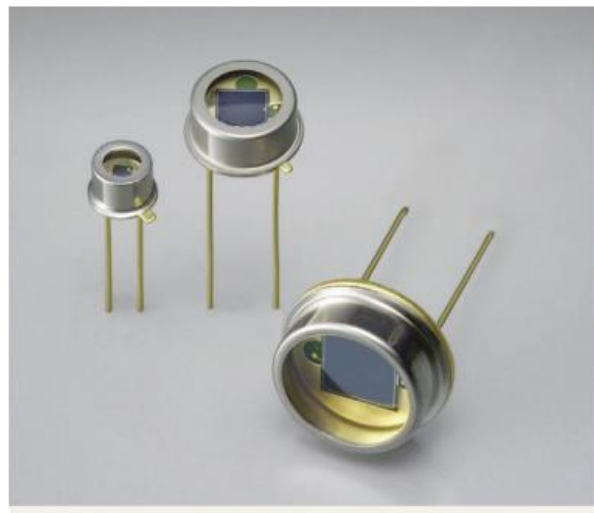


Fig. 4.6 Sensor fotodiodo de Silicio, HAMAMATSU serie S1336.

Fuente: hamamatsu.com.

En términos de respuesta óptica, el S1336 se destaca por su capacidad de operar en un amplio rango espectral, desde 190 nm hasta 1100 nm, con peaks de sensibilidad que varían según el modelo. Por ejemplo, el modelo S1336-18BQ tiene una respuesta espectral que cubre desde los 190 nm hasta

los 1100 nm, proporcionando una fotosensibilidad adecuada para detectar variaciones mínimas de luz. Además, la corriente oscura y el voltaje inverso son características críticas que afectan su rendimiento, con valores que han sido optimizados para minimizar la interferencia en las mediciones ópticas.

El gasto en potencia de estos sensores se mantiene bajo, lo que es crucial para aplicaciones que requieren operación continua y eficiencia energética. Los valores típicos de la corriente oscura son bajos, y la potencia de ruido equivalente se encuentra en rangos extremadamente bajos. Esta característica permite que el sensor mantenga una alta precisión y sensibilidad sin comprometer el consumo energético, lo cual es vital en dispositivos portátiles y de bajo consumo.

El STP, como se mencionó en el capítulo 3, contará con 24 sensores fotodiodo en total, 8 por driver ADC, hasta el momento, se ensamblaron dos sensores para realizar pruebas en campo (figura 4.7).

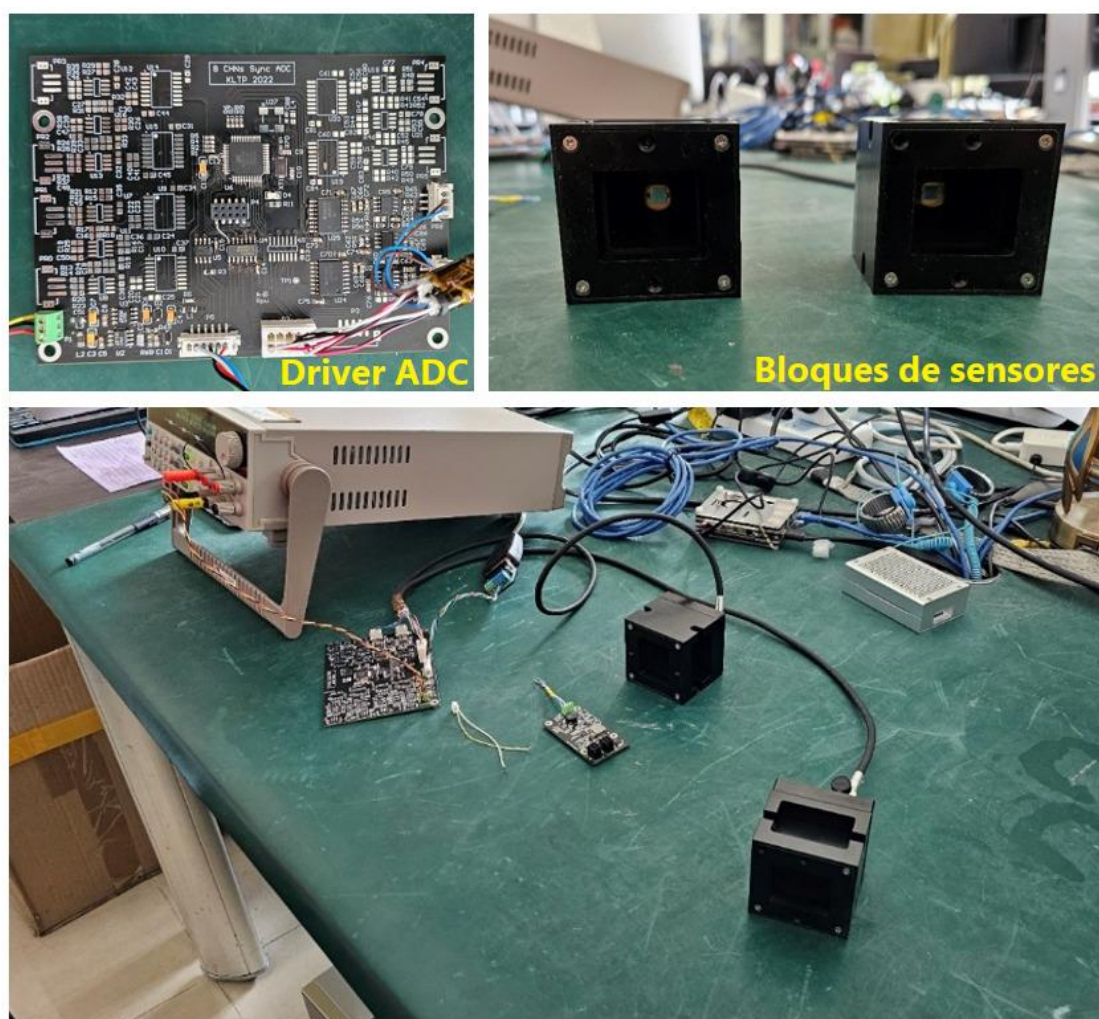


Fig. 4.7 Prototipo STP ensamblado en laboratorio. NAOC, China.

Para determinar el consumo energético de este prototipo se realizaron mediciones en tres estados de operación: sin conexión de sensores, con la conexión de un sensor, y con la operación simultánea de ambos sensores.

Tabla 4.1 Voltaje y corriente en distintas condiciones de operación mostradas en fuente DC.

Parámetros de operación de circuito ADC cuando se desconectan los sensores.	
Parámetros de operación de circuito ADC cuando se conecta un sensor.	
Parámetros de operación de circuito ADC cuando se conectan ambos sensores.	

Fuente: Laboratorio NAOC, China.

Los datos obtenidos se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 4.2 Mediciones obtenidas en laboratorio. NAOC, China.

Sensores en operación [uds]	Voltaje [V]	Corriente [A]	Potencia [W]
0	6	0.0230	0.1380
1	6	0.0420	0.2520
2	6	0.0640	0.3839

Fuente: Elaboración propia.

4.3. Consideraciones

Para realizar esta evaluación, es importante considerar que el modelo ensamblado actualmente, solo cuenta con dos sensores. Por lo tanto, la evaluación que se está realizando es una aproximación. Para desarrollar esta estimación se plantea el uso de métodos de interpolación y extrapolación lineal, con el fin de estimar la corriente con 24 sensores y así obtener un acercamiento al valor de la energía que consumiría la placa y los sensores.

4.4. Estimación de parámetros de operación

Para obtener los parámetros faltantes se utilizaron los métodos de extrapolación e interpolación lineal, estos son métodos para estimar valores desconocidos que están fuera del rango de datos conocidos y para valores que caen entre dos valores conocidos, respectivamente. Matemáticamente, en la interpolación lineal, si conocemos los puntos $(x_1 - y_1)$ y $(x_2 - y_2)$, la ecuación para estimar un valor y para un punto x dentro del rango $[x_1, x_2]$ es:

$$y = y_1 + \frac{(x - x_1) \cdot (y_2 - y_1)}{x_2 - x_1} \quad (4.1)$$

Donde,

$(x - x_1) \cdot (y_2 - y_1)$: Puntos conocidos.

x : Valor en que se desea estimar y .

y : Valor interpolado.

La ecuación 4.1 calcula el valor y como una proporción de la distancia entre x y los puntos conocidos.

La extrapolación lineal se utiliza para estimar valores fuera del rango de datos conocidos. Utiliza la misma fórmula que la interpolación lineal, pero se aplica para valores x fuera del rango $[x_1, x_2]$. En este caso, la fórmula extiende la línea más allá de los puntos conocidos, asumiendo que la relación lineal observada en los datos continúa de la misma manera.

Para realizar la estimación de los datos de corriente y potencia en función del número de sensores se realizó un script en Matlab, a partir de los datos iniciales (tabla 4.2) de 0, 1 y 2 sensores. Utilizando la extrapolación lineal, se calcularon los valores de corriente y potencia para los sensores de 3 a 8. A partir de los valores extrapolados, se determinó la potencia con 8 sensores, la cual se duplicó y triplicó para obtener las potencias correspondientes a 16 y 24 sensores, respectivamente.

Utilizando la Ley de Ohm y el voltaje constante de 6V, se calcularon las corrientes para estos puntos. Finalmente, se combinaron los datos originales con los puntos nuevos (16 y 24 sensores) y se realizó una interpolación final para todos los sensores desde 0 hasta 24, obteniendo así una relación completa de corriente y potencia en función del número de sensores, como se observa en la tabla 4.3.

Tabla 4.3 Parámetros estimados a partir de los valores de las mediciones en laboratorio.

Sensores en operación [uds]	Voltaje [V]	Corriente [A]	Potencia [W]
0	6	0.023	0.137
1	6	0.042	0.251
2	6	0.064	0.383
3	6	0.086	0.515
4	6	0.108	0.647
5	6	0.130	0.779
6	6	0.152	0.911
7	6	0.174	1.043
8	6	0.196	1.175
9	6	0.220	1.322
10	6	0.244	1.469
11	6	0.269	1.616
12	6	0.294	1.763
13	6	0.319	1.910
14	6	0.343	2.057
15	6	0.367	2.204
16	6	0.392	2.351
17	6	0.416	2.498
18	6	0.441	2.645
19	6	0.465	2.792
20	6	0.490	2.939
21	6	0.514	3.086
22	6	0.539	3.233
23	6	0.563	3.380
24	6	0.588	3.527

Fuente: Elaboración propia.

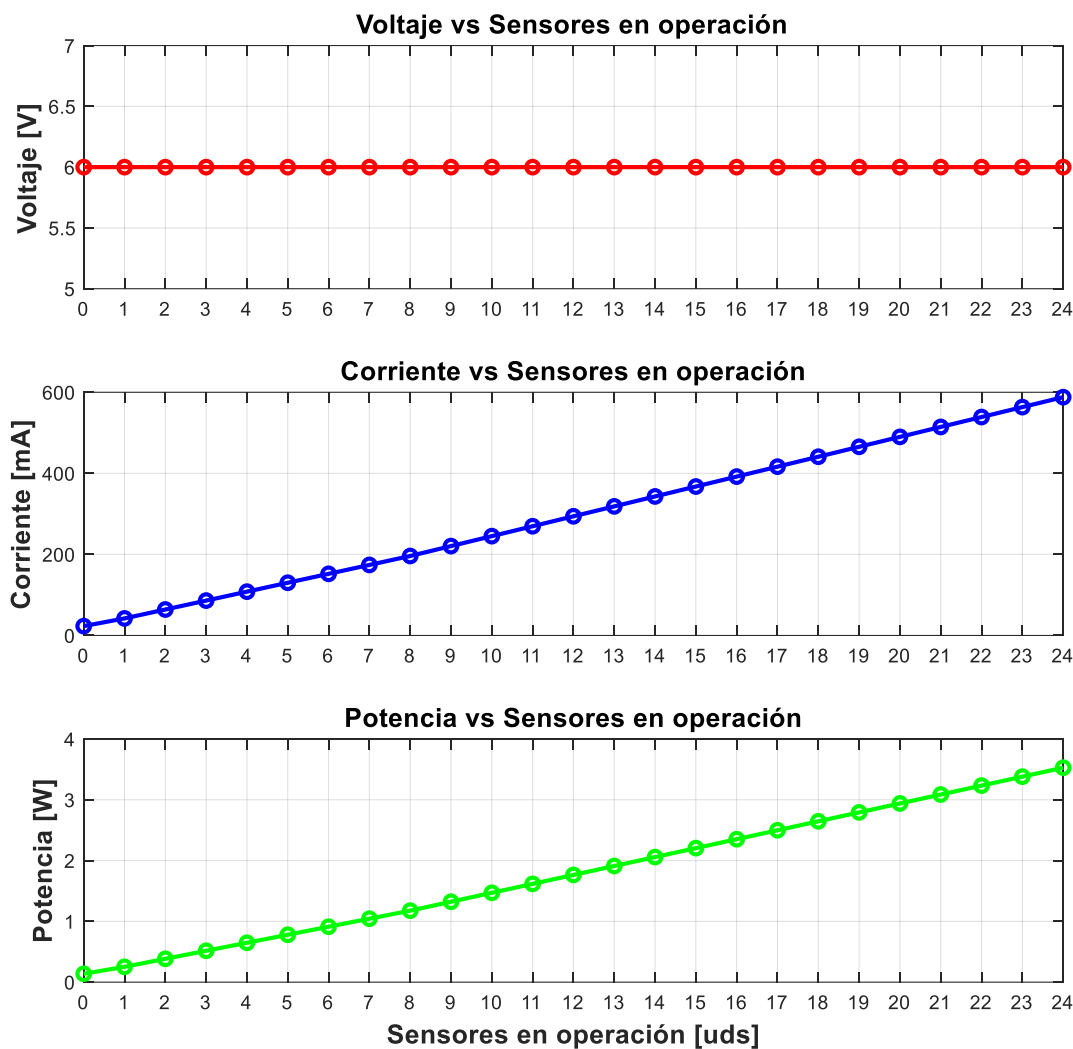


Fig. 4.8 Grafica estimada de Voltaje, Corriente y Potencia en STP con respecto a cada sensor.
Fuente: Matlab R2020a.

En la gráfica presentada en la figura 4.8, se observa la relación entre el número de sensores en operación y las variables eléctricas de voltaje, corriente y potencia. El voltaje se mantiene constante en 6 V. La corriente y la potencia, en cambio, aumentan linealmente con el incremento del número de sensores. La corriente alcanza los 588 mA y la potencia 3.527 W cuando hay 24 sensores en operación. Estos resultados, obtenidos mediante interpolación lineal, son coherentes con las leyes de circuitos eléctricos y demuestran un comportamiento proporcional y consistente en la adición de sensores al sistema.

Teniendo todos los consumos, se tabulan los datos:

Tabla 4.4 Parámetros de los componentes del Sistema STP.

Componentes del STP	Voltaje [V]	Corriente[A]	Potencia[W]
Raspberry Pi 4B+	5	2	10
4TB SSD	5	1	5
4G modem	12	0.833	10
Sensores stand-by	6	0.0230	0.1380
Sensores operando	6	0.5879	3.5268

Fuente: Elaboración propia.

La tabla 4.4, la potencia total estimada que consumiría el sistema STP y sus componentes. Se debe tener en consideración que los sensores fotodiodo no siempre muestran una relación lineal estricta entre el número de sensores activos y el consumo de potencia. A medida que aumenta el número de sensores, pueden surgir efectos no lineales debido a variaciones en la eficiencia de cada sensor y posibles interacciones entre ellos. Esto puede resultar en un aumento no proporcional en el consumo de potencia conforme se agregan más sensores. Además, en sistemas electrónicos complejos, como el circuito ADC, pueden ocurrir efectos de saturación y pérdidas adicionales que no se capturan completamente en mediciones limitadas.

Estos efectos pueden incluir caídas de voltaje adicionales, resistencia interna del circuito y otros factores que afectan el consumo total de energía. Y por último, las mediciones se realizaron en condiciones controladas de laboratorio, que podrían diferir de las condiciones reales de operación. Es posible que las condiciones de iluminación que eran relativamente bajas durante las mediciones no reflejen completamente el consumo de potencia.

Por esto, se plantea utilizar un margen de seguridad. Es prudente sobredimensionar la energía, esto asegura que el sistema pueda operar de manera confiable bajo diferentes condiciones de iluminación y cargas, evitando fallos debido a un suministro insuficiente de potencia. Al agregar un margen del 20% en la energía, se asegura que el sistema tenga suficiente capacidad de reserva para operar de manera eficiente y confiable bajo diversas condiciones de uso y variaciones en el entorno.

4.5. Evaluación fotovoltaica

Conociendo el consumo total del conjunto, es posible evaluar el sistema fotovoltaico aislado para Cerro Ventarrones.

4.5.1 Datos geográficos

Para estudios fotovoltaicos, los datos geográficos son de gran importancia, ya que permiten determinar la orientación, inclinación e irradiancia óptimas para los paneles solares. Factores como la latitud, la trayectoria del sol y las variaciones estacionales de la radiación solar son esenciales para maximizar la eficiencia de la captación de energía. La irradiancia o cantidad de radiación solar recibida, es clave para evaluar el potencial de generación de energía de un sistema fotovoltaico.

Los datos necesarios para llevar a cabo esta evaluación se obtuvieron del explorador solar, una plataforma que el Ministerio de Energía dispone para realizar este tipo de estudios.

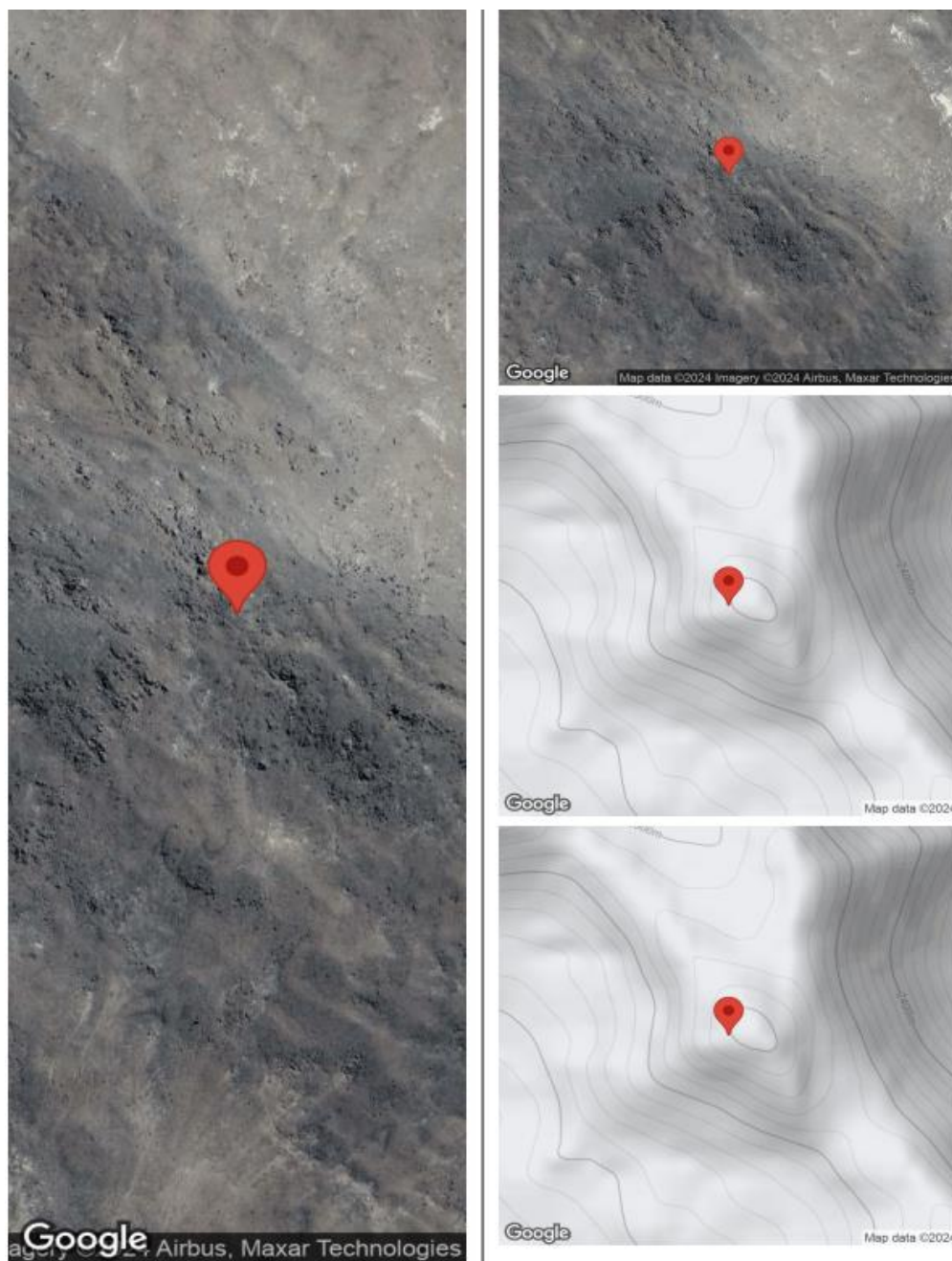
4.5.2 Sitio

En esta sección se muestran las características topográficas del sitio Cerro Ventarrones, Antofagasta que fueron obtenidas del reporte del explorador solar.

Tabla 4.5 Ubicación geográfica del sitio Cerro Ventarrones.

Latitud	Longitud	Elevación
24.3522 °S	70.225 °O	2595 m.s.n.m

Fuente: iaucn.cl.



**Fig. 4.9 Explorador Solar indicando la ubicación de Cerro Ventarrones, Antofagasta.
Fuente: Reporte Explorador Solar, MINERGIA.**

Ingresando esta ubicación geográfica en el explorador, se logra obtener información importante que permitirá desarrollar esta evaluación fotovoltaica.

4.6. Condiciones meteorológicas del sitio

4.6.1 Radiación

Las siguiente tabla y gráfico muestran los promedios de la radiación global sobre un plano horizontal y sobre un plano orientado hacia el norte, con una inclinación igual a la latitud del sitio. Estos datos permiten optimizar la orientación y la inclinación de los paneles, maximizando la producción de energía.

Tabla 4.6 Radiación incidente global en plano horizontal e inclinado.

Mes	Global Horizontal (kWh/m ² /día)	Global Inclinado (kWh/m ² /día)
Enero	9.63	8.53
Febrero	8.86	8.57
Marzo	7.95	8.60
Abril	6.52	7.95
Mayo	5.27	7.10
Junio	4.64	6.59
Julio	4.88	6.73
Agosto	6.01	7.87
Septiembre	7.48	8.49
Octubre	8.77	8.68
Noviembre	9.63	8.75
Diciembre	9.87	8.55
Total	85.73	89.00

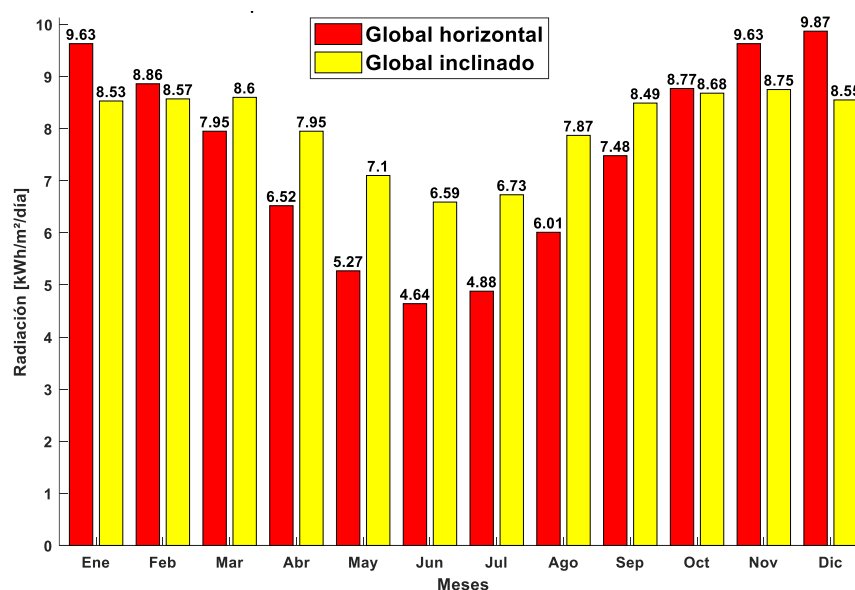


Fig. 4.10 Promedio mensual de la radiación diaria global en plano horizontal e inclinado.
Fuente: Reporte Explorador Solar, MINERGIA.

Los valores totales de radiación de la tabla 4.6 muestran que la inclinación más conveniente es la del plano inclinado. Esto se observa gráficamente en la figura 4.10, los meses de verano (diciembre a febrero), la radiación en el plano horizontal es ligeramente superior a la del plano inclinado. En los meses de invierno (junio, julio), la radiación en el plano inclinado es significativamente mayor que en el plano horizontal. Durante los meses de transición (marzo, abril, septiembre, octubre), la diferencia entre los dos tipos de radiación es menor, con una ligera ventaja para la radiación inclinada en algunos meses. Esto sugiere que la inclinación del plano de captura es beneficiosa para optimizar la captación de radiación solar durante los meses de menor insolación.

4.6.2 Ciclo diario de radiación

El análisis del ciclo diario de radiación es fundamental para diseñar un sistema de respaldo eficiente en una instalación solar. Este estudio permite determinar cuántas horas se deben estimar para que el sistema de respaldo funcione durante los periodos sin irradiancia solar. Al comprender cómo varía la radiación solar a lo largo del día, es posible identificar las horas de mayor y menor generación de energía, y planificar la capacidad del sistema de respaldo para asegurar una operación continua.

Tabla 4.7 Promedio horario de la radiación incidente en unidades de [W/m²]

Hora	Radiación en plano horizontal [W/m ²]	Radiación en plano inclinado [W/m ²]
0	0.0	0.0
1	0.0	0.0
2	0.0	0.0
3	0.0	0.0
4	0.0	0.0
5	0.0	0.0
6	1.2	1.16
7	76.5	43.82
8	286.4	280.99
9	540.06	586.13
10	747.67	816.83
11	898.8	983.06
12	985.1	1078.77
13	1000.1	1095.89
14	939.92	1029.57
15	807.73	883.04
16	618.39	673.17
17	387.29	415.25
18	148.33	128.28
19	17.81	4.22
20	0.0	0.0
21	0.0	0.0
22	0.0	0.0
23	0.0	0.0

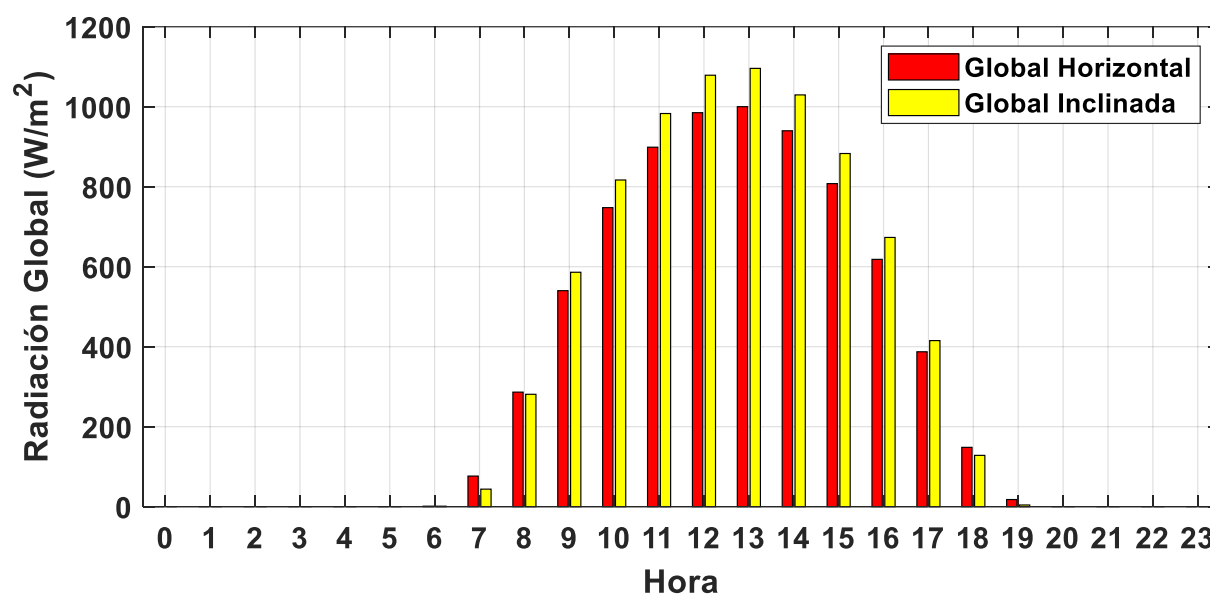


Fig. 4.11 Promedio horario de radiación global en plano horizontal e inclinado.
Fuente: Reporte Explorador Solar, MINERGIA.

A partir de los datos anteriores de radiación solar diaria, se recomienda considerar 15 horas sin radiación para la evaluación del sistema de respaldo. Esta recomendación se basa en la ausencia de radiación significativa desde las 19:00 hasta las 7:00 horas. Además, se incluye un margen adicional de 2 horas para cubrir posibles condiciones climáticas adversas, como nubosidad o polvo atmosférico, que podrían afectar la eficiencia del sistema solar. Esto garantiza que el sistema de respaldo sea capaz de soportar la carga durante las horas de baja o nula radiación solar, proporcionando una operación continua.

4.6.3 Viento

La velocidad del viento interviene en el enfriamiento de las celdas fotovoltaicas, y por lo tanto en su eficiencia, además puede afectar la integridad del montaje de los paneles. Las estimaciones de viento aquí presentadas corresponden a los resultados del Explorador Eólico para una altura de 5.5 metros sobre la superficie, calculados con el modelo WRF a 1 [km] de resolución para el año 2010.

Tabla 4.8 Promedio mensual de la magnitud del viento.

Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
m/s	4.77	4.84	4.11	3.8	4.52	4.42	4.72	4.4	4.61	4.79	5.	4.71

Tabla 4.9 Promedio de la magnitud del viento para cada hora.

Hora	00	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11
m/s	4.03	4.07	4.25	4.43	4.52	4.55	4.54	4.49	4.56	4.72	5.07	5.21
Hora	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
m/s	5.12	5.15	5.43	5.82	5.82	5.09	3.8	2.96	3.46	4.18	4.34	4.16

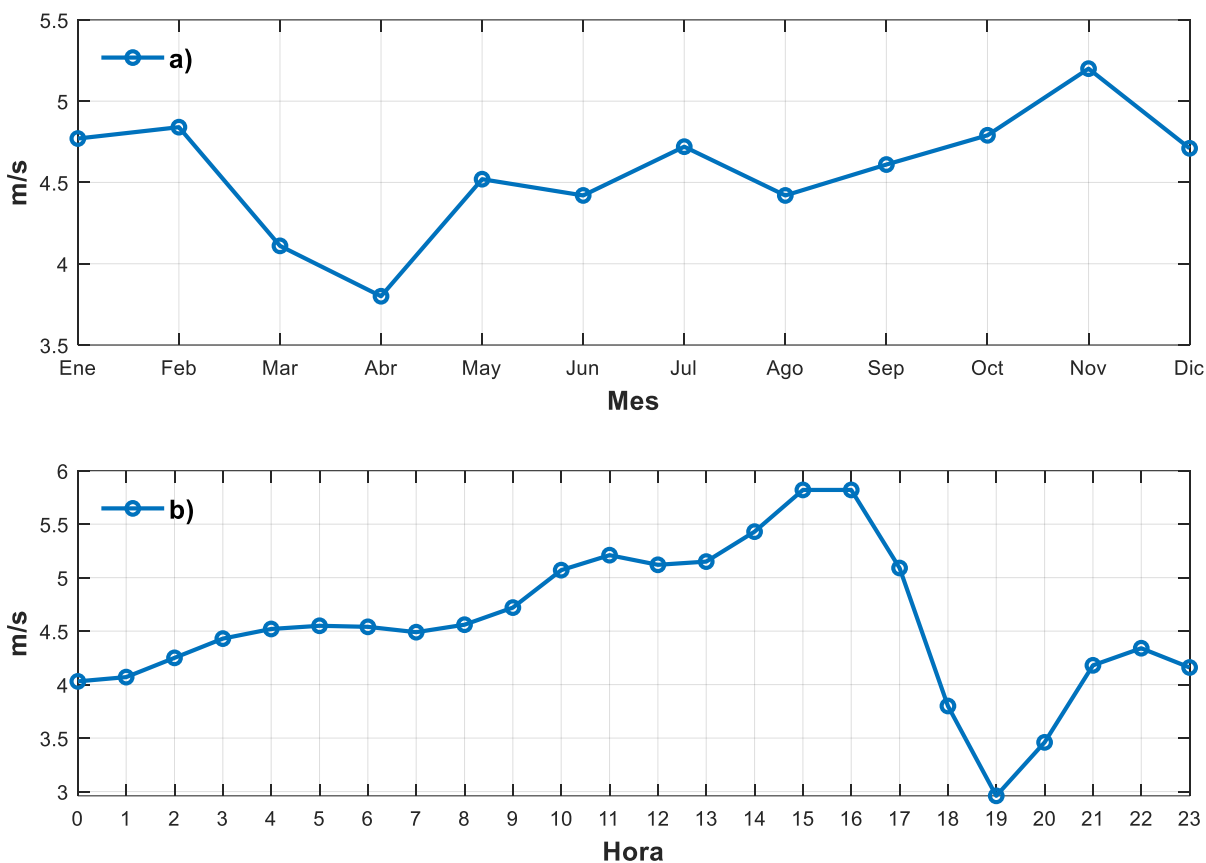


Fig. 4.12 a) Ciclo anual de la magnitud del viento, b) Ciclo diario de la magnitud del viento.
Fuente: Reporte Explorador Solar, MINERGIA.

A partir de los valores de la magnitud del viento en Cerro Ventarrones, se puede concluir que los valores de velocidad del viento serían válidos para asegurar la resistencia de la instalación fotovoltaica. Las velocidades promedio por hora varían entre 2.96 y 5.82 m/s. Estas velocidades están dentro de los límites que los sistemas fotovoltaicos pueden soportar de acuerdo con las normativas de seguridad de instalaciones fotovoltaicas en condiciones de vientos fuertes.

4.6.4 Inclinación de la instalación FV

Para optimizar la captación de energía solar en Cerro Ventarrones, se recomienda orientar los paneles solares con una inclinación igual a la latitud del lugar, en este caso, 24° hacia el norte. Esta

orientación maximiza la exposición de los paneles a la radiación solar durante todo el año, ya que en el hemisferio sur el sol se encuentra en el norte durante la mayor parte del día. Así, los paneles reciben la radiación solar más directa y continua, operando de manera eficiente.

Para mejorar la eficiencia estacional, se podrían realizar ajustes en la inclinación del panel solar. Durante el verano, se recomienda disminuir la inclinación unos 10° respecto a la latitud, situándola aproximadamente en 14° , ya que el sol está más alto en el cielo y una inclinación menor permite capturar más radiación directa. En invierno, es aconsejable aumentar la inclinación unos 10° , situándola aproximadamente en 34° , dado que el sol está más bajo en el cielo y una mayor inclinación ayuda a captar mejor la radiación solar, evitando pérdidas de eficiencia.

4.7. Diseño del sistema fotovoltaico aislado

Para del garantizar la autonomía STP, es indispensable contar con un sistema fotovoltaico aislado, equipado con un sistema de respaldo que garantizará el funcionamiento ininterrumpido del STP cuando anochece o en caso de cortes en el suministro eléctrico. Para dimensionar adecuadamente este sistema de respaldo, se elaborará un estudio detallado que determinará la potencia fotovoltaica requerida, la capacidad de la batería de respaldo y las características del regulador de carga necesario.

4.7.1 Dimensionamiento del panel solar

Para calcular la cantidad de paneles necesarios para abastecer de energía eléctrica al STP, es esencial conocer el consumo de cada componente y su tiempo de operación. Se sabe que este instrumento comenzará a operar cuando detecte la luna; por ello, se recomienda considerar al menos 15 horas de operación de los sensores, y el resto del tiempo en modo Stand-by (9 horas). Dado que es necesario monitorear el estado del STP en tiempo real, los demás componentes operarán de manera continua. Utilizando las potencias indicadas en la tabla 4.4 y la ecuación 4.2, se puede calcular el consumo diario de energía para cada elemento. Cabe mencionar que a este consumo diario se le aplicará el margen de seguridad del 20 % mencionado en el punto 4.4.

$$E_d = P[W] \cdot t[h] \quad (4.2)$$

Donde,

E_d : consumo energético diario.

P : potencia del componente del STP.

t : horas de operación.

Así, desarrollando cada caso, los valores obtenidos se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 4.10 Consumo energético diario del STP.

Componentes del STP	Potencia[W]	Horas de operación	Energía diaria [Wh]
Raspberry Pi 4B+	10	24	240
4TB SSD	5	24	120
4G modem	10	24	240
Sensores stand-by	0.1380	9	1.242
Sensores operando	3.5268	15	52.902
Total	-	-	654.144
Energía total + margen 20%	-	-	784.973

Fuente: Elaboración propia.

Desarrollando la ecuación, se tiene que el consumo diario de energía es de 784.973 Wh.

Para calcular la potencia fotovoltaica, se utilizó una metodología basada en seleccionar el menor valor de horas peak de sol o PSH por sus siglas en inglés (tabla 4.11) y consumo diario mayor. Este enfoque asegura que los sistemas diseñados puedan operar de manera confiable incluso en condiciones adversas de radiación solar y altas demandas de energía. Al considerar el peor escenario posible, se garantiza que el sistema sea capaz de satisfacer las necesidades máximas de energía durante todo el año.

Tabla 4.11 Peak Sun Hour inclinada en Cerro Ventarrones.

Mes	PSH Global Inclinado
Enero	8.53
Febrero	8.57
Marzo	8.60
Abril	7.95
Mayo	7.10
Junio	6.59
Julio	6.73
Agosto	7.87
Septiembre	8.49
Octubre	8.68
Noviembre	8.75
Diciembre	8.55

Fuente: Reporte Explorador Solar, MINERGIA.

De la tabla anterior se desprende que el mes con menor radiación es junio, este dato es relevante para la obtener la potencia fotovoltaica,

$$P_{FV} = \frac{E_d}{PSH_{min} \cdot \eta} \quad (4.3)$$

donde:

- P_{FV} : Potencia Fotovoltaica.
 E_d : Consumo energético diario.
 PSH_{min} : Hora peak solar menor.
 η : Eficiencia del sistema.

Desarrollando la ec. 4.3, se obtiene la potencia fotovoltaica del sistema.

$$P_{FV} = \frac{784.973}{6.59 \cdot 90\%} = 132.35 \text{ W}$$

Se considera que el sistema tendrá una eficiencia del 90%, por lo tanto, la potencia fotovoltaica resultante es de 132.35 W. Se eligió un panel de 150 W, que, aunque es ligeramente superior al valor calculado de 132.35 W, se ajusta dentro de las opciones disponibles en el mercado y asegura un suministro de energía adecuado para las necesidades del proyecto.

Tabla 4.12 Panel solar 150 W SLD-TECH.

Modulo Monocristalino Yi.Solar Yi6Q-150M-24V	
Potencia nominal Pmax	150 [Wp]
Voltaje VMPP	36.06 [V]
Corriente IMPP	4.16 [A]
Voltaje Circuito abierto V _{OC}	45.07 [V]
Corriente de Corto Circuito I _{SC}	4.62 [A]

Fuente: Elaboración propia (Anexo A.1.)

Tabla 4.13 Verificación de suficiencia de potencia del sistema FV.

Mes	Energía Generada (Wh)	Consumo Diario (Wh)	Suficiente?
Enero	1128.95	784.973	Sí
Febrero	1134.25	784.973	Sí
Marzo	1138.22	784.973	Sí
Abril	1052.19	784.973	Sí
Mayo	939.69	784.973	Sí
Junio	872.19	784.973	Sí
Julio	890.72	784.973	Sí
Agosto	1041.60	784.973	Sí
Septiembre	1123.66	784.973	Sí
Octubre	1148.81	784.973	Sí
Noviembre	1158.07	784.973	Sí
Diciembre	1131.60	784.973	Sí

Fuente: Elaboración propia.

La tabla 4.13 muestra el análisis mensual de la producción de energía generada por el sistema fotovoltaico y su comparación con el consumo diario de energía. En cada mes del año, la energía generada por el sistema supera el consumo diario constante de 784.973 Wh.

Los valores de energía generada varían a lo largo del año, reflejando las fluctuaciones estacionales en la irradiancia solar. A pesar de estas variaciones, la producción mensual es siempre suficiente para cubrir el consumo diario.

Este análisis demuestra que el sistema fotovoltaico está dimensionado adecuadamente para satisfacer las necesidades energéticas durante todo el año. Incluso en los meses con menor producción, como mayo y junio, la energía generada sigue siendo superior al consumo requerido. Esta consistencia en la suficiencia energética asegura una operación fiable y sostenida del sistema, sin déficit de energía.

4.7.2 Dimensionamiento del sistema de respaldo

En una instalación fotovoltaica aislada, las baterías tienen como objetivo acumular la energía eléctrica generada por los paneles solares para suplir la demanda durante la noche o en momentos que se presenten variaciones del recurso solar.

Para el STP, el dimensionamiento de la batería se evaluó para dos escenarios: uno de 24 horas, y otro de 48 horas. Un respaldo de 1 día es suficiente para cubrir situaciones imprevistas como días nublados o tormentas de arena, permitiendo que el sistema funcione durante 24 horas sin interrupción. Este dimensionamiento también facilita el mantenimiento y reemplazo de componentes, minimizando el riesgo de fallos prolongados. Además, es una opción más económica en términos de costos de batería y espacio requerido.

En contraste, un respaldo de 2 días ofrece una mayor seguridad al proporcionar un margen adicional para eventos prolongados de mal tiempo o problemas en la generación de energía. Esta opción reduce la dependencia de condiciones solares óptimas y mejora la estabilidad operativa del instrumento en el desierto de Atacama, donde el acceso para mantenimiento puede ser limitado. Aunque el costo de las baterías es mayor, el respaldo adicional puede ser crucial en un entorno remoto y variable.

Para determinar la capacidad de la batería necesaria, se utilizó la siguiente ecuación:

$$C_{bateria} = \frac{E_h \cdot t_{respaldo} \cdot F_c}{V_{bateria} \cdot DoD} \quad (4.4)$$

donde,

$t_{respaldo}$: tiempo de respaldo en horas.

- E_h : consumo energético por hora.
 F_C : factor de corrección.
 DoD : profundidad de descarga de la batería.
 $V_{bateria}$: voltaje nominal de la batería.

Esta fórmula calcula la capacidad de la batería necesaria para proporcionar la energía diaria consumida durante el tiempo de respaldo deseado, teniendo en cuenta el voltaje del sistema, un factor de corrección de 15% (ajuste aplicado a la capacidad de la batería para reflejar condiciones reales de operación, como temperatura y envejecimiento), y la profundidad de descarga (DoD), que es el porcentaje de la capacidad total de la batería utilizada durante un ciclo de descarga. Una DoD del 80% indica que se ha utilizado el 80% de la capacidad total antes de recargar. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 4.14.

De la ecuación 4.4, se tiene para el primer caso que:

$$C_{bateria} = \frac{784.97[W] \cdot 1.15}{24[V] \cdot 0.8} = 47.02[Ah]$$

Para el segundo caso, en el que se requiere un respaldo de 2 días, la ecuación se ajusta a:

$$C_{bateria} = \frac{\frac{784.97[W]}{24[h]} \cdot 48[h] \cdot 1.15}{24[V] \cdot 0.8} = 94.03[Ah]$$

A continuación, se presentan los resultados tabulados para una visión clara de las capacidades de almacenamiento necesarias para ambos escenarios:

Tabla 4.14 Capacidad de respaldo de batería para diferentes duraciones.

Respaldo para 1 día	Respaldo para 2 días
24 V / 47.02Ah	24 V / 94.03Ah

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados indican las capacidades de respaldo energético necesarias para que el STP esté operativo durante períodos de 1 día y 2 días, respectivamente. Para un respaldo de 1 día, se requiere una capacidad de almacenamiento de energía de 47.02 Ah, mientras que para un respaldo de 2 días se necesitan 94.03 Ah. Traduciendo estos valores a capacidades comerciales, se recomiendan baterías de 50 Ah para el primer caso y de 100 Ah para el segundo.

4.7.3 Dimensionamiento del regulador de carga

La función de un regulador de carga es proteger la batería para que no entre en situaciones de comportamiento extremo que puedan llegar a dañarla. Su funcionamiento consiste en tomar información del estado de carga del sistema, por ejemplo, usando el voltaje de la batería, y compararlo con los valores mínimos y máximos admisibles para que la batería no entre en procesos de sobrecarga o descarga extrema que puedan dañarla.

En la selección del regulador de carga se debe tener en cuenta que debe ser capaz de manejar tanto la corriente de cortocircuito del panel fotovoltaico como la máxima corriente de carga de la batería. En este contexto, la corriente de carga de la batería estará dada por:

$$I_{carga\ bateria} = \frac{P_{max}}{V_{bateria}} \quad (4.5)$$

donde,

$I_{carga\ bateria}$: corriente máxima de carga de batería.

P_{max} : potencia del panel.

$V_{bateria}$: voltaje nominal de la batería en voltios (V).

$$I_{carga\ bateria} = \frac{150[W]}{24[V]} = 6.25[A]$$

Desarrollando la ecuación (4.5), se obtiene que la corriente de carga de la batería es de 6.25 [A], el regulador de carga seleccionado deberá tener una capacidad de manejo de corriente que sea el doble de la corriente obtenida y que pueda soportar la corriente de cortocircuito de panel.

$$I_{regulador} = 2 \cdot I_{carga\ bateria} \quad (4.6)$$

Por lo tanto, a partir del desarrollo de la ecuación 4.6, se obtiene que la corriente que debe manejar el controlador es aproximadamente 12.5 A, con una tensión de 24 V.

Para el STP en Cerro Ventarrones, se recomienda el regulador de tipo MPPT Victron Bluesolar 15A 12/24V MPPT 75V por sobre los reguladores de tipo PWM, debido a su eficiencia superior y capacidad para maximizar la captación de energía solar en condiciones variables y radiación no ideal.

4.8. Evaluación de costo del sistema fotovoltaico aislado

La siguiente evaluación de costos proporciona un desglose detallado de los componentes necesarios para el sistema fotovoltaico propuesto. Esta evaluación incluye el Regulador de Carga MPPT, las Baterías de Litio, y el panel fotovoltaico. Los precios netos, el IVA correspondiente y los

precios finales se han detallado para cada componente, y se incluyen los enlaces a los proveedores para referencia adicional.

Debido a la escasa oferta de baterías de 24V y 50Ah en el mercado, para el sistema de respaldo de 1 día, se optó por utilizar dos baterías de 12V y 50Ah conectadas en serie para cumplir con los requerimientos del sistema. Esta configuración permite alcanzar el voltaje necesario de 24V mientras se mantiene la misma capacidad de 50Ah. Además, esta solución ofrece mayor flexibilidad y disponibilidad, ya que las baterías de 12V son más comunes y fáciles de adquirir, asegurando así la continuidad del proyecto sin comprometer la eficiencia energética ni la autonomía del sistema.

Tabla 4.15 Evaluación de costos para 1 día de operación.

Componente	Descripción	Cantidad	Precio Neto	IVA	Precio Final	Link
Regulador de Carga Victron BlueSolar 75V 15A 12/24V MPPT	Regulador de carga MPPT	1	\$67.218.-	\$12.772.-	\$79.990.-	NEnergy
Batería Litio Ritar 12V 50Ah	Batería de litio	2	\$504.032.-	\$95.766.-	\$599.800.-	Atempower
Panel FV Monocristalino 150W Yi.Solar	Panel FV	1	\$82.353.-	\$15.647.-	\$98.000.-	Insol
Total	-	-	\$880.663.-	\$167.326.-	\$777.790.-	-

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.16 Evaluación de costos para 2 días de operación.

Componente	Descripción	Cantidad	Precio Neto	IVA	Precio Final	Link
Regulador de Carga Victron BlueSolar 75V 15A 12/24V MPPT	Regulador de carga MPPT	1	\$67.218.-	\$12.772.-	\$79.990.-	NEnergy
Batería Litio Ritar 25.6V 100Ah	Batería de litio	1	\$731.092.-	\$138.907.-	\$870.000.-	Solarstore
Panel FV Monocristalino 150W Yi.Solar	Panel FV	1	\$82.353.-	\$15.647.-	\$98.000.-	Insol
Total	-	-	\$880.663.-	\$167.326.-	\$1.047.990.-	-

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 4.15 se observa que, el costo estimado para los componentes cotizados para el sistema de respaldo de 1 día es de \$777.790, que incluye IVA.

En contraste, la tabla 4.16 presenta el desglose de costos de los componentes necesarios para operar un sistema fotovoltaico durante 2 días. Los precios netos, IVA y precios finales de cada componente se detallan, mostrando un costo total de \$880.663 netos y \$1.047.990 con IVA.

4.9. Sumario

En este capítulo, se llevó a cabo una evaluación detallada de la carga eléctrica del STP y de sus componentes clave, que incluyen una Raspberry Pi 4B+, un SSD de 4TB, un módem 4G y sensores. Se analizaron las especificaciones técnicas y el consumo energético de cada uno de estos componentes, considerando también las condiciones ambientales específicas del sitio de instalación en Cerro Ventarrones. Se realizaron mediciones del consumo en diferentes estados operativos del STP ensamblado en China, con el objetivo de determinar la configuración óptima del sistema fotovoltaico necesario para garantizar su funcionamiento continuo. Además, se evaluaron dos configuraciones de sistemas de respaldo, y se efectuó un análisis de costos de cada componente del sistema fotovoltaico.

El capítulo concluye con recomendaciones para mejorar el rendimiento y asegurar la operación ininterrumpida del STP, destacando la importancia de una evaluación precisa de la carga eléctrica y estrategias de respaldo energético en condiciones adversas.

La tabla 4.17 proporciona una visión detallada de los resultados obtenidos y su justificación, destacando los aspectos clave del diseño y dimensionamiento del sistema fotovoltaico para el STP.

Tabla 4.17 Resumen del diseño y dimensionamiento del sistema fotovoltaico aislado.

Aspecto	Valor	Justificación
Inclinación de la Instalación FV	24° norte, igual a la latitud del sitio.	Maximiza la captación de radiación solar durante todo el año en condiciones variables.
Potencia Fotovoltaica	1 panel solar de 150 Wp (Módulo SLD-TECH ST-150Q-24V)	Asegura un suministro adecuado de energía, ligeramente superior al cálculo para robustez del sistema.
Capacidad de Batería para Respaldo	2 baterías de 12 V / 50 Ah (1 día) 1 batería de 24 V / 100 Ah (2 días)	Suficiente para mantener la operación del STP durante los períodos de baja y nula radiación solar.
Dimensionamiento del Regulador de Carga	Corriente de carga de batería: 6.25 A; Regulador MPPT recomendado para manejar hasta 12.5 A a 24V	Capacidad adecuada para manejar la carga de batería y condiciones variables del sistema.
Regulador de Carga Recomendado	Victron Bluesolar 15A 12/24V MPPT 75V	Optimiza la eficiencia de captación de energía solar y es adecuado para condiciones variables.
Verificación de Suficiencia Energética	Energía generada supera consumo diario en todos los meses del año	Se garantiza la autonomía operativa del sistema durante todo el ciclo anual.

Fuente: Elaboración propia.

Capítulo 5. Conclusiones

5.1. Conclusiones

Se realizó una revisión del estado del arte de los perfiladores de turbulencia, identificando las principales tecnologías y métodos empleados en la actualidad. Este análisis permitió comprender el funcionamiento del STP, destacando sus ventajas comparativas frente a instrumentos convencionales.

Se llevó a cabo un análisis detallado del diseño del STP, presentándose como una solución innovadora y económica para medir la turbulencia atmosférica. Basado en el método de covarianza y utilizando luz lunar nocturna, el STP ofrece una alta precisión y robustez a un costo reducido en comparación con otros métodos más complejos y costosos. Su diseño para Cerro Ventarrones incluye una configuración optimizada de sensores y un sistema de comunicación automática, con un suministro de energía solar fotovoltaico dimensionado para asegurar un funcionamiento continuo durante tres años.

Se examinó la operación electrónica del STP, evaluando cada uno de sus componentes. Se realizaron pruebas y mediciones para determinar el consumo energético y la eficiencia operativa del sistema, asegurando su capacidad para funcionar de manera autónoma y continua.

El desarrollo del estudio de potencia permitió dimensionar adecuadamente el sistema fotovoltaico necesario para el funcionamiento del STP en un entorno aislado como el de Cerro Ventarrones en Chile. Este estudio incluyó cálculos del consumo diario de energía y la capacidad de respaldo requerida asegurando que el STP pueda tener una operación ininterrumpida.

En conjunto, estos resultados permiten afirmar que se ha evaluado la operación del STP para su utilización en Cerro Ventarrones. A pesar de no estar desarrollado completamente, el proyecto no solo ha demostrado la viabilidad técnica del STP, sino que también ha proporcionado las bases necesarias para su implementación efectiva en diversos entornos astronómicos.

5.2. Trabajo Futuro

- Estudio de cobertura de redes 3G/4G/5G en la zona, asegurando una transmisión de datos eficiente y confiable.
- Realización de una evaluación que considere variables adicionales como sombra, suciedad y temperatura.
- Se recomienda también evaluar un modelo estructural robusto para garantizar la viabilidad del sistema ante el clima adverso de Cerro Ventarrones.

Bibliografía

- [1] Hickson, P. & Lanzetta, K. Measuring Atmospheric Turbulence with a Lunar Scintillometer Array. *Publ Astron Soc Pac* 116, 1143-1152 (2004).
- [2] Hickson, P., Gagné, R., Pfrommer, T. & Steinbring, E. Astronomical seeing and ground-layer turbulence in the Canadian High Arctic. *Mon Not R Astron Soc* 433, 307-312 (2013).
- [3] Hickson, P. et al. Optical turbulence at Ali, China-results from the first year of lunar scintillometer observations. *Mon Not R Astron Soc* 494, 5992-6000 (2020).
- [4] Kornilov, V. et al. Combined MASS-DIMM instruments for atmospheric turbulence studies. *Mon Not R Astron Soc* 382, 1268-1278 (2007).
- [5] Shang, Z., Cariñe, J., García, P., Hu, Yi, Yao, Q., Feng, L., & Ma, B. (2021). A Self-contained Turbulence Profiler for Astronomical Site Testing and Monitoring. NAOC.
- [6] Sarazin, M. & Roddier F. The ESO differential image motion monitor. *Astron. Astrophys* 227, 294-300 (1990).
- [7] Shang, Z. Astronomy from Dome A in Antarctica. *Research in Astronomy and Astrophysics* 20, 168 (2020).
- [8] Skidmore, W. et al. Thirty Meter Telescope Site Testing V: Seeing and Isoplanatic Angle. *Publ Astron Soc Pac* 121, 1151-1166 (2009).
- [9] Surendran, A., Parihar, P. S., Banyal, R, K. & Kalyaan, A. Development of a Lunar Scintillometer as part of the national large optical telescope site survey. *Exp Astron* 45, 57-79 (2018).
- [10] Vernin, J. et al. European Extremely Large Telescope Site Characterization 1: Overview. *Publ Astron Soc Pac* 123, 1334-1346 (2011).
- [11] Yang, X. et al. Cloud cover and aurora contamination at dome A in 2017 from KLCAM. *Mon Not R Astron Soc* 501, 3614-3620 (2020)
- [12] Tokovinin, A., Kornilov, V., Shatsky, N. & Voziakova, O. Restoration of turbulence profile from scintillation indices. *Mon Not R Astron Soc* 343, 891-899 (2003).
- [13] Rajagopal, J., Tokovinin, A., Bustos, E., et al. (2008). LuSci: a lunar scintillometer to study ground layer turbulence. In *Optical and infrared interferometry* (Vol. 7013, pp. 545–553).

- [14] Davies, R. Kasper, M. 2012. Adaptive optics for astronomy[J]. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 50: 305–351.
- [15] Babcock, H, W. 1953. The possibility of compensating astronomical seeing[J]. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 65(386): 229–236.
- [16] Beckers, J, M. 2001. A seeing monitor for solar and other extended object observations[J]. *Experimental Astronomy*, 12: 1–20.
- [17] Hickson, P. 2014. Atmospheric and adaptive optics[J]. *The Astronomy and Astrophysics Review*, 22: 1–38.
- [18] Avila, R. Vernin, J. Sánchez, L, J. 2001. Atmospheric turbulence and wind profiles monitoring with generalized scidar[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 369(1): 364–372.
- [19] Tokovinin, A. Vernin, J. Ziad, A. et al. 2005. Optical turbulence profiles at Mauna Kea measured by MASS and SCIDAR[J]. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 117(830): 395.
- [20] Agabi, A. Aristidi, E. Azouit, M. et al. 2006. First whole atmosphere nighttime seeing measurements at Dome C, Antarctica[J]. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 118(840): 344.
- [21] Bonner, C, S. Ashley, M, C, B. Lawrence, J, S. et al. 2008. Snodar: a new instrument to measure the height of the boundary layer on the Antarctic plateau[C]//*Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy II*. SPIE, 7014: 2262–2268.
- [22] Wilson, R, W. 2002. SLODAR: measuring optical turbulence altitude with a Shack–Hartmann wavefront sensor[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 337(1): 103–108.
- [23] Wilson, R, W. Butterley, T. Sarazin, M. 2009. The Durham/ESO SLODAR optical turbulence profiler[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 399(4): 2129–2138.
- [24] Kolmogorov, A.N., The local structure of turbulence in incompressible viscous fluids at very large Reynolds numbers, *Dokl. Akad. Nauk. SSSR*, 30, 299-303, (1941).
- [25] Kolmogorov, A.N. Equations of turbulent motion in an incompressible fluid. *Izv. Akad. Nauk. SSSR ser. Fiz.* 6, 56-58. (1942).

Anexo A. Datasheets

A.1. Panel solar Yi.Solar 150 W



Specifications

Cell Type	Mono-Silicon solar Cells
Cell Size	156mm×78mm
No. of cells and connections	72(6×12)
Dimension of module(mm)	1482×673×30mm
Weight	11.5Kg

Electrical Characteristics

Model	YI6Q -150M
Maximum power at STC(Pm)	150W
Open-circuit voltage(Voc)	45.07V
Short-circuit current(Isc)	4.62A
Voltage at Pmax(Vmp)	36.06V
Current at Pmax(Impp)	4.16A
Application	24V system

(STC:Irradiance AM1.5, 1000W/m², 25°C)

Limits

Fuse rating	15A
Maximum system voltage	1000VDC
Operating temperature	-40~+85°C

Temperature and Coefficients

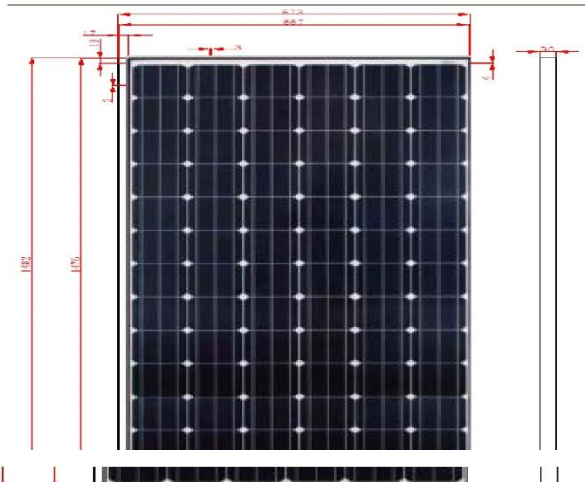
NOCT	45°C±2°C
Temp coefficient of Voc	-0.33%/°C
Temp coefficient of Isc	0.046%/°C
Temp coefficient of power	-0.45%/°C

NOCT:Nominal Operation Cell Temperature

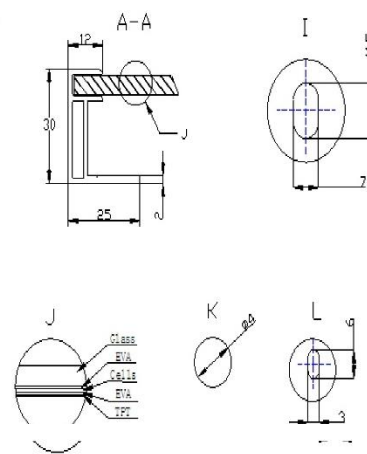
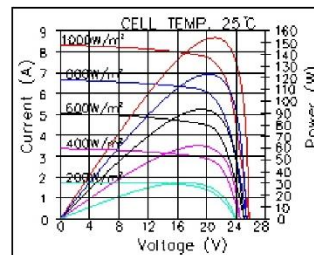
Output

Type of output terminal	Junction box
Cable	4mm ²
Cable lengths	800mm
Connector	Plug type

Mechanical Characteristics



Characteristics Curve



A.2. Regulador de carga MPPT Victron







Controladores de carga SmartSolar con salida de carga
MPPT 75/10, 75/15, 100/15, 100/20, 100/20-48V

www.victronenergy.com



Controlador de carga SmartSolar
MPPT 75/15



Detección de Bluetooth
Smart Battery Sense



Detección de Bluetooth
BMV-712 Smart Battery Monitor



Bluetooth Smart integrado

La solución inalámbrica para configurar, controlar, actualizar y sincronizar los controladores de carga SmartSolar.

VE.Direct

Para una conexión de datos con cable a un Color Control GX, otros productos GX, PC u otros dispositivos.

Seguimiento ultrarrápido del Punto de Máxima Potencia (MPPT)

Especialmente con cielos nublados, cuando la intensidad de la luz cambia continuamente, un controlador MPPT ultrarrápido mejorará la recogida de energía hasta en un 30%, en comparación con los controladores de carga PWM, y hasta en un 10% en comparación con controladores MPPT más lentos.

Salida de carga

Se puede evitar que la batería se descargue en exceso conectando todas las cargas a la salida de carga. Esta salida desconectará la carga cuando la batería se haya descargado hasta alcanzar una tensión preestablecida. (Modelo 48V: interfaz con un relé) También se puede establecer un algoritmo de gestión inteligente de la batería: ver BatteryLife. La salida de carga es a prueba de cortocircuitos.

BatteryLife: gestión inteligente de la batería

Si un controlador de carga solar no es capaz de recargar la batería a plena capacidad en un día, lo que sucede es que el ciclo de la batería cambia continuamente entre los estados "parcialmente cargada" y "final de descarga". Este modo de funcionamiento (sin recarga completa periódica) destruirá una batería de plomo-ácido en semanas o meses. El algoritmo BatteryLife controlará el estado de carga de la batería y, si fuese necesario, incrementará día a día el nivel de desconexión de la carga (esto es, desconectará la carga antes) hasta que la energía solar recogida sea suficiente como para recargar la batería hasta casi el 100%. A partir de ese punto, el nivel de desconexión de la carga se modulará de forma que se alcance una recarga de casi el 100% alrededor de una vez a la semana.

Algoritmo de carga de batería programable

Consulte la sección Asistencia y Descargas > Software en nuestra página web para más información.

Temporizador día/noche y opción de regulador de luminosidad

Consulte la sección Asistencia y Descargas > Software en nuestra página web para más información.

Sensor de temperatura interna

Compensa la tensión de carga de absorción y flotación en función de la temperatura.

Sensor opcional de la tensión y de la temperatura externas de la batería vía Bluetooth

Se puede usar un sensor Smart Battery Sense o un monitor de baterías BMV-712 Smart para comunicar la tensión y la temperatura de la batería a uno o más controladores de carga SmartSolar.

Controlador de carga SmartSolar	MPPT 75/10	MPPT 75/15	MPPT 100/15	MPPT 100/20	MPPT 100/20 48V
Tensión de la batería	Selección automática 12/24V				48V
Corriente de carga nominal	10A	15A	15A	20A	20A
Potencia FV nominal, 12V 1a,b)	145W	220W	220W	290W	290W
Potencia FV nominal, 24V 1a,b)	290W	440W	440W	580W	580W
Potencia FV nominal, 48V 1a,b)	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	1160W
Máxima corriente de corto circuito FV 2)	13A	15A	15A	20A	20A
Desconexión automática de la carga	Sí				
Tensión máxima del circuito abierto FV	75V		100V		
Eficiencia máxima	98%				
Autoconsumo	12V: 25 mA 24V: 15 mA				25 / 15 / 10 mA
Tensión de carga de "absorción"	14,4V / 28,8V (ajustable)				14,4V / 28,8V / 57,6V (adj.)
Tensión de carga de "flotación"	13,8V / 27,6V (ajustable)				13,8V / 27,6V / 55,2V (adj.)
Algoritmo de carga	adaptativo multifase				
Compensación de temperatura	-16 mV / °C, -32 mV / °C resp.				
Corriente de carga continua	15A		20A		1A
Desconexión de carga por baja tensión	11,1V/22,2V/44,4V u 11,8V/23,6V/47,2V o algoritmo BatteryLife				
Reconexión de carga por baja tensión	13,1V/26,2V/52,4V o 14V/28V/56V o algoritmo BatteryLife				
Protección	Polaridad inversa de la batería (fusible) /Cortocircuito de salida/Sobretensión				
Temperatura de trabajo	De -30 a +60 °C (potencia nominal completa hasta los 40°C)				
Humedad	95%, sin condensación				
Puerto de comunicación de datos	VE.Direct (consulte el libro blanco sobre comunicación de datos en nuestro sitio web)				
CARCASA					
Color	Azul (RAL 5012)				
Terminales de conexión	6 mm ² / AWG10				
Grado de protección	IP43 (componentes electrónicos), IP22 (área de conexión)				
Peso	0,5 kg		0,6 kg		0,65 kg
Dimensiones (al x an x p)	100 x 113 x 40 mm		100 x 113 x 50 mm		100 x 113 x 60 mm
NORMATIVAS					
Seguridad	EN/IEC 62109-1, UL 1741, CSA C22.2				
1a) Si se conecta más potencia FV, el controlador limitará la entrada de potencia.					
2b) La tensión FV debe exceder Vbat +5V para que arranque el controlador.					
Una vez arrancado, la tensión FV mínima será de Vbat + 1V.					
2) Un generador fotovoltaico con una corriente de cortocircuito más alta puede dañar el controlador.					

A.3. Batería ATEMPOWER 50Ah / 12V



Longer Lifespan

This LiFePO4 battery can deliver up to 2,000 rounds at 100% DoD — several times the life of a lead-acid counterparts.

ATEM POWER
2000 Cycles



AGM BATTERY
400-500 Cycles



A.4. Batería RITAR 100Ah / 24V

Li-ion Battery



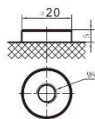
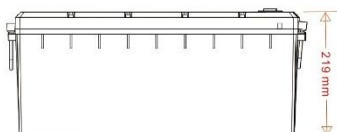
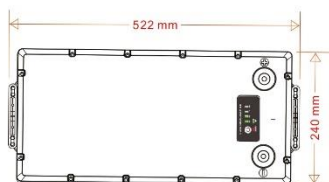
25.6V100Ah



NEW GENERATION RV BATTERY



Dimension:



Unit: mm

SAFETY

- + Long life type prismatic LiFePO4 cells.
- + Cell certification: UN38.3, ROHS, IEC62619, UL1973 and UL9540A
- + Battery certification: UN38.3, MSDS, CE
- + The cycle life over 3500 times

DESIGN

- + Detachable ABS case, better than traditional case.
- + ON/OFF Button, LED indicators for SOC, RUN and ALM.
- + IP 65 Class (G1, G2). IP30 Class (G3)
- + Maintenance free.

BATTERY MANAGEMENT SYSTEM

- + Integrated Software BMS inside.
- + Independent protection for charge and discharge.
- + OVP, LVP, OTP, LTP, Short circuit protection.
- + Optional Parts:
G1: Bluetooth Module (Built-in),
G2: Bluetooth Module (Built-in), Heater,
G3: Bluetooth Module (Built-in), Heater, Bluetooth Module (External), LCD Module (External),

25.6V100Ah

SPECIFICATION

Model	LFP25.6V100AH G1	LFP25.6V100AH G2	LFP25.6V100AH G3
Cell and Connection	3.2V104Ah, 1P8S	3.2V104Ah, 1P8S	3.2V104Ah, 1P8S
Nominal Voltage [V]	25.6	25.6	25.6
Nominal Capacity [Ah]	100	100	100
Total Energy [Wh]	2560	2560	2560
Max. Charging Current [A]	100	100	100
Recommended Charging Current [A]	50	50	50
Charging Voltage [V]	28.4~29.2	28.4~29.2	28.4~29.2
Max. Discharging Current [A]	100	100	100
End of Discharge Voltage [V]	22.4	22.4	22.4
Operating Temperature Range	Charge: 0 ~ +50°C Discharge: -20 ~ +55°C	Charge: 0 ~ +50°C Discharge: -20 ~ +55°C With Heater: Charge/Discharge -20~+55°C	Charge: 0 ~ +50°C Discharge: -20 ~ +55°C With Heater: Charge/Discharge -20~+55°C
Protection	Over charge Over discharge, Over temperature, Low Temperature, Over Current, Short circuit	Over charge Over discharge, Over temperature, Low Temperature, Over Current, Short circuit	Over charge Over discharge, Over temperature, Low Temperature, Over Current, Short circuit
Cycle Life ¹	>3500 cycles	>3500 cycles	>3500 cycles
Designed Calendar Life	10 Years	10 Years	10 Years
Communication Port	/	/	RS485; CAN
LED Indicator and Button	/	SOC, ALM, RUN, ON/OFF	SOC, ALM, RUN, ON/OFF
Dimension (W*D*H, mm)	522*240*219	522*240*219	522*240*219
Weight [Kg]	20.5	20.5	20.5
Operation Humidity	0~95% RH (No condensing)	0~95% RH (No condensing)	0~95% RH (No condensing)
IP Class	IP65	IP65	IP30
Parallel Support ²	Yes, Max. 4Sets	Yes, Max. 4Sets	Yes, Max. 4Sets
Series Support	Yes, Max. 2 Sets	Yes, Max. 2 Sets	Yes, Max. 2 Sets
Certification-Cell	UN38.3; ROHS; IEC62619; UL1973; UL9540A		
Certification-Battery	UN38.3; MSDS; CE		
Optional Parts	Internal Bluetooth Module	Internal Bluetooth Module Heater	Internal Bluetooth Module Heater External Bluetooth Module External Display Module RS485-USB Device

Li-ion Battery



BMS Detail Information	
Over-Charge Alarm & Protection	
Over-Charge Alarm	3.55V (For cell) 28.0V (For pack)
Over-Charge Protection	3.7V (For cell) 29.6V (For pack)
Over-Charge Protection Delay	1000 ms
Over-Charge Release	3.45V (For cell) 27.6V (For pack)
Over-Discharge Alarm & Protection	
Over-Discharge Alarm	2.8V (For cell) 22.4V (For pack)
Over-Discharge Protection	2.5V (For cell) 20V (For pack)
Over-Discharge Protection Delay	1000 ms
Over-Discharge Release	2.8V (For cell) 22.4V (For pack)
Over Current Alarm & Protection	
Charge Over Current Alarm	60A
Charge Over Current Protection	110A
Charge Over-Current Protection Delay	15S
Charge Over Current Protection Release	Automatic release after 1min and up to 3 times or Discharge
Discharge Over Current Alarm	110A
Discharge Over Current Protection-1	115A
Discharge Over Current Protection-1 Delay	15S
Discharge Over Current Protection-2	120A
Discharge Over Current Protection-2 Delay	200ms
Discharge Over Current Protection Release	Automatic release after 1min and up to 3 times or Charge
Over Temperature Alarm & Protection	
Charge Low Temperature Alarm	7°C
Charge Low Temperature Protection	0°C
Charge Low Temperature Protection Release	5°C
Charge High Temperature Alarm	50°C
Charge High Temperature Protection	55°C
Charge High Temperature Protection Release	45°C
Discharge Low Temperature Alarm	-10°C
Discharge Low Temperature Protection	-20°C
Discharge Low Temperature Protection Release	-17°C
Discharge High Temperature Alarm	55°C
Discharge High Temperature Protection	60°C
Discharge High Temperature Protection Release	50°C
Short Circuit Protection	
Short Current Protection Delay Time	1500 uS
Short Current Release Method	Release load
Heater Control (for optional heater parts)	
Heater ON	Cell temperatures 0°C and charger is connected
Heater OFF	Cell temperature >10°C

Anexo B. Scripts

B.1. Estimación de datos obtenidos en laboratorios

```

clc;

clear all;

%Parametros obtenidos en laboratorio
sensores      = [0, 1, 2];
voltaje       = 6; % constante
vecvol        = ones(1, 25) * 6;
corriente     = [0.0230, 0.042, 0.064];
potencia      = [0.137977, 0.251958, 0.383936];

% Sensores a interpolar
nuevos_sensores = 3:8;

% Extrapolación para sensores 3 a 8
nueva_corriente = interp1(sensores, corriente, nuevos_sensores, 'linear', 'extrap');
nueva_potencia  = interp1(sensores, potencia, nuevos_sensores, 'linear', 'extrap');

% Calcular la potencia con 8 sensores
P8 = nueva_potencia(end); % Potencia con 8 sensores

% Duplicar la potencia para 16 sensores
P16 = 2 * P8;
I16 = P16 / voltaje; % Corriente para 16 sensores

% Triplicar la potencia para 24 sensores
P24 = 3 * P8;
I24 = P24 / voltaje; % Corriente para 24 sensores

% Ajustar la interpolación para incluir los nuevos puntos
todos_sensores = [sensores, nuevos_sensores, 16, 24];
toda_corriente = [corriente, nueva_corriente, I16, I24];
toda_potencia  = [potencia, nueva_potencia, P16, P24];

% Interpolación final para todos los sensores de 0 a 24
sensores_totales = 0:24;
corriente_final = interp1(todos_sensores, toda_corriente, sensores_totales, 'linear', 'extrap');
potencia_final = interp1(todos_sensores, toda_potencia, sensores_totales, 'linear', 'extrap');

fprintf('sensores en operación [uds] Voltaje [V] Corriente [A] Potencia [W]\n');
for i = 1:length(sensores_totales)
    fprintf('%d           %.3f           %.4f           %.4f\n',
sensores_totales(i), voltaje, corriente_final(i), potencia_final(i));
end

resultados = table(sensores_totales', repmat(voltaje, length(sensores_totales), 1),
corriente_final', potencia_final', ...
'VariableNames', {'sensores_en_operacion', 'Voltaje_V', 'Corriente_A',
'Potencia_W'});

disp(resultados);

figure(2)

```



```

subplot(3,1,1);
plot(sensores_totales, vecvol, 'r-o', 'LineWidth', 2, 'MarkerSize', 6);
ylabel('Voltaje [V]', 'FontSize', 13, 'FontWeight', 'bold');
title('Voltaje vs Sensores en operación', 'FontSize', 13, 'FontWeight', 'bold');
grid on;
xlim([0 24]);
xticks(0:1:24);

subplot(3,1,2);
plot(sensores_totales, corriente_final*1000, 'b-o', 'LineWidth', 2, 'MarkerSize', 6);
ylabel('Corriente [mA]', 'FontSize', 13, 'FontWeight', 'bold');
title('Corriente vs Sensores en operación', 'FontSize', 13, 'FontWeight', 'bold');
grid on;
xlim([0 24]);
xticks(0:1:24);

subplot(3,1,3);
plot(sensores_totales, potencia_final, 'g-o', 'LineWidth', 2, 'MarkerSize', 6);
xlabel('Sensores en operación [uds]', 'FontSize', 13, 'FontWeight', 'bold');
ylabel('Potencia [W]', 'FontSize', 13, 'FontWeight', 'bold');
title('Potencia vs Sensores en operación', 'FontSize', 13, 'FontWeight', 'bold');
grid on;
xlim([0 24]);
xticks(0:1:24);

```

B.2. Gráfico de radiación global mensual promedio

```

clc;

clear all;

% Datos de la tabla (a) Radiación incidente en el plano horizontal
meses = {'Ene', 'Feb', 'Mar', 'Abr', 'May', 'Jun', 'Jul', 'Ago', 'Sep', 'Oct', 'Nov', 'Dic'};
global_horizontal = [9.63, 8.86, 7.95, 6.52, 5.27, 4.64, 4.88, 6.01, 7.48, 8.77, 9.63, 9.87];

% Datos de la tabla (b) Radiación incidente en un plano con inclinación igual a la latitud del sitio
global_inclinado = [8.53, 8.57, 8.6, 7.95, 7.1, 6.59, 6.73, 7.87, 8.49, 8.68, 8.75, 8.55];

x = 1:length(meses); % Etiquetas de los meses
width = 0.35; % Ancho de las barras
spacing = 0.1; % Espaciado adicional entre los grupos de barras

figure;
hold on;

b1 = bar(x - width/2 - spacing/2, global_horizontal, width, 'DisplayName', 'Global Horizontal');
b2 = bar(x + width/2 + spacing/2, global_inclinado, width, 'DisplayName', 'Global Inclinado');

xlabel('Meses');
ylabel('Radiación [kWh/m²/día]', 'FontWeight', 'bold');

```

```

title('Comparación de la Radiación Solar Global Mensual Promedio', 'FontWeight',
'bold');
set(gca, 'XTick', x, 'XTickLabel', meses, 'FontWeight', 'bold');
legend('Global horizontal', 'Global inclinado', 'FontSize', 14, 'TextColor', 'k',
'Location', 'northwest');
b1(1).FaceColor = 'red';
b2(1).FaceColor = 'yellow';

xtips1      = b1.XEndPoints;
ytips1      = b1.YEndPoints;
labels1     = string(b1.YData);
text(xtips1, ytips1, labels1, 'HorizontalAlignment', 'center', 'VerticalAlignment',
'bottom', 'FontWeight', 'bold');

xtips2      = b2.XEndPoints;
ytips2      = b2.YEndPoints;
labels2     = string(b2.YData);
text(xtips2, ytips2, labels2, 'HorizontalAlignment', 'center', 'VerticalAlignment',
'bottom', 'FontWeight', 'bold');
ylim([0 11]);
hold off;

```

B.3. Ciclo anual y diario de la magnitud del viento

```

clc;

clear all;

% Datos de velocidad del viento por mes
meses = {'Ene', 'Feb', 'Mar', 'Abr', 'May', 'Jun', 'Jul', 'Ago', 'Sep', 'Oct', 'Nov',
'Dic'};
viento_mensual = [4.77, 4.84, 4.11, 3.8, 4.52, 4.42, 4.72, 4.42, 4.61, 4.79, 5.2,
4.71];

% Datos de velocidad del viento por hora
horas = 0:23;
viento_horario = [4.03, 4.07, 4.25, 4.43, 4.52, 4.55, 4.54, 4.49, 4.56, 4.72, 5.07,
5.21, ...
5.12, 5.15, 5.43, 5.82, 5.82, 5.09, 3.8, 2.96, 3.46, 4.18, 4.34,
4.16];

figure;
subplot(2,1,1);
plot(1:12, viento_mensual, '-o', 'LineWidth', 2, 'MarkerSize', 6);
xticks(1:12);
xticklabels(meses);
xlabel('Mes', 'FontSize', 13, 'FontWeight', 'bold');
ylabel('m/s', 'FontSize', 13, 'FontWeight', 'bold');
xlim([1 12])
legend('a', 'FontSize', 13, 'LineWidth',
0.1, 'FontWeight', 'bold', 'location', 'northwest'), legend('boxoff')
grid on;

subplot(2,1,2);
plot(horas, viento_horario, '-o', 'LineWidth', 2, 'MarkerSize', 6);
xticks(0:1:23);
xlabel('Hora', 'FontSize', 13, 'FontWeight', 'bold');

```

```
ylabel('m/s','FontSize',13,'FontWeight','bold');
xlim([0 23])
legend('b','FontSize',13,'FontWeight','bold','location','northwest'),legend('boxoff')
```

B.4. Radiación global diaria

```
clc;

clear all;

hora = 0:23;
global_a = [0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 1.2, 76.5, 286.4, 540.06, 747.67, 898.8,
985.1, 1000.1, 939.92, 807.73, 618.39, 387.29, 148.33, 17.81, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0];
global_b = [0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 1.16, 43.82, 280.99, 586.13, 816.83, 983.06,
1078.77, 1095.89, 1029.57, 883.04, 673.17, 415.25, 128.28, 4.22, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0];

tabla_a = table(hora', global_a', 'VariableNames', {'Hora', 'Global'});
disp('Tabla A:');
disp(tabla_a);

tabla_b = table(hora', global_b', 'VariableNames', {'Hora', 'Global'});
disp('Tabla B:');
disp(tabla_b);

figure;
bar(hora, [global_a; global_b]', 'grouped');
xlabel('Hora');
ylabel('Radiación (W/m^2)');
legend({'Global horizontal', 'Global inclinado'});
title('Comparación de Radiación Global');
grid on;

xticks(hora);
xticklabels(string(hora));
```