

Análisis técnico económico de un sistema de extracción de agua ambiental alimentado por energía fotovoltaica con prueba piloto en Taltal

Camila Paz Moro Quezada

2025

Requisito parcial para obtener el título de:
Ingeniera Electricista

Profesor Guía:

Dra. Margarita Norambuena (UTFSM)

Profesor Correferente:

Dr. Pablo Lezana (UTFSM)

Comisión:

Dra. Margarita Norambuena (UTFSM)

Dr. Pablo Lezana (UTFSM)

Valparaíso, octubre, 2025.



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

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

Título del trabajo: Análisis técnico económico de un sistema de extracción de agua ambiental
alimentado por energía fotovoltaica con prueba piloto en Taltal

Nombre del candidato(a): Camila Paz Moro Quezada

Carrera / Grado: Ingeniería Eléctrica

Campus: Casa Central Departamento: Ingeniería Eléctrica

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Margarita Norambuena Valdivia, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a)
del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

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

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL (marcar una opción)

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

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

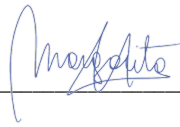
☐ 6 meses ☐ 12 meses ☐ 2 años ☐ 3 años ☐ 5 años ☐ 10 años

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

4.- FIRMAS

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

Fecha: 27-10-2025

Firma: 

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 27-10-2025

Firma: 

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



Análisis técnico económico de un sistema de extracción de agua ambiental alimentado por energía fotovoltaica con prueba piloto en Taltal

Camila Paz Moro Quezada

2025

“Ya veremos dijo el ciego”
— *Dicho Popular*

Agradecimientos

A mi familia, madre y a mi tía, por estar siempre. A mi tío por recibirme en su hogar para las prácticas y para el proceso de esta memoria. A todas las niñas elis, que siempre alumbraron el camino, sobre todo en los momentos difíciles e hicieron más llevadera mi permanencia en la universidad. A Anais y Christophher, que me acompañaron en el descenso a la locura. A Martín, por cuidarme y quererme. A mis compañeros del LIACE, Cristóbal, Maximiliano y Francisca. A mis queridos amigos Harold, Miguel, Andrés y Pablo por siempre estar para mí a pesar de los años. A mis profesores guías y los primeros que creyeron en este proyecto, Margarita y Pablo. A ANID, al proyecto AFB240002, al Advanced Center for Electrical and Electronics Engineering (AC3E) y al proyecto FONDECYT regular 1230250.

Índice de Contenidos

Índice de Contenidos	I
Índice de Figuras	IV
Índice de Tablas	VII
Resumen	1
1. Introducción	2
1.1. Contexto y justificación	2
1.1.1. Descripción del proyecto	3
1.1.2. Objetivo general	4
1.1.3. Objetivos específicos	4
1.1.4. Estructura del documento	4
2. Marco Teórico	5
2.1. Situación hídrica y climática en Taltal	5
2.2. Presentación del problema	10
2.3. Extracción de agua ambiental	11
2.3.1. Deshumidificador	11
2.3.1.a. Adsorción	11
2.3.1.b. Condensación	12
2.3.2. Monitoreo de potencia y condiciones ambientales	14
2.4. Sistemas fotovoltaicos off grid	16
2.4.1. Estudio de disponibilidad del recurso solar	18
2.5. Sistema de riego	19
2.5.1. Tipos de sistema de regadío	19
2.5.1.a. Riego Superficial	19
2.5.1.b. Riego por Aspersión	20
2.5.1.c. Riego Localizado o Microriego	20
2.5.2. Sistema y necesidades de riego parcela demostrativa	21
2.5.2.a. Automatización del riego	23
2.6. Conversión de potencia	25
2.6.1. Convertidor Boost	25
2.6.1.a. Estado 1: t_{on}	27
2.6.2. Estado 2: t_{off}	28
2.6.2.a. Puente H	29
2.6.2.b. Filtro LC	30

3. Metodología	32
3.1. Evaluación preliminar Deshumidificador TTK127E	32
3.1.1. Mediciones universidad	33
3.1.2. Mediciones Taltal	36
3.2. Propuesta de solución	40
3.3. Descripción e implementación del sistema propuesto	41
3.4. Metodología mediciones piloto	42
3.5. Sistema de riego automatizado	43
3.5.1. Alimentación energética del sistema de riego	43
3.5.2. Centro del control	44
3.5.3. Medición humedad de suelo	45
3.5.4. Sensor de luminancia	46
3.5.5. Electrovalvula solenoide	46
3.5.6. Monitoreo online de datos	47
3.5.7. Puesta en marcha del sistema	49
4. Mediciones y Resultados	54
4.1. Mediciones y resultados	54
4.1.1. Mediciones diurnas	54
4.1.2. Mediciones nocturnas	55
4.1.3. Mediciones de operación continua en exterior con una red estable	56
4.2. Mejoras técnicas del deshumidificador	58
4.2.1. Mejoras en el control	60
4.2.2. Análisis del sistema de control original	60
4.2.3. Estrategias de modificación del control y pruebas en laboratorio	61
4.2.3.a. Prueba sin referencia de temperatura y humedad	61
4.2.3.b. Prueba con referencia forzada de temperatura y humedad	61
4.2.3.c. Prueba con precalentador de aire	63
4.2.4. Validación en terreno	65
4.2.4.a. Prueba sin referencia de temperatura y humedad	65
4.2.4.b. Prueba con referencia forzada de temperatura y humedad	66
4.2.4.c. Prueba con precalentador de aire	67
5. Análisis Técnico-Económico	71
5.1. Metodología para el estudio técnico-económico	71
5.2. Análisis Técnico-Económico	72
5.2.1. Supuestos	72
5.2.2. Producción y rendimiento energético	75
5.2.3. Costos de operación y mantenimiento	75
5.2.4. Costo equivalente del agua	76
5.2.5. Proyección del precio del agua y efecto sobre el payback	76
5.2.5.a. Resultados del payback	77
5.2.5.b. Flujo de caja a 20 años	78
6. Conclusiones	79

Apéndices	81
A. Códigos de las Figuras y Tablas	81
B. Anexos	87
B.1. Mediciones diurnas	87
B.2. Mediciones nocturnas	92
B.2.1. Mediciones con red estable	94

Índice de Figuras

1.1.	Humedad Relativa del Aire registrada entre octubre de 2017 a septiembre de 2018, obtenido en la estación agrometeorológica "La Cachina" de Taltal.	3
2.1.	HR % estación meteorológica "La Cachina" https://agrometeorologia.cl	6
2.2.	Temperatura estación meteorológica "La Cachina" https://agrometeorologia.cl	7
2.3.	Precipitación acumulada estación meteorológica "La Cachina" https://agrometeorologia.cl	8
2.4.	Radiación solar estación meteorológica "La Cachina" https://agrometeorologia.cl	9
2.5.	Funcionamiento sistema de deshumidificación por adsorción Fuente: Guía de conocimiento práctico deshumidificación Trotec	12
2.6.	Componentes de un sistema de deshumidificación Fuente: Hogarsnse.es	13
2.7.	Descripción general del deshumidificador y su tabla de especificaciones.	14
2.8.	Analizador de Redes C.A. 8333	15
2.9.	Arduino UNO	16
2.10.	Sensor DHT11	16
2.11.	Sistema fotovoltaico on grid (elaboración propia con elementos de Canva 2025)	16
2.12.	Sistema fotovoltaico off grid (elaboración propia con elementos de Canva 2025)	17
2.13.	Visión satelital parcela demostrativa (Google Maps visión satelital 2025)	18
2.14.	Malla de riego	22
2.15.	Esquema base de automatización del riego	24
2.16.	Topología del Sistema (elaboración propia)	25
2.17.	Convertidor Boost (elaboración propia)	26
2.18.	Circuito del puente H (elaboración propia)	29
2.19.	Filtro LC (elaboración propia)	30
3.1.	Medición 05-11-2024	33
3.2.	Medición 06-11-24	34
3.3.	Medición 07-11-24	35
3.4.	Medición 19-12-24 Mañana	36
3.5.	Medición 19-12-24 Tarde	37
3.6.	Medición 20-12-24 Mañana	38
3.7.	Medición 21-12-24 Mañana	39
3.8.	Medición 21-12-24 Tarde	40
3.9.	Layout del sistema experimental	41
3.10.	Kit fotovoltaico 10W con controlador de carga y batería	43
3.11.	ESP32-WROOM-32	44

3.12. Sensor capacitivo	45
3.13. Sensor resistivo	45
3.14. GY-302 Sensor BH1750	46
3.15. Electrovalvula solenoide	47
3.16. Layout sistema de riego automatizado	48
3.17. Esquema de conexión del sistema fotovoltaico off-grid	49
3.18. Paneles montados sobre el techo de la cabaña	50
3.19. Inversor y banco de baterías instalados	50
3.20. Controlador de carga	51
3.21. Panel fotovoltaico 10 W	51
3.22. Conexionado sistema de control y sensor de iluminancia	51
3.23. Electrovalvula y sensor de humedad capacitivo	51
3.24. Vista completa protoboard	51
3.25. Sensor BH1750 con sol directo	52
3.26. Medición Blynk sensores con sol directo	52
3.27. Sensor BH1750 con sombra forzada	53
3.28. Medición Blynk sensores con sombra forzada	53
4.1. Vista frontal	58
4.2. Vista posterior	58
4.3. Vista lateral derecho deshumidificador	59
4.4. Vista lateral izquierda deshumidificador	59
4.5. Sensor de temperatura y humedad	59
4.6. Frente de sensor	60
4.7. Posterior de sensor	60
4.8. Medición sin referencia: Temperatura, humedad y potencia vs tiempo	61
4.9. Desarrollo experimental para forzar referencia de temperatura y humedad en el sensor	62
4.10. Medición referencia forzada: Temperatura, humedad y potencia vs tiempo	62
4.11. Primera disposición experiemntal con precalentador de aire	63
4.12. Segunda disposición experiemntal con precalentador de aire	63
4.13. Medición 1 con precalentador de aire: Temperatura, humedad y potencia vs tiempo	64
4.14. Medición 2 con precalentador de aire: Temperatura, humedad y potencia vs tiempo	64
4.15. Medición sin referencia en terreno: Temperatura, humedad y potencia vs tiempo	65
4.16. Configuración experimental en terreno de referencia forzada	66
4.17. Medición referencia forzada en terreno: Temperatura, humedad y potencia vs tiempo	67
4.18. Configuración experimental en terreno de medición con precalentador de aire	68
4.19. Medición con precalentador de aire en terreno: Temperatura, humedad y potencia vs tiempo	69
B.1. Medición diurna: 02-06-25	87
B.2. Medición diurna: 03-06-25	88
B.3. Medición diurna: 04-06-25	88

B.4.	Medición diurna: 05-06-25	89
B.5.	Medición diurna: 07-06-25	89
B.6.	Medición diurna: 10-06-25	90
B.7.	Medición diurna: 16-06-25	90
B.8.	Medición diurna: 17-06-25	91
B.9.	Medición diurna: 18-06-25	91
B.10.	Medición nocturna: 11-06-25	92
B.11.	Medición nocturna: 12-06-25	92
B.12.	Medición nocturna: 17-07-25	93
B.13.	Medición nocturna: 19-07-25	93
B.14.	Medición preliminar diurna: 12-08-25	94
B.15.	Medición preliminar diurna: 13-08-25	94
B.16.	Medición preliminar nocturna: 13-08-25	95
B.17.	Medición preliminar nocturna: 14-08-25	95

Índice de Tablas

2.1.	Radiación anual parcela demostrativa Fuente: https://solar.minenergia.cl/exploracion	18
2.2.	Tabla de verdad del puente H	29
3.1.	Medición 1	33
3.2.	Medición 2	34
3.3.	Medición 3	35
3.4.	Medición 19-12-24 Mañana	36
3.5.	Medición 19-12-24 Tarde	37
3.6.	Medición 20-12-24 Mañana	38
3.7.	Medición 21-12-24 Mañana	39
3.8.	Medición 21-12-24 Tarde	40
3.9.	Comparación entre SHT31 y DHT11	42
3.10.	Comparación entre Arduino Uno y ESP32-WROOM-32	44
3.11.	Especificaciones del kit fotovoltaico	49
4.1.	Resumen de mediciones diurnas con duración en minutos y tasa de recolección de agua	55
4.2.	Resumen de mediciones nocturnas con duración en minutos y tasa de recolección de agua	55
4.3.	Resumen de mediciones preliminares con duración en minutos y tasa de recolección de agua	56
4.4.	Extracción de agua mediciones diurnas	56
4.5.	Extracción de agua mediciones nocturnas	57
4.6.	Extracción de agua mediciones preliminares diurnas	57
4.7.	Extracción de agua mediciones preliminares nocturnas	57
4.8.	Resumen de mediciones y rendimiento del deshumidificador	69
5.1.	Detalle de costos de inversión del sistema propuesto (valores en CLP)	72
5.2.	Simbología General	75
5.3.	Flujo de caja proyectado a 20 años para 5 deshumidificadores en paralelo (valores en CLP) considerando nuevo OPEX.	78

Resumen

La crisis hídrica es un problema creciente en diversas regiones del mundo, y la comuna de Taltal no es la excepción. Con precipitaciones prácticamente nulas y una disponibilidad limitada de fuentes de agua para riego y consumo, es una tarea fundamental buscar alternativas sostenibles para la obtención de agua. En este contexto, la presente memoria propone un análisis técnico-económico de un sistema de extracción de agua ambiental alimentado por energía fotovoltaica.

El objetivo principal es evaluar la factibilidad técnica y económica de implementar un sistema de deshumidificación fotovoltaica en Taltal, aprovechando el microclima único que tiene el sector para generar agua apta para regadío. Para ello, se analizarán datos climáticos de la zona, incluyendo temperatura, humedad relativa y radiación solar, se estudiará la capacidad del deshumidificador TTK27 para extraer agua bajo distintas condiciones climática monitoreando de forma continua su consumo de potencia y se dimensionará un el sistema fotovoltaico que sea capaz de garantizar la autonomía energética del sistema de forma amigable con el medioambiente.

Metodológicamente, el estudio abarcará una evaluación integral del sistema, donde se verificará la capacidad del deshumidificador para extraer agua de forma continua y se realizará un análisis de costos y beneficios para determinar su viabilidad económica. Adicionalmente, se llevará a cabo una prueba piloto del sistema integrado en una comunidad rural de agricultores en Taltal para evaluar el desempeño del sistema en condiciones reales.

Los resultados esperados incluyen la cuantificación de la producción de agua, la eficiencia del sistema y una comparación entre costos y beneficios asociados a su implementación. De confirmarse su viabilidad, este proyecto podría ofrecer una solución innovadora y sostenible para mitigar la escasez de agua que enfrentan los pequeños agricultores en la región, sentando las bases para futuras aplicaciones en zonas con características climáticas similares.

Se espera que este estudio contribuya al desarrollo de tecnologías limpias y eficientes en el ámbito de la energía renovable y que sea un paso para la agricultura sostenible en pequeñas comunidades agrícolas afectadas por la sequía y la escasez hídrica.

Capítulo 1

Introducción

1.1. Contexto y justificación

La crisis hídrica es un problema creciente a nivel mundial y debido a la variabilidad geográfica y climática de Chile plantea una serie de desafíos para la gestión de los recursos hídricos [1]. La escasez de precipitaciones de la zona norte del país y el clima desértico es un problema al que se enfrentan pequeños agricultores.

Esta memoria se centrará en el caso de la Asociación Gremial de Pequeños Quinteros Agropecuarios de la comuna de Taltal, Los Loros, la cual actualmente no cuenta con acceso directo de agua potable, tampoco de regadío de la red pública ni con un acceso a una fuente natural de agua. El agua para uso diario, tanto domiciliario como de regadío se obtiene a través de la compra a un tercero (particular) lo que involucra costos significativos para cada miembro de la comunidad. Sin embargo, al ser una ciudad costera ubicada en pleno desierto de Atacama las características microclimáticas de la localidad de Taltal, son muy particulares. Al encontrarse al límite de dos denominaciones agroclimáticas, ellas están siendo evaluadas desde el mes de octubre de 2017 mediante un registro continuo por medio de una moderna Estación Meteorológica Automática (EMA) denominada estación “La Cachina” siendo parte de la Red Agrometeorológica Nacional (RAN) [2] Las cuales entre el año 2017 y 2018, según datos obtenidos de la estación agrometeorológica, se aprecia que a pesar de encontrarse en un clima desértico, la humedad relativa se encuentra sobre el 50 %, tal como se ve en la figura 1, con una media entorno al 80 % .

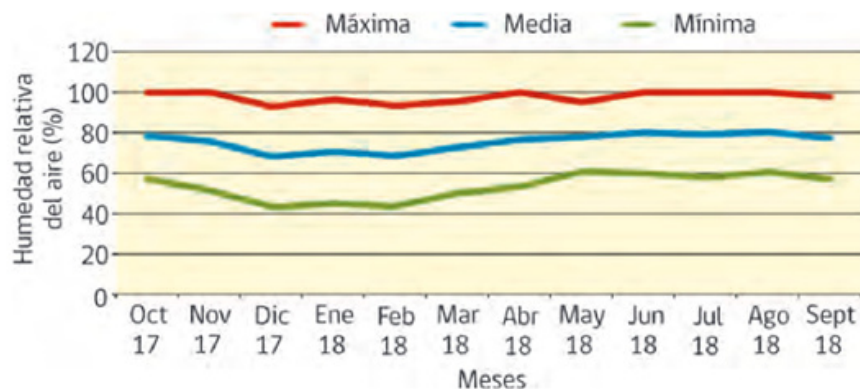


Figura 1.1: Humedad Relativa del Aire registrada entre octubre de 2017 a septiembre de 2018, obtenido en la estación agrometeorológica “La Cachina” de Taltal.

1.1.1. Descripción del proyecto

Considerando el microclima particular que posee la localidad de Taltal, se busca aprovechar la humedad del ambiente, sin la necesidad de dañar el ecosistema, se propone un proyecto de un sistema de extracción de agua ambiental con energía renovable. Se propone utilizar un deshumidificador ambiental con la finalidad de extraer agua del ambiente, el cual será alimentado por energía fotovoltaica.

Actualmente, los habitantes de la comunidad de Los Loros, al encontrarse alejados de la ciudad de Taltal, no cuentan con acceso a la red eléctrica, por lo que la electricidad que consume la mayoría de los habitantes del sector es mediante el uso de generadores diesel. Buscando un enfoque sustentable en lineamiento con el Objetivo de Desarrollo Sostenible 6 (ODS 6) de las Naciones Unidas, que busca garantizar la disponibilidad y la gestión sostenible del agua y el saneamiento para todos [3], se propone la utilización de energía solar como alternativa sustentable.

El proyecto contempla la evaluación técnica y económica de un sistema de energía fotovoltaica off-grid [4] con un mínimo de almacenamiento de baterías de ciclo profundo, ya que este tipo de baterías tienen la capacidad para descargar energía de manera sostenida durante un período prolongado. Esto las hace ideales para aplicaciones como vehículos eléctricos, almacenamiento de energía renovable y sistemas de alimentación ininterrumpida (UPS) [5], asegurando la operación continua del deshumidificador sin depender de la red eléctrica.

Se llevará a cabo una prueba piloto en una parcela del sector, la cual está destinada netamente a la producción de olivos. Se analizarán aspectos clave como la producción de agua bajo distintas condiciones climáticas, el consumo energético del deshumidificador y la autonomía del sistema fotovoltaico.

1.1.2. Objetivo general

Analizar la implementación de un sistema innovador y sostenible de extracción de agua ambiental, utilizando un equipo de deshumidificación alimentado por energía solar, realizando el estudio de viabilidad técnica-económica de la propuesta.

1.1.3. Objetivos específicos

- Implementar un prototipo piloto deshumidificador que funcione con energía generada por paneles fotovoltaicos en la localidad de Taltal.
- Evaluar la eficiencia del deshumidificador en la generación de agua en exterior con distintos niveles de humedad y temperatura.
- Desarrollar un sistema de riego que utilice el agua generada por el deshumidificador.
- Entregar un estudio de ingeniería respecto al retorno económico de la propuesta técnica.

1.1.4. Estructura del documento

La estructura del presente escrito es la siguiente:

- Capítulo 1: Introducción y presentación del problema.
- Capítulo 2: Marco teórico.
- Capítulo 3: Metodología.
- Capítulo 4: Análisis técnico-económico.
- Capítulo 5: Mejoras técnicas del deshumidificador.
- Capítulo 6: Conclusiones

Capítulo 2

Marco Teórico

2.1. Situación hídrica y climática en Taltal

En Taltal se presentan dos tipos de climas según su geografía. Hacia la costa se presenta un clima desértico costero nuboso, donde debido a los murallones costeros de la cordillera de la costa, se produce un efecto de camanchaca (niebla costera) generando una mayor humedad y, por ende, vegetación. Por otra parte, al oriente de la comuna, se tiene un clima desértico interior. Las precipitaciones están condicionadas a fenómenos climáticos propios de la zona por lo que pueden variar año a año [6]. Desde el año 2017, y solo a dos kilómetros del centro de Taltal se han registrado las condiciones ambientales mediante una moderna estación agrometeorológica automática llamada “La Cachina” [2]. La transmisión y monitoreo de los datos es en tiempo real y puede encontrarse en la página oficial del Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA).

Con los datos transmitidos de esta estación meteorológica se obtuvieron las condiciones de temperatura, precipitaciones y humedad relativa desde el año 2020 al año 2024, para obtener una característica más actualizada de las condiciones ambientales.

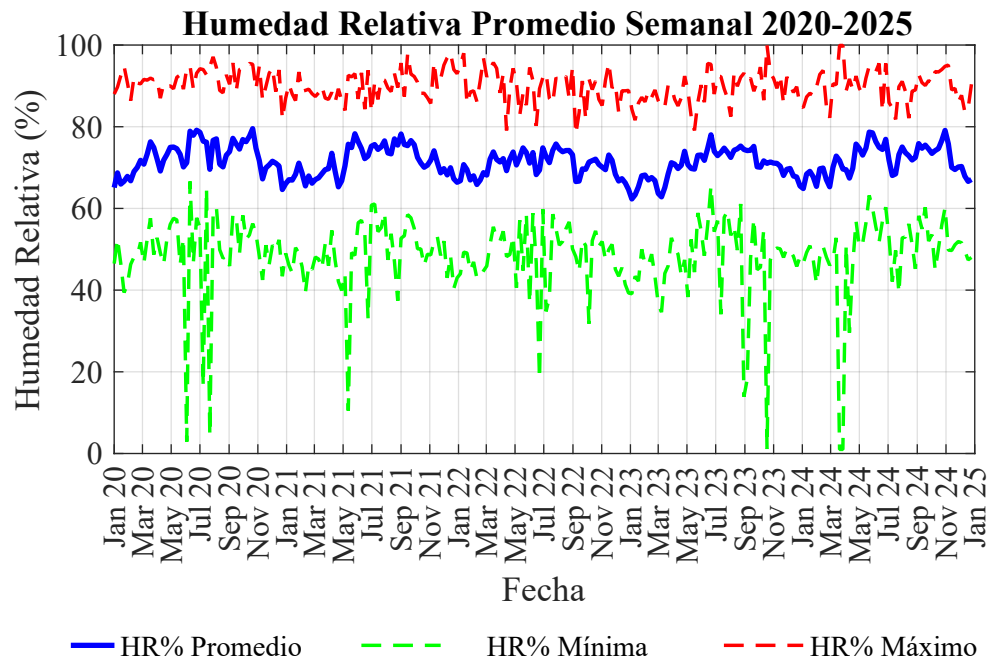


Figura 2.1: HR % estación meteorológica "La Cachina"
<https://agrometeorologia.cl>

De la figura [2.1](#) se pueden observar tres líneas representativas:

- Humedad Relativa (Azul): Representa el promedio de la humedad.
- Humedad Mínima (Verde): Indica los valores más bajos registrados.
- Humedad Máxima (Rojo): Muestra los valores más altos registrados.

Se observa como tendencia general que la humedad relativa máxima se mantiene estable a lo largo de los años, con niveles entre el 85 % y el 90 %, por otro lado la humedad relativa mínima es la que presenta una mayor variabilidad, con descensos marcados en los periodos de verano, mostrando un pico mínimo en marzo del 2024. De modo general, se observa un buen nivel de humedad relativa promedio, manteniendo su mínima siempre sobre un 40 % HR.

Aunque Taltal se encuentra en medio del desierto de Atacama, su humedad relativa es mucho mayor en comparación a otras ciudades de la segunda región como Antofagasta o Calama. La presencia constante de camanchaca y la cercanía al mar evitan que la humedad descienda lo cual hace que el lugar tenga potencial para la captación de agua desde la niebla.

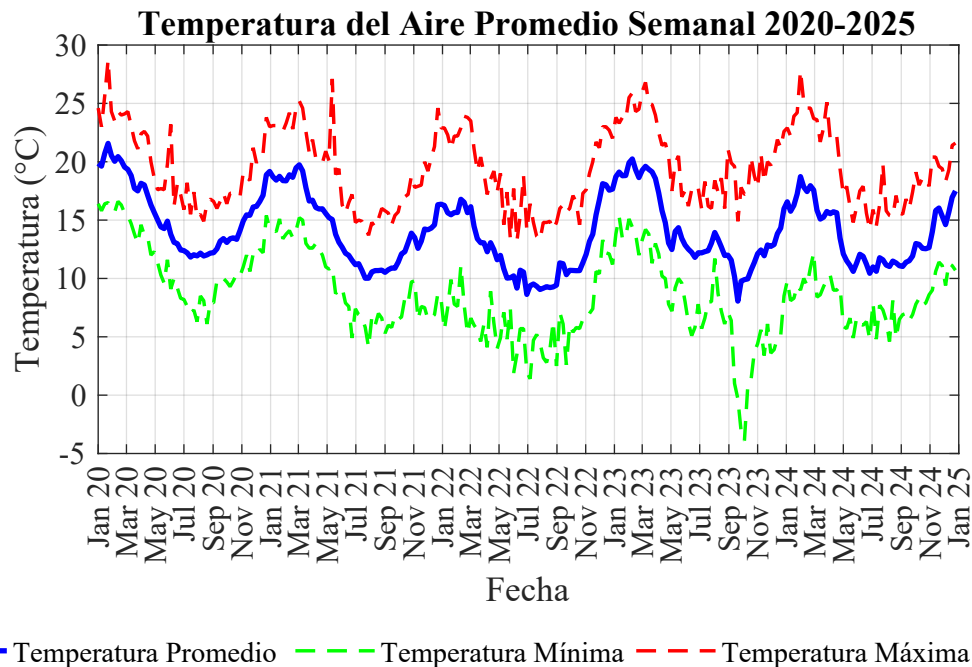


Figura 2.2: Temperatura estación meteorológica "La Cachina"

<https://agrometeorologia.cl>

De la figura [2.2](#) se pueden observar tres líneas representativas:

- Temperatura promedio (azul): Representa el promedio de la temperatura.
- Temperatura mínima (verde): Indica los valores más bajos registrados.
- Temperatura máxima (rojo): Muestra los valores más altos registrados.

Las tendencias generales de la temperatura muestran una estacionalidad bien marcada, siendo las temperaturas más altas en verano de enero a marzo y más bajas en invierno de junio a agosto. Los rangos de temperaturas de estas estaciones oscilan entre los 9°C en invierno y los 20°C en verano, indicando un clima templado en medio del desierto de atacama. La amplitud térmica diaria es significativa, sin embargo, no es extrema en comparación a otras zonas áridas. El pico mínimo de temperatura registrado en el periodo corresponde a octubre del 2024, donde se registro la mínima de 4.4°C.

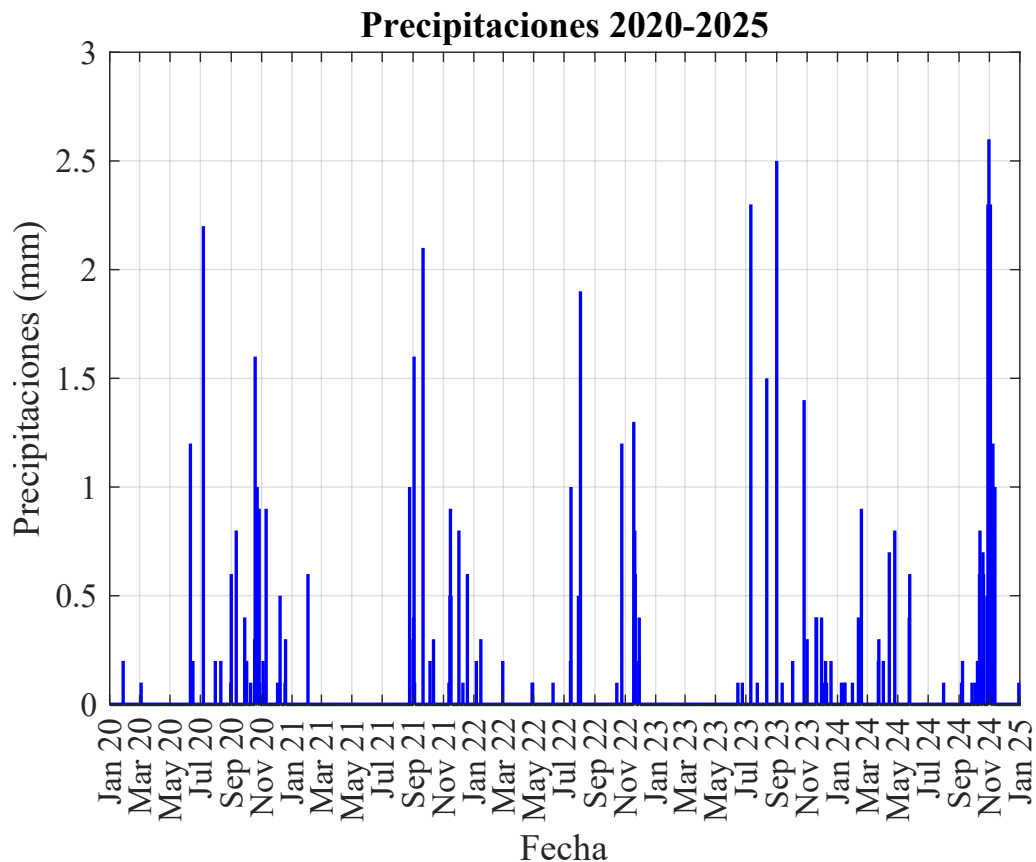


Figura 2.3: Precipitación acumulada estación meteorológica "La Cachina"
<https://agrometeorologia.cl>

Se observa en la figura 2.3 que la mayoría de los meses se presentan valores de precipitación cercanos a 0 mm, lo cual es propio de un clima desértico. Sin embargo, se muestran eventos ocasionales de lluvia principalmente en los meses de invierno junio y julio y los meses de primavera de septiembre y octubre. El pico de precipitaciones del periodo se encuentra en octubre del 2024 con 9 mm. Se evidencia además que el año 2024 fue el año con mayor precipitación acumulada del periodo.

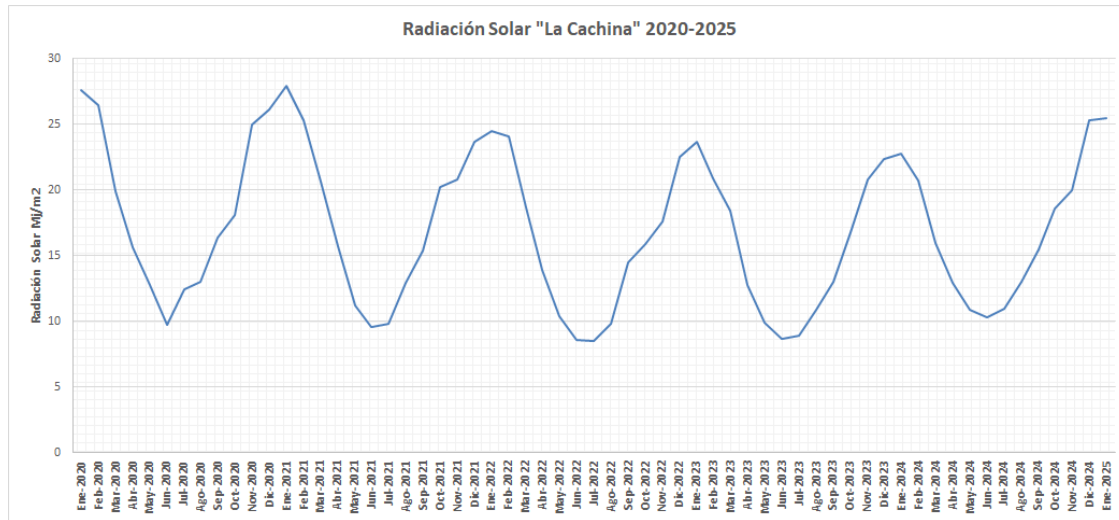


Figura 2.4: Radiación solar estación meterológica "La Cachina"

<https://agrometeorologia.cl>

Como se observa en la figura [2.4](#) presenta una variación estacional, con los valores más altos en los meses de verano: diciembre, enero y febrero, y más bajos en los meses de invierno como junio y julio. El pico máximo registrado se encuentra en los meses de enero, con valores entre $24\text{--}28 \text{ MJ/m}^2$, lo cual indica un alto potencial para la generación de energía solar. El mínimo se presenta en los meses de junio y julio, con valores entre $8\text{--}11 \text{ MJ/m}^2$, lo que sugiere una reducción en la producción de energía solar en esos meses, pero aún tiene disponibilidad suficiente.

2.2. Presentación del problema

A solo 2 kilómetros de la pequeña ciudad de Taltal se ubica la Asociación Gremial de Pequeños Agricultores del sector Los Loros (AGPAL). Esta asociación produce principalmente huevos frescos, pan, pollo, conejos, aceite de oliva, lechugas hidropónicas, berros, mermelada y dulce de membrillo. La asociación “Los Loros” tiene en total 58,56 hectáreas. La producción es baja, por lo que es destinada para consumo personal principalmente, y los remanentes distribuidos principalmente en Taltal [7].

La especie principal para agricultura es el olivo, debido a que es un árbol que puede desarrollarse en condiciones muy limitantes y presenta gran adaptación a condiciones adversas como el estrés hídrico [8]. Las características de los frutos son de maduración temprana, bajo contenido de pulpa y en general de aspecto deshidratado, con una baja relación pulpa/hueso, lo que dificulta la extracción industrial del aceite de oliva [9].

En el sector de Los Loros no se cuenta con red pública de agua ni tampoco con una fuente natural como pozo o napa subterránea y a pesar de que en la figura 2.3 se observa una crecida en el último año de la precipitación acumulada, esta cantidad de agua no tiene efecto para mitigar el déficit hídrico de los cultivos, sino por el contrario, al ocurrir eventos de menos de 15 mm, se produce una alteración de la distribución de las sales presentes en el suelo, afectando la nutrición del cultivo, llegando muchas veces a provocar intoxicaciones salinas en los árboles [2].

Es por eso que el agua utilizada tanto de forma doméstica como de regadío se obtiene mediante la compra a un tercero, mediante camiones aljibes, donde al año 2017, según datos de “El Plan de Acción de Innovación Agraria” [10], los agricultores señalan que es bastante costoso, pues los 5 metros cúbicos (5000 litros) tienen un valor de 35 mil pesos y alcanza para un máximo de dos semanas solo en regadío. Según los vecinos del sector Los Loros y principalmente en el sexto sector, de la parcelas de media hectárea (50 a la 57) con aproximadamente un 20 % del terreno utilizado para regadío, en el 2025 el metro cúbico de agua bordea los 40 mil pesos, siendo el costo de agua usada solo en regadío cerca de los 150 mil pesos mensuales.

En busca de soluciones económicas y sostenibles, en 2017 se llevó a cabo un proyecto denominado “Producción olivícola sustentable de la pequeña agricultura mediante gestión de agua de riego generada por sistemas atrapanieblas en el desierto costero de Antofagasta”, financiado a través de un Fondo de Protección Ambiental (FPA). Este proyecto permitió la instalación de un sistema piloto de atrapanieblas para la extracción de agua ambiental en el sector del Cerro Los Perales, a 1.200 metros sobre el nivel del mar, una zona ideal para este tipo de tecnología debido a la presencia de la camanchaca.

No obstante, en 2024, la Municipalidad de Taltal anunció que la Quebrada San Ramón y el Cerro Los Perales, ubicados en zonas de altura propicias para la instalación de atrapanieblas y cercanos a los pequeños sectores agrícolas como Los Loros, El Hueso y La Cachina, están en proceso de ser declarados parque nacional. Esta medida pondría en riesgo la instalación y operación de los sistemas atrapanieblas, ya que su uso representa una amenaza latente para la flora endémica de la zona, además de alterar su atractivo visual.

2.3. Extracción de agua ambiental

La extracción de agua ambiental se remonta a los inicios de la civilización en Chile. En la ciudad de Taltal, que se emplaza en la zona norte desértica costera de Chile, vivieron los camanchacos o changos, pueblo originario que utilizaba piedras planas (piedra laja) al final de plantas que naturalmente acumulaban agua en sus tallos para poder captar el agua condensada a partir de la niebla de la zona [11].

Sin embargo, en la actualidad existen métodos más tecnológicos para captar agua ambiental. Uno de ellos es el uso de deshumidificadores, dispositivos originalmente diseñados para extraer la humedad presente en el aire mediante procesos de enfriamiento y condensación. A través de la reducción de la temperatura del aire por debajo de su punto de rocío, estos equipos generan agua líquida a partir del vapor de agua atmosférico. Esta agua, en condiciones normales de uso, suele ser descartada; por ello, uno de los focos de esta memoria es analizar si su aprovechamiento puede constituir una alternativa viable para obtener agua en zonas con acceso limitado a fuentes tradicionales.

2.3.1. Deshumidificador

Un deshumidificador es un equipo electrónico utilizado en interior para disminuir la humedad de una habitación o un ambiente. Existen dos clasificaciones de deshumidificadores y estos se diferencian por la tecnología y elementos que poseen para la captación de humedad: condensación y adsorción. [12].

Los deshumidificadores por condensación (también llamados secadores en frío o por compresión) utilizan el principio de enfriamiento para provocar la condensación del vapor de agua presente en el aire. En estos sistemas, el aire húmedo es forzado a pasar por un intercambiador térmico (evaporador) cuya temperatura está por debajo del punto de rocío, causando la condensación del agua, que luego es recolectada en un depósito. Esta categoría incluye también dispositivos basados en celdas Peltier, los cuales operan bajo el mismo principio aunque a menor escala y con menor eficiencia.

En contraste, los deshumidificadores por adsorción emplean materiales higroscópicos, como gel de sílice o tamices moleculares, que retienen el vapor de agua a través de fenómenos de adsorción superficial. Posteriormente, el material se regenera mediante aire caliente, liberando el agua adsorbida. Este método es especialmente útil en ambientes de baja temperatura o cuando se requiere alcanzar niveles de humedad muy reducidos.

En ambos tipos de sistemas, el proceso básico consiste en captar aire húmedo mediante un ventilador, remover el contenido de humedad en el interior del equipo y recircular el aire seco al ambiente. No obstante, las aplicaciones, eficiencia energética y condiciones de operación óptimas varían significativamente entre ambas tecnologías [13].

2.3.1.a. Adsorción

Los sistemas por adsorción extraen el vapor de agua a través de la diferencia de presión de vapor entre el aire y el material adsorbente. A diferencia del método de condensación, estos equipos no generan agua líquida de forma directa. La humedad retenida se libera del material desecante mediante una corriente de aire caliente (proceso de regeneración), siendo expulsada al ambiente nuevamente en forma de vapor.

Proceso del ciclo de un deshumidificador por adsorción:

■ Flujo 4 al 6: Circuito de proceso

- El aire húmedo del ambiente pasa a través del rotor (4).
- El rotor está impregnado con un material higroscópico (1), que adsorbe el vapor de agua del aire.
- El aire, ahora seco, sale (6) y es recirculado al ambiente.
- El rotor, por su parte, se satura progresivamente con la humedad capturada.

■ Flujo 8 al 5: Circuito de regeneración

- El aire ambiente de regeneración (8) es succionado por un ventilador (5) e ingresa al sistema.
- Este aire pasa por el calentador de regeneración (7), donde se eleva su temperatura.
- El aire caliente entra al sector de reactivación (2) del rotor, arrastrando la humedad acumulada y permitiendo su desorción.
- El aire, ahora cargado de vapor de agua, es expulsado fuera del equipo y del ambiente de trabajo (8).

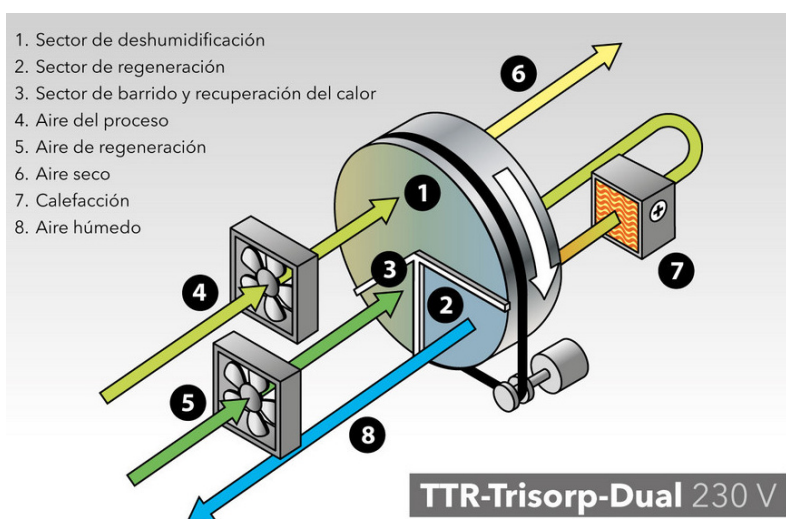


Figura 2.5: Funcionamiento sistema de deshumidificación por adsorción

Fuente: Guía de conocimiento práctico deshumidificación Trotec

2.3.1.b. Condensación

Para definir los deshumidificadores por condensación, se debe describir el concepto de *punto de rocío*. Se denomina punto de rocío a la temperatura a la que el aire debe enfriarse, manteniendo constante la presión y el contenido de vapor de agua, para que este comience a condensarse. Este fenómeno ocurre porque la capacidad del aire para retener vapor de agua disminuye a medida que su temperatura baja. Cuando el aire húmedo

entra en contacto con una superficie cuya temperatura está por debajo de su punto de rocío, se supera el umbral de saturación (100 % de humedad relativa), lo que provoca la condensación del excedente de humedad en forma de gotas sobre dicha superficie.

Los deshumidificadores por condensación operan precisamente sobre este principio físico: extraen aire húmedo del ambiente, lo enfrían mediante un sistema de refrigeración por debajo de su punto de rocío, y recolectan el agua que se condensa en superficies internas frías, típicamente en un evaporador. Posteriormente, el aire seco es recalentado ligeramente y recirculado al ambiente. Este tipo de tecnología incluye tanto los sistemas con compresor como los deshumidificadores termoeléctricos basados en celdas Peltier.

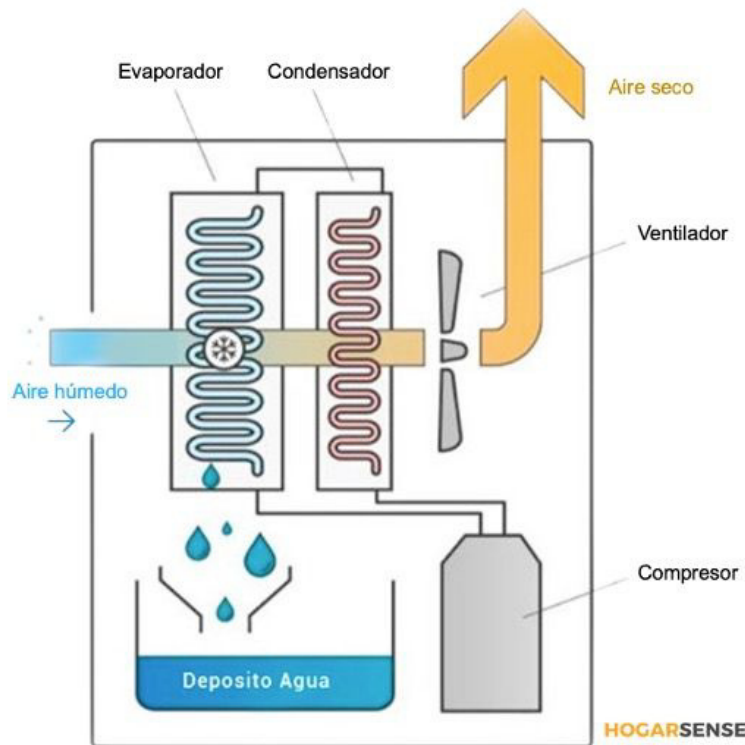


Figura 2.6: Componentes de un sistema de deshumidificación

Fuente: Hogarsnse.es

En la figura 2.6 se observa el proceso del sistema de deshumidificación que sirve como referencia para entender cómo funciona el deshumidificador por refrigeración.

- 1. El compresor aspira el aire húmedo del exterior y lo dirige hacia el interior del sistema.
- 2. El aire pasa por un evaporador frío, donde la temperatura desciende y el vapor de agua se condensa en forma de gotas.
- 3. Las gotas de agua se acumulan en un depósito, separando la humedad del aire.
- 4. El aire seco pasa por el condensador caliente, donde recupera temperatura antes de salir.

- 5. El compresor mantiene el ciclo de refrigeración, comprimiendo el refrigerante y permitiendo la repetición del proceso.
- 6. El aire seco pasa por el ventilador y se expulsa al ambiente, reduciendo la humedad relativa del espacio.

Ya que la finalidad de esta memoria es extraer agua del ambiente para luego utilizarla en el riego, se utilizó el deshumidificador refrigerante TTK127E de la marca Trotec, este deshumidificador en condiciones ideales de 30°C y 80 % de HR puede generar hasta 50 litros de agua al día y cubre una superficie total hasta de 150 m² [14] ya que el objetivo es obtener agua del ambiente.



Parámetro	Valor
Capacidad de deshumidificación máx	50L/24h
Capacidad de deshumidificación a 30°C y 80 % H.R.	46.8L/24h
Caudal de aire	[319, 353] m ³ /h
Rango de funcionamiento (Temperatura)	[5, 32] °C
Gama de funcionamiento (H.R. aire)	[35, 100] % H.R.
Conexión a la red eléctrica	1/N/PE [220, 240] V / 50 Hz
Consumo de potencia máx	1.06 kW
Corriente nominal	5.4 A
Fusible	3.15A/250 V AC
Refrigerante	R290
Cantidad de refrigerante	145 g
Factor PCG	3
Equivalente de CO ₂	0.00044 t

Figura 2.7: Descripción general del deshumidificador y su tabla de especificaciones.

Según la figura 2, se tienen las variables de interés, consume 1.06 kW, una corriente de 5.4 A, tensión de 220 V y una frecuencia de 50 Hz, los cuales corresponden a datos de uso domiciliario.

Considerando que la humedad relativa de la localidad de Taltal no bajó del 40 % en los últimos 4 años, como se muestra en la figura 2.1, se considera viable utilizar y estudiar el comportamiento de este deshumidificador para la extracción de agua ambiental en exterior.

2.3.2. Monitoreo de potencia y condiciones ambientales

Dado que las condiciones ambientales, como la temperatura y la humedad, no son constantes y varían según la hora del día y la estación del año, es fundamental realizar un monitoreo para evaluar la cantidad de agua extraída y el consumo energético del equipo bajo diferentes combinaciones de estos parámetros. Además, debido a que la temperatura y la humedad pueden cambiar significativamente entre distintos sectores, se optó por realizar las mediciones en el mismo espacio donde operará el deshumidificador, para asegurar así una mayor precisión. Para ello, se emplearon tres dispositivos destinados al monitoreo del

consumo de potencia, la temperatura y la humedad de forma automatizada, evitando así errores humanos durante la toma de datos.

Para el monitoreo de potencia se utilizó el analizador de redes de Qualistar modelo C.A. 8333 mostrado en la figura 2.8 el cual permite obtener una medición instantánea de las principales características de la red eléctrica. Se puede utilizar para realizar un estudio energético completo de una instalación. Está equipado con 3 canales de medición de tensión y 3 canales de medición de corriente. El CA 8333 captura y registra todos los parámetros, transitorios, alarmas y formas de onda simultáneamente.



Figura 2.8: Analizador de Redes C.A. 8333

Para el monitoreo de temperatura y humedad, se empleó un Arduino UNO junto con un sensor DHT11, adjuntado en el anexo, capaz de medir ambos parámetros en el área de estudio. Además, se desarrolló un código A que permite la toma de mediciones de forma automática y se utilizó la herramienta “Transmisor de Datos” para transferir los datos de forma automática a una hoja de cálculo en Excel, facilitando así el registro y análisis de los datos recopilados.



Figura 2.9: Arduino UNO



Figura 2.10: Sensor DHT11

El sensor de temperatura y humedad DHT11 integra un sistema de medición de temperatura y humedad con una salida de señal digital. El DHT11 está compuesto por un sensor capacitivo de humedad y un termistor de resistencia variable para la medición de temperatura, los cuales están conectados a un microcontrolador de 8 bits de alto rendimiento [15]. Esto le proporciona una buena calidad de medición, rápida respuesta, alta resistencia a interferencia y una buena relación costo-beneficio. El sensor requiere de una alimentación de 3.3V a 5V, lo que lo hace ideal para conectarlo a Arduino UNO.

2.4. Sistemas fotovoltaicos off grid

Un sistema fotovoltaico es aquel que permite convertir la energía solar en electricidad mediante el efecto fotovoltaico [16]. Los sistemas fotovoltaicos tienen dos tipos de clasificación según su conexión, por un lado están los sistemas fotovoltaicos on grid (conectado a la red) y los sistemas fotovoltaicos off grid (aislados de la red). El primer sistema funciona conectado a la red eléctrica, como se ilustra en la figura 2.11 en donde se identifican los elementos de este sistema.

- 1.- Panel fotovoltaico.
- 2.- Inversor.
- 3.- Carga domiciliaria.
- 4.- Medidor bidireccional.
- 5.- Red eléctrica.



Figura 2.11: Sistema fotovoltaico on grid (elaboración propia con elementos de Canva 2025)

El sistema fotovoltaico on grid funciona conectado a la red eléctrica, inyectando o consumiendo energía según la demanda y la generación. El medidor bidireccional tiene la función de registrar tanto la inyección como el retiro de energía.

El sistema fotovoltaico off grid, funciona sin conexión a la red eléctrica. Este sistema puede o no tener un sistema de almacenamiento de energía. En la figura 2.12 se identifican los elementos del sistema off grid con almacenamiento de energía.

- 1.- Panel fotovoltaico.
- 2.- Inversor.
- 3.- Carga domiciliaria.
- 4.- Baterías

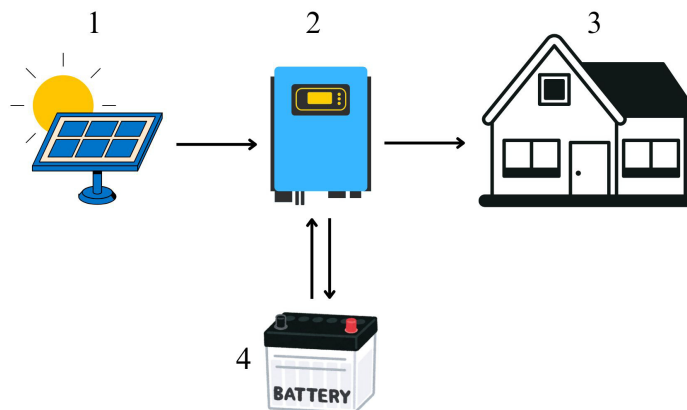


Figura 2.12: Sistema fotovoltaico off grid (elaboración propia con elementos de Canva 2025)

Los sistemas off grid se utiliza cuando la ubicación del proyecto es una zona remota, en donde no existe infraestructura eléctrica o bien es costoso extender la red [17].

Considerando la ubicación de la parcela demostrativa en la cual se realizarán los estudios para esta memoria es que se opta por usar un sistema fotovoltaico off grid, ya que a pesar de quedar solo a 2 kilómetros de la ciudad de Taltal, el sector no cuenta con la posibilidad de extender las líneas de distribución y por ende resulta imposible conectarse a la red.

2.4.1. Estudio de disponibilidad del recurso solar



Figura 2.13: Visión satelital parcela demostrativa (Google Maps visión satelital 2025)

La parcela número 57 es el sitio demostrativo donde se llevarán a cabo los experimentos prácticos de la memoria. Se encuentra ubicada en las coordenadas -25.442475 , -70.446763 .

Actualmente, como se muestra en la imagen [2.13](#), la parcela mide cerca de media hectárea y posee 101 olivos, los cuales miden cerca de 1 metro cada uno. Mediante la página del explorador solar del ministerio de energía se pudieron obtener los siguientes datos sobre el recurso solar del sector específico.

Global Horizontal ($\text{kWh}/\text{m}^2/\text{día}$)	Global Inclinado 25° ($\text{kWh}/\text{m}^2/\text{día}$)	Directa Normal ($\text{kWh}/\text{m}^2/\text{día}$)	Directa Horizontal ($\text{kWh}/\text{m}^2/\text{día}$)
5,95	6,30	7,56	1,02

Tabla 2.1: Radiación anual parcela demostrativa

Fuente: <https://solar.minenergia.cl/exploracion>

De la misma página del explorador solar se obtiene que la inclinación óptima de los paneles es de 25° y que su azimut es de -30° .

2.5. Sistema de riego

2.5.1. Tipos de sistema de regadío

Chile presenta una gran diversidad de climas y condiciones meteorológicas a lo largo de su territorio, lo que genera una disponibilidad de agua variable según la región. En este contexto, el riego se convierte en uno de los principales factores que el agricultor puede controlar para asegurar la producción.

El objetivo fundamental del riego es compensar el déficit hídrico generado por el balance entre la evapotranspiración del cultivo y las precipitaciones, por esta razón, entre los pequeños agricultores existen distintos criterios y procedimientos para seleccionar el sistema de riego más adecuado a sus condiciones.

La implementación de sistemas de riego tecnificados a nivel predial permite un uso más eficiente del recurso hídrico, incrementa la superficie potencialmente regable y optimiza el uso de la energía disponible [18].

2.5.1.a. Riego Superficial

El riego superficial, también conocido como riego por inundación, es la técnica de riego que consiste en aplicar y distribuir agua sobre la superficie del suelo por gravedad. Es, con diferencia, la forma de riego más común en todo el mundo y se ha practicado en muchas zonas prácticamente sin cambios durante miles de años [19].

En Chile, este método representa cerca del 70 % de la superficie regada, debido principalmente a los bajos costos energéticos en comparación con otros sistemas presurizados [18].

Los tipos de riego superficial son:

- Riego con regueras en contorno
 - Utilizado en terrenos con pendientes mayores a 2,5 %.
 - El agua se conduce por regueras trazadas con pendiente leve.
 - Se usan mantas o estructuras artesanales para distribuir el agua.
- Riego por bordes o platabandas
 - Se divide el terreno en franjas rectangulares (platabandas).
 - El agua avanza en sentido longitudinal por cada franja.
 - Requiere buena nivelación y control del caudal.
- Riego por surcos
 - El agua circula por regueras pequeñas que luego alimentan surcos paralelos.
 - Se infiltra por los lados y el fondo del surco.
 - Muy usado en cultivos en hileras (como maíz o frutales).

2.5.1.b. Riego por Aspersión

Este tipo de sistema de riego es muy versátil y permite regar desde jardines y parques a grandes predios agrícolas. Este método consiste en elevar la presión del agua de manera que salga similar a la lluvia, esparciéndola en pequeñas gotas. Funciona con una red de tuberías que lleva el agua hasta los aspersores, los cuales la rocían. Para hacerlo más eficiente, se utiliza un sistema de bombeo que impulsa el agua [20].

Los tipos de sistemas de riego por aspersión son:

- Móvil o tradicional
 - Todo el sistema es desmontable y portátil: tuberías, aspersores y bomba.
 - Se utiliza motobomba, bomba a combustión o toma de fuerza de tractor.
- Semifijo
 - La bomba y tuberías matrices suelen estar fijas o enterradas.
 - Los laterales (con aspersores) se conectan mediante hidrantes.
 - Las conexiones permiten cambiar la ubicación de los ramales secundarios.
- Fijo
 - Toda la instalación (tuberías principales, secundarias y laterales) está enterrada.
 - Sólo sobresalen los elevadores con aspersores.
 - Muy fácil de operar, pero de alto costo de instalación.
 - Usado en empastadas y superficies pequeñas.

2.5.1.c. Riego Localizado o Microriego

El microriego o riego localizado es un sistema que aplica el agua directamente en la zona de influencia de las raíces de cada planta, en bajo caudal y de forma frecuente, manteniendo una humedad óptima para el cultivo.

Este método se caracteriza por su alta eficiencia en el uso del agua (hasta 95 %), bajo consumo energético y adaptabilidad a terrenos irregulares. Además, permite automatización, fertilización simultánea (fertirriego) y es ideal para cultivos con marcos de plantación definidos como frutales, viñas, hortalizas en camas, invernaderos, etc [18].

Los tipos de sistemas de microriego son:

- Riego por goteo
 - El agua se aplica en gotas a través de emisores o goteros ubicados cerca del tallo.
 - Es el más utilizado dentro del microriego.
 - Puede ser superficial (con cintas o mangueras visibles) o subterráneo.
- Riego por microaspersión

- Utiliza emisores que rocían agua en forma de lluvia fina, cubriendo un área mayor.
- Más usado en viveros, berries, cítricos y frutales sensibles.
- Riego por exudación
 - Usa mangueras porosas que exudan agua de forma continua.
 - Menos común, pero útil en cultivos de alta densidad.

2.5.2. Sistema y necesidades de riego parcela demostrativa

En la parcela demostrativa se tiene como especie principal el olivo, el cual ha logrado adaptarse a las condiciones áridas del norte de Chile. Tanto el sector de Los Loros como los alrededores (La Cachina y El Hueso) presentan condiciones climáticas adversas como la salinidad de la tierra, las dificultades para acceder al agua y las nulas precipitaciones. Para este sector, el riego tecnificado ha significado una solución efectiva para el desarrollo agrícola a pequeña escala.

En la actualidad y gracias a INDAP el riego por goteo constituye el principal método utilizado en estas plantaciones, desplazando progresivamente al riego por tazas, el cual era el sistema tradicional.

En la figura 2.14 se puede apreciar la malla actual del sistema de riego por goteo presente en la parcela demostrativa.

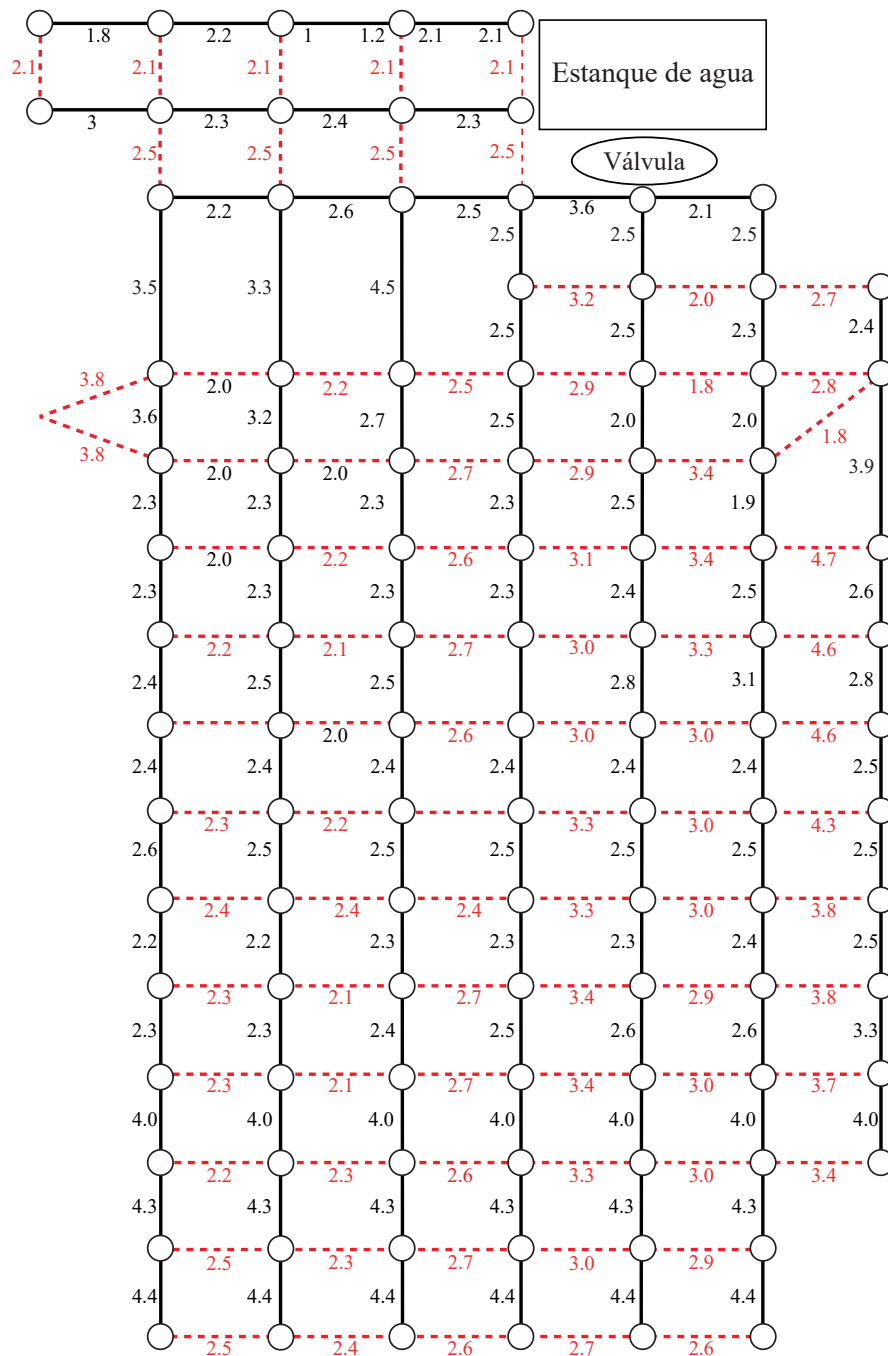


Figura 2.14: Malla de riego

El sistema actual de riego combina la eficiencia del riego por goteo con la pendiente negativa del terreno, lo que favorece a la caída de agua producto de la gravedad. Los goteros se ubican dentro de un pretil circular previamente acondicionado y es esta estructura la que favorece la concentración del agua en la zona radicular del olivo, optimizando la infiltración y reduciendo pérdidas por escurrimiento superficial.

Sin embargo, la escasez hídrica continúa siendo una de las principales restricciones. Los afloramientos de agua presentes en las quebradas del sector no superan los 0,5 litros por segundo, y presentan altos niveles de salinidad, lo que limita aún más su uso directo. En este contexto, los agricultores han debido recurrir al acopio y transporte de agua desde fuentes externas, utilizando camiones aljibe o redes de distribución conectadas a nacientes como el sector Aguas Verdes [9].

Durante los meses estivales, cuando la evapotranspiración alcanza niveles entre 5,5 y 5,9 mm diarios, los olivos experimentan un severo estrés hídrico, que impacta negativamente en la formación de frutos y el crecimiento vegetativo. Esta situación evidencia la necesidad de mejorar la gestión hídrica mediante estrategias de automatización, que permitan ajustar la frecuencia y cantidad de riego en función de las condiciones climáticas y la humedad del suelo.

Para definir la demanda hídrica neta del cultivo o ET_c , en sus diferentes períodos de desarrollo, se utiliza la siguiente fórmula, la cual contempla el factor K_c indicado a continuación:

$$ET_c = ET_o \cdot K_c \quad (2.1)$$

Donde:

- ET_c (mm/día) : corresponde a la demanda hídrica del cultivo.
- ET_o (mm/día) : corresponde a la evapotranspiración de referencia para la zona, calculada mediante el método Penman-Monteith,
- K_c : factor adimensional definido por tabla.

2.5.2.a. Automatización del riego

La automatización del riego en un pequeño predio agrícola permite optimizar el uso y manejo del agua, activando el sistema únicamente cuando las condiciones ambientales sean favorables para el cultivo del olivo. Durante la noche, las temperaturas disminuyen y la humedad ambiental tiende a estabilizarse, lo que favorece una mayor eficiencia en la absorción de agua por parte de las plantas. Por ello, el sistema puede ser programado para operar en función de variables como la intensidad lumínica y la humedad relativa del suelo y del ambiente, ajustando el momento y la cantidad de riego de manera precisa.

La propuesta para la parcela demostrativa considera un sistema autónomo compuesto por un centro de control, sensores de humedad y luz y una fuente de alimentación mediante energía fotovoltaica. Este enfoque permite implementar la solución en zonas geográficamente aisladas, sin conexión a la red eléctrica ni acceso a internet, reduciendo significativamente la necesidad de intervención humana.

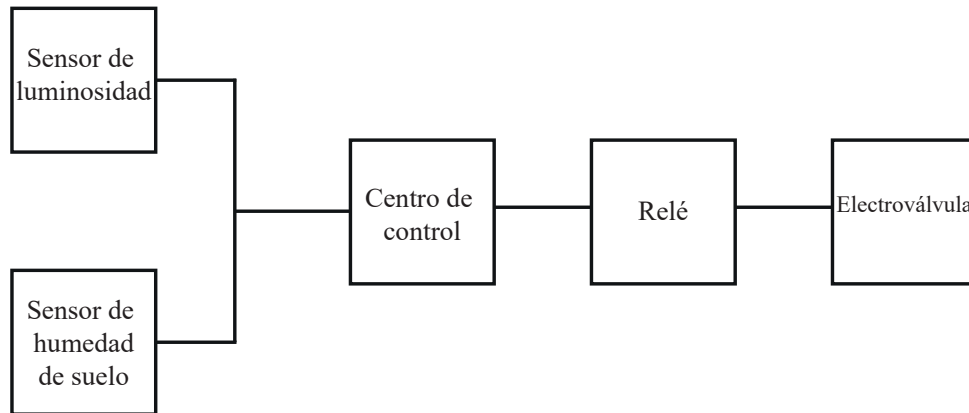


Figura 2.15: Esquema base de automatización del riego

El sistema de riego automatizado propuesto en la figura 2.15 funciona mediante una lógica de control basada en la lectura de dos variables clave: la humedad del suelo y la luminosidad ambiental. Ambas variables son monitoreadas de forma continua por sensores, cuyos datos son procesados por un microcontrolador que actúa como centro de control.

Cuando la humedad del suelo cae por debajo de un umbral predefinido y las condiciones de luminosidad indican que es un momento adecuado para el riego (durante la noche), el centro de control envía una señal de activación a un módulo de relé. Este, a su vez, permite el paso de corriente hacia una electroválvula, abriendo el flujo de agua hacia la malla de riego.

Este sistema se basa en un control ON/OFF, este tipo de control permite implementar un sistema de bajo costo, fácil implementación y escaso consumo energético, ideal para contextos rurales con recursos limitados. En el sistema, el estado de la electroválvula (abierta o cerrada) depende directamente del cumplimiento de las condiciones programadas. En términos generales, el control puede describirse mediante una lógica booleana:

$$\text{Riego}(t) = \begin{cases} 1, & \text{si } H(t) < H_{\text{crítica}} \wedge L(t) < L_{\text{crítica}} \\ 0, & \text{en otro caso} \end{cases}$$

Donde:

- $H(t) \rightarrow$ Humedad del suelo en el instante t
- $L(t) \rightarrow$ Luminosidad en el instante t
- $0 \rightarrow$ Indica el estado abierto del relé
- $1 \rightarrow$ Indica el estado cerrado del relé

Esta estrategia de automatización reduce el consumo de agua al asegurar que el riego se realice únicamente bajo condiciones óptimas para la absorción por parte del cultivo, evitando tanto el exceso como el déficit hídrico.

La fuente de energía del sistema será un pequeño sistema fotovoltaico con una batería, permitiendo la operación en forma autónoma.

Este sistema automatizado representa una solución sustentable y replicable para predios agrícolas de pequeña escala, especialmente en zonas áridas como lo es la localidad de Taltal y con acceso limitado a agua y electricidad como lo es el sector de Los Loros.

2.6. Conversión de potencia

El sistema fotovoltaico a implementar consiste de un sistema de convertidores del tipo DC/DC/AC monofásico, un tipo de convertidor de potencia que es capaz de transformar la energía eléctrica en forma de corriente continua (DC) a corriente alterna (AC), utilizando un solo sistema de conversión [21]. La parte DC/DC se implementará con un convertidor Boost [22], el cual eleva la tensión de entrada desde 24V de los paneles a 360V y, por otro lado, la configuración DC/AC corresponde al convertidor puente H, con los niveles +VDC y - VDC con $VDC = 360V$, más un filtro LC de salida. En la figura 3 se indica la topología del sistema a implementar.

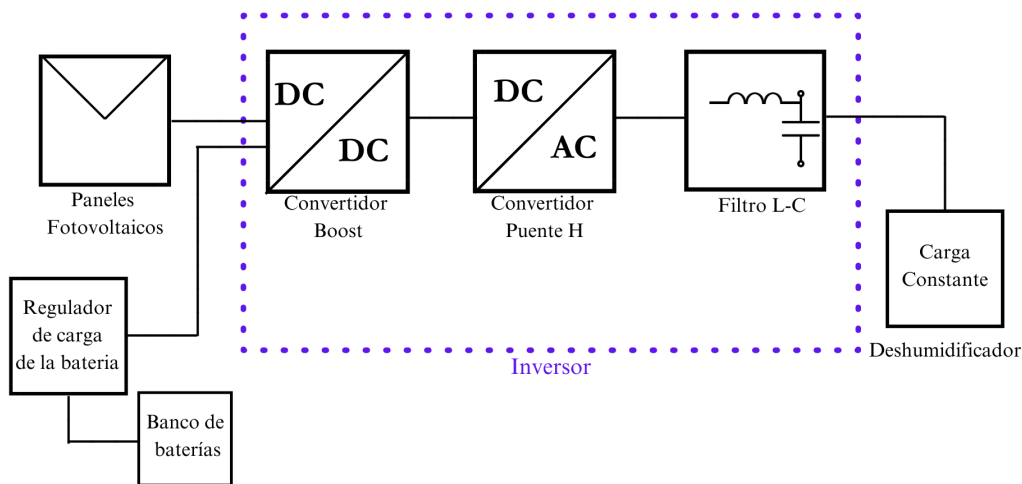


Figura 2.16: Topología del Sistema (elaboración propia)

2.6.1. Convertidor Boost

El convertidor DC/DC utilizado, que en este caso es un convertidor boost, el cual se utiliza como un elevador de tensión. Su funcionamiento se basa en que la tensión de entrada V_i carga primero el inductor L , y posteriormente el condensador C se carga, lo que permite que la tensión de salida V_o se eleve [23].

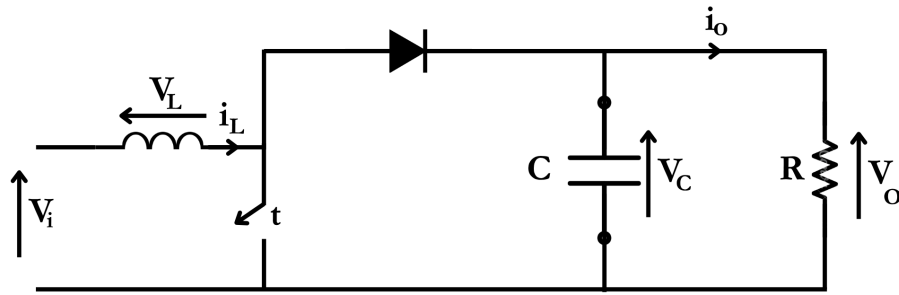


Figura 2.17: Convertidor Boost (elaboración propia)

De la figura 2.17 se pueden identificar los elementos que conforman el convertidor boost:

- V_i : Tensión de entrada
- L : Inductor
- i_L : Corriente del inductor
- V_L : Tensión en el inductor
- i_d : Corriente que circula por el diodo
- C : Condensador
- i_C : Corriente del condensador
- V_C : Tensión en el condensador
- R : Resistencia de carga
- i_o : Corriente de salida
- V_o : Tensión de salida

Además de las leyes de los elementos:

$$V_L = L \frac{di_L}{dt} \quad (2.2)$$

$$i_C = C \frac{dV_C}{dt} \quad (2.3)$$

y la relación entre corriente de salida y carga:

$$i_o = \frac{V_o}{R} \quad (2.4)$$

Para analizar el convertidor boost, se parte del supuesto de que la corriente que circula por el inductor es siempre mayor que cero, condición que garantiza el funcionamiento en modo de conducción continua.

En lugar de considerar los ciclos ON/OFF del interruptor, se utiliza el duty cycle D , que se define como:

$$D = \frac{t_{on}}{T} \quad (2.5)$$

Donde t_{on} es el tiempo durante el cual el interruptor está cerrado y T es el período total del ciclo de conmutación. El duty cycle determina la fracción de tiempo en que el inductor se carga y, posteriormente, el condensador transfiere energía a la salida, elevando así la tensión V_o .

Para analizar el comportamiento del circuito, es necesario analizarlo en dos escenarios:

- t_{on} : con el interruptor cerrado
- t_{off} : con el interruptor abierto

2.6.1.a. Estado 1: t_{on}

Cuando el interruptor está cerrado el diodo queda inversamente polarizado y no conduce, por lo tanto $i_d = 0$. El inductor está directamente conectado a la fuente y se carga, por otro lado el condensador suministra su energía almacenada a la carga.

Por LTK:

$$V_L = V_i \quad (2.6)$$

Como $i_d = 0$, se tiene en el LCK:

$$0 = i_C + i_o \implies i_C = -i_o \quad (2.7)$$

Utilizando (2.3) y (2.4):

$$C \frac{\partial V_c}{\partial t} = \frac{V_o}{R} \quad (2.8)$$

Retomando (2.6) y (2.2):

$$\frac{\partial i_L}{\partial t} = \frac{V_i}{L} \longrightarrow \frac{\Delta i_L}{\Delta t} = \frac{V_i}{L}$$

Donde Δt es el incremento en el tiempo, que es lo que dura encendido el interruptor, en este caso desde (2.5), vendría siendo el duty cycle por el periodo.

$$\frac{\Delta i_L}{D \cdot T} = \frac{V_i}{L}$$

Finalmente:

$$\boxed{\Delta i_{L_{on}} = \frac{V_i \cdot D \cdot T}{L}} \quad (2.9)$$

2.6.2. Estado 2: t_{off}

Con el interruptor abierto el diodo se polariza directamente y conduce, permitiendo que la energía almacenada en el inductor sea entregada al condensador y a la carga.

Ecuaciones en este subintervalo:

LTK en el circuito:

$$V_i = V_L + V_o \quad (2.10)$$

Por la (2.2):

$$\frac{\partial i_L}{\partial t} = \frac{V_i - V_o}{L} \rightarrow \frac{\Delta i_L}{\Delta t} = \frac{\Delta i_L}{(1-D)T} = \frac{V_i - V_o}{L} \quad (2.11)$$

Finalmente:

$$\boxed{\Delta i_{L_{off}} = \frac{V_i - V_o \cdot (1-D) \cdot T}{L}}$$

Por variación neta de la corriente en la bobina, la suma de los incrementos de corriente en estado abierto y estado cerrado, ha de ser cero, por lo que:

$$\Delta i_{L_{on}} + \Delta i_{L_{off}} = 0 \quad (2.12)$$

Entonces

$$\frac{V_i \cdot D \cdot T}{L} + \frac{V_i - V_o \cdot (1-D) \cdot T}{L} = 0$$

Pasando (2.6.2) al lado derecho y multiplicando por $\frac{L}{T}$, y desarrollando queda:

$$V_i = V_o \cdot (1-D)$$

Finalmente, la función transferencia queda:

$$\boxed{\frac{V_o}{V_i} = \frac{1}{1-D}} \quad (2.13)$$

Por lo tanto, la salida V_o siempre es mayor que la entrada V_i , y la ecuación (2.13) es la ecuación que determina el funcionamiento del convertidor boost.

2.6.2.a. Puente H

El puente H es una configuración que puede ser utilizada como inversor o rectificador. En este caso, se utilizará como inversor para convertir la tensión continua de la salida del convertidor Boost en tensión alterna. Su objetivo principal es iterar entre las polaridades de la tensión aplicada a la carga, permitiendo generar una señal AC a partir de una fuente DC [24].

En la figura 2.18 se observa el esquema del puente H, mientras que la tabla 2.2 muestra la lógica de operación de los interruptores. La conmutación controlada de los cuatro interruptores permite que la corriente fluya en una u otra dirección a través de la carga, generando los estados de tensión positiva, negativa o nula en la salida.

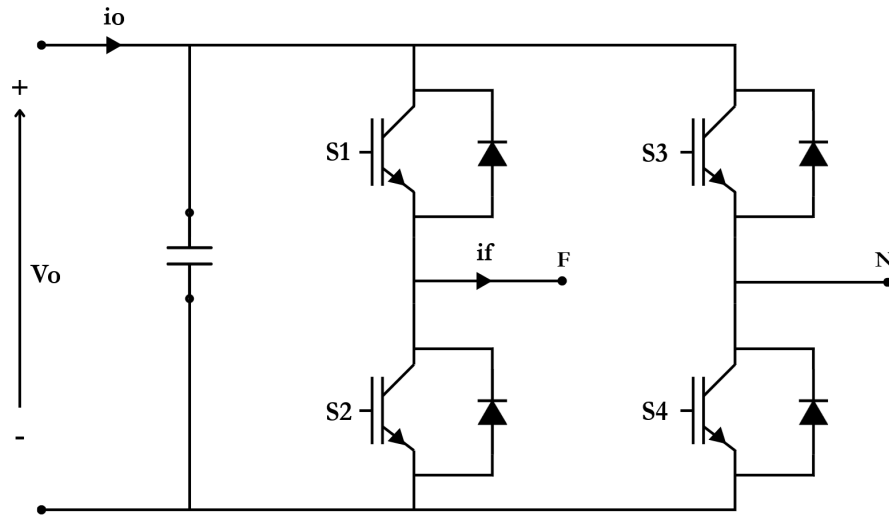


Figura 2.18: Circuito del puente H (elaboración propia)

S4	S3	S2	S1	V_{FN}
0	1	0	1	0
1	0	0	1	V_o
0	1	1	0	$-V_o$
1	0	1	0	0

Tabla 2.2: Tabla de verdad del puente H

La operación del puente H se puede describir de la siguiente manera:

- Para generar una tensión positiva en la carga ($+V_o$), se cierran los interruptores S1 y S4, mientras S2 y S3 permanecen abiertos.
- Para generar una tensión negativa ($-V_o$), se cierran S2 y S3, y S1 y S4 permanecen abiertos.
- Para desactivar la salida o generar un estado de tensión cero, se abren los interruptores correspondientes según la tabla de verdad.

Esta configuración permite controlar de manera precisa la dirección de la corriente en la carga y, en combinación con técnicas de modulación por ancho de pulso (PWM), generar una onda sinusoidal aproximada a partir de la tensión DC del convertidor Boost.

2.6.2.b. Filtro LC

El filtro LC está compuesto por un inductor (L) y un capacitor (C). Este elemento se usa en serie-paralelo y su función principal en un inversor de onda sinusoidal es suavizar la forma de onda de la tensión de salida, eliminando los componentes de alta frecuencia generados por la conmutación del puente inversor [24].

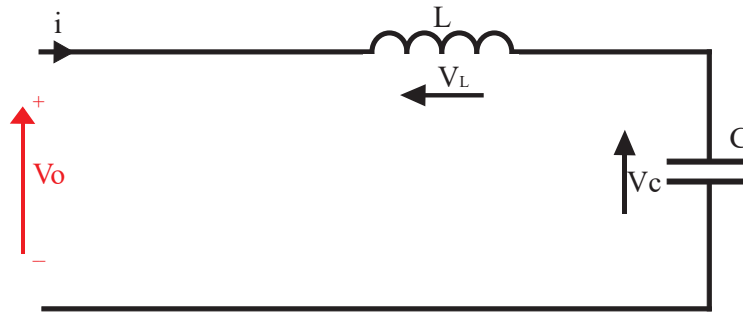


Figura 2.19: Filtro LC (elaboración propia)

De la figura [2.19] se puede obtener la ecuación de tensiones:

$$V_o = V_L + V_C \quad (2.14)$$

y también las leyes de los elementos como:

$$V_L = L \frac{\partial i_L}{\partial t} \quad y \quad i_C = C \frac{\partial V_C}{\partial t} \quad (2.15)$$

Sustituyendo [2.15] en [2.14]:

$$V_o = L \frac{\partial i_L}{\partial t} + V_C$$

Además, considerando que

$$i_L = i_C = C \frac{\partial V_C}{\partial t}$$

Se tiene

$$V_o = LC \frac{\partial^2 V_C}{\partial t^2} + V_C$$

Pasando al plano de Laplace y considerando condiciones iniciales nulas:

$$V_o(s) = LC s^2 V_C(s) + V_C(s) \quad (2.16)$$

Factorizando $V_C(s)$:

$$V_o(s) = V_C(s) (1 + LC s^2) \quad (2.17)$$

La función de transferencia del filtro LC queda:

$$H(s) = \frac{V_C(s)}{V_o(s)} = \frac{1}{1 + LC s^2} \quad (2.18)$$

En términos de la frecuencia natural de resonancia $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$, la función de transferencia se puede expresar como:

$$H(s) = \frac{1}{1 + \frac{s^2}{\omega_0^2}} \quad (2.19)$$

Esta expresión muestra que el filtro LC actúa como un filtro pasa bajos, atenuando los armónicos de alta frecuencia generados por la conmutación del inversor y dejando pasar la componente fundamental de la señal sinusoidal. Los valores de L y C se pueden elegir según las necesidades del sistema.

Capítulo 3

Metodología

3.1. Evaluación preliminar Deshumidificador TTK127E

Previo a la implementación del sistema fotovoltaico y la prueba piloto en la parcela demostrativa, se realizaron mediciones preliminares del deshumidificador TTK127, con el objetivo de evaluar su capacidad de extraer agua bajo distintas condiciones ambientales. Estas pruebas se llevaron a cabo en un entorno no controlado al aire libre. Se efectuaron dos tandas de mediciones: la primera en el patio de alta tensión de la Universidad Técnica Federico Santa María, y la segunda en la ciudad de Taltal, también en exteriores, con el fin de obtener parámetros más representativos para la implementación final.

Durante estas mediciones, se monitorearon de forma continua las variables de interés: humedad relativa, temperatura ambiente y consumo de potencia.

El deshumidificador fue alimentado mediante la red eléctrica (220 V, 50 Hz), y se utilizó el analizador de redes C.A. QA8333 para registrar su consumo energético en distintos momentos del día. Esto permitió obtener una caracterización inicial del equipo, identificando su rendimiento frente a distintos niveles de temperatura y humedad.

A continuación se presentan gráficos de las mediciones los cuales muestran la relación entre las variables monitoreadas y la cantidad de agua generada.

3.1.1. Mediciones universidad

La finalidad de estas primeras mediciones en exterior es evaluar el desempeño del deshumidificador en espacio abierto y temperatura ambiental en un entorno no controlado.

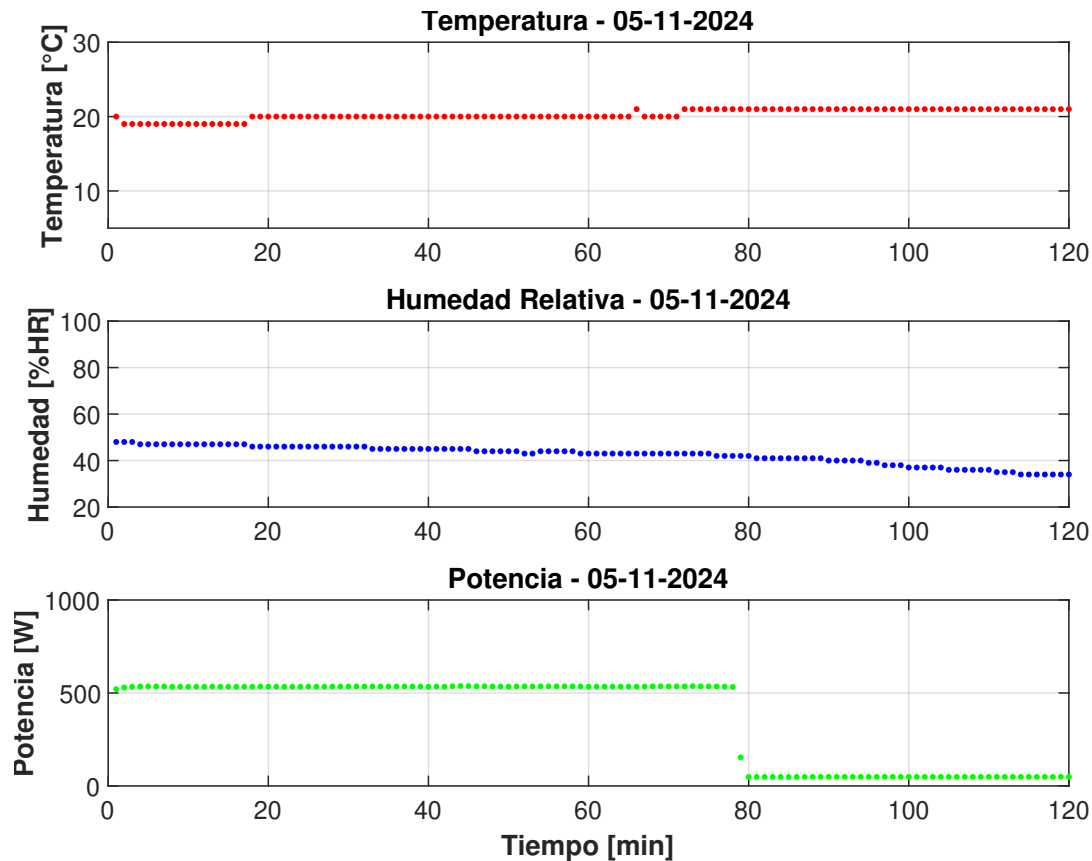


Figura 3.1: Medición 05-11-2024

Generación Total de Agua	600 ml
Tiempo Total Medición	120 minutos
Agua por hora	0.3 L/h
Humedad Inicial	48 % HR
Humedad Final	34 % HR
Temperatura Inicial	20°C
Temperatura Final	21°C
Clima	Parcialmente Nublado

Tabla 3.1: Medición 1

De esta primera medición se observa que en el minuto 80 de la figura [3.1](#) que la potencia en tiempo real del deshumidificador decrece a un valor bajo, por otro lado las condiciones de humedad observadas en la figura muestran como la humedad relativa baja del 40 %, indicando que bajo este porcentaje el deshumidificador deja de operar y por ende de extraer agua del ambiente.

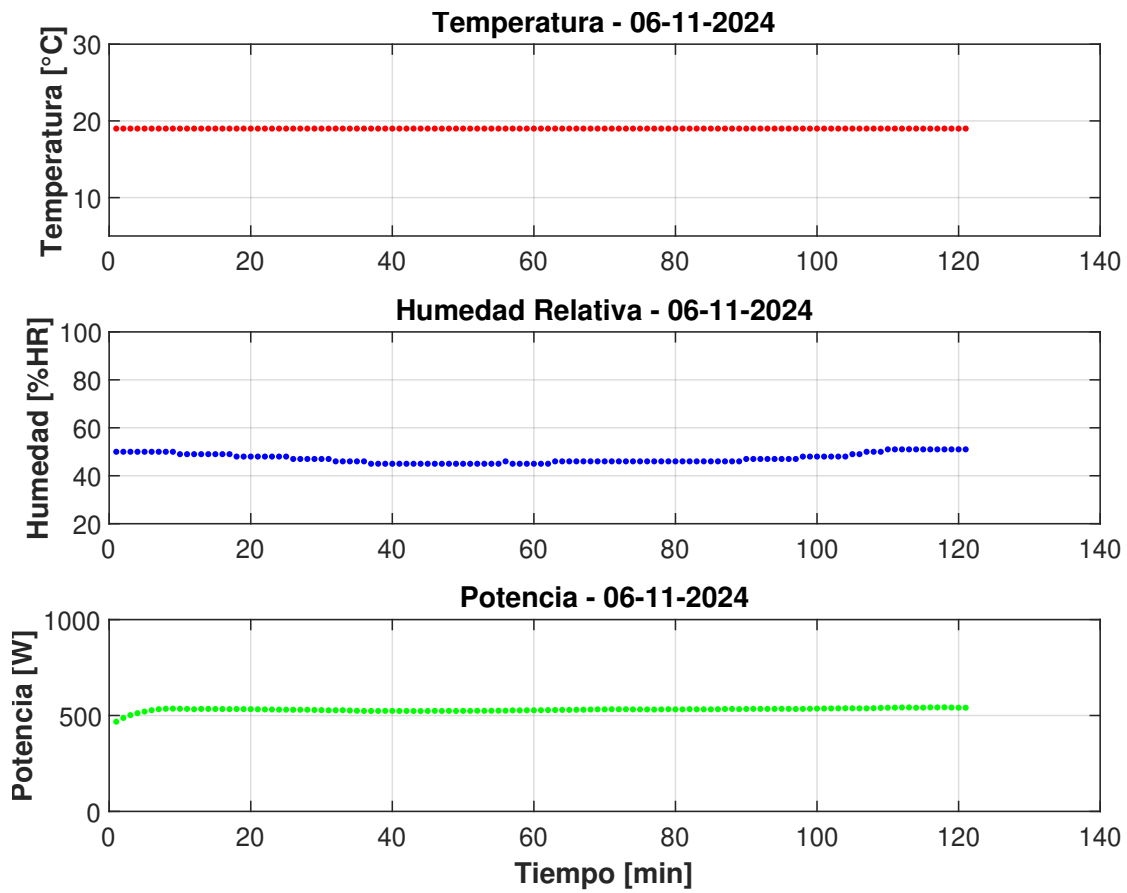


Figura 3.2: Medición 06-11-24

Generación de Agua	1150 ml
Tiempo Total Medición	120 minutos
Agua por hora	0.575 L/h
Humedad Inicial	50 % HR
Humedad Final	51 % HR
Temperatura Inicial	19°C
Temperatura Final	19°C
Clima	Nublado

Tabla 3.2: Medición 2

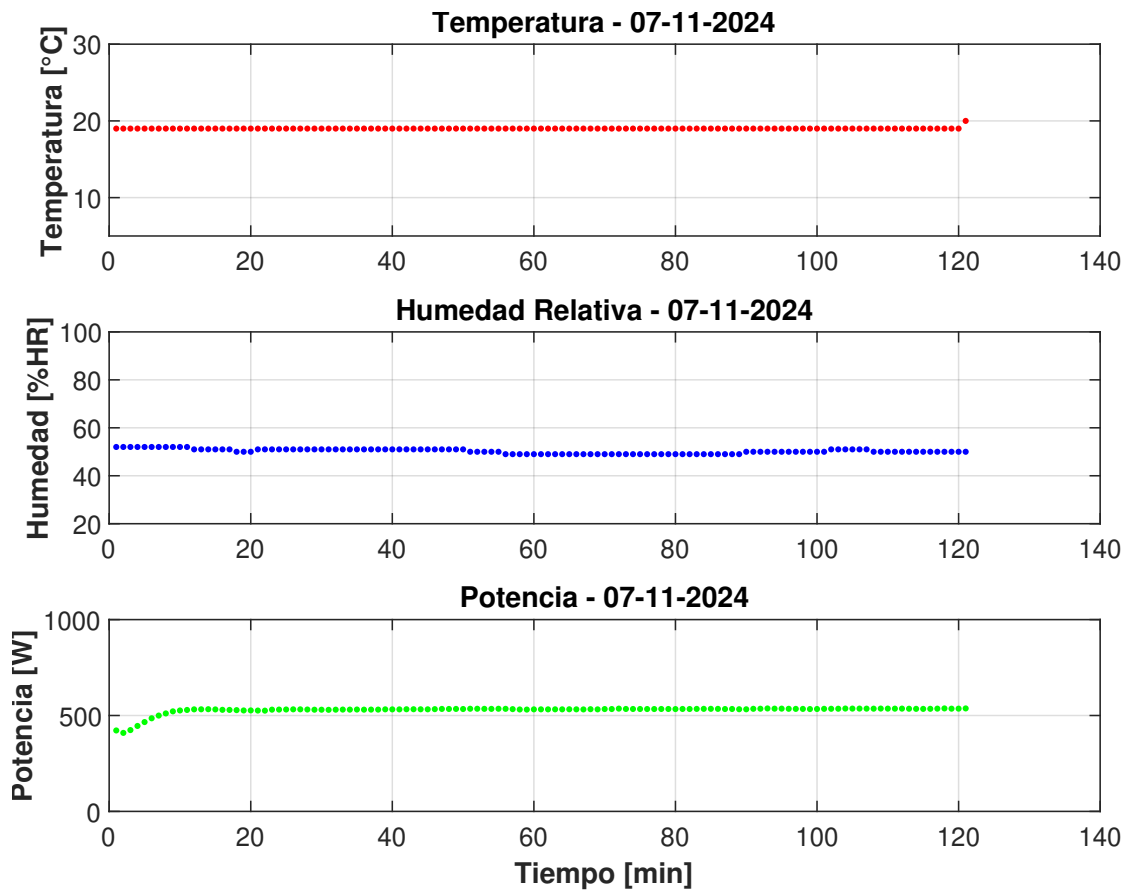


Figura 3.3: Medición 07-11-24

Generación de Agua	1450 ml
Tiempo Total Medición	120 minutos
Agua por hora	0.725 L/h
Humedad Inicial	52 % HR
Humedad Final	50 % HR
Temperatura Inicial	19°C
Temperatura Final	20°C
Clima	Nublado

Tabla 3.3: Medición 3

3.1.2. Mediciones Taltal

Tras la primera ronda de mediciones realizadas en la Universidad Técnica Federico Santa María, se llevaron a cabo pruebas adicionales en la ciudad de Taltal con el objetivo de obtener datos en un entorno más representativo de la implementación final. Estas mediciones se realizaron en condiciones de exterior, expuestas a las variaciones climáticas propias de la zona norte del país, permitiendo evaluar el desempeño del deshumidificador en un ambiente más cercano al de la prueba piloto.

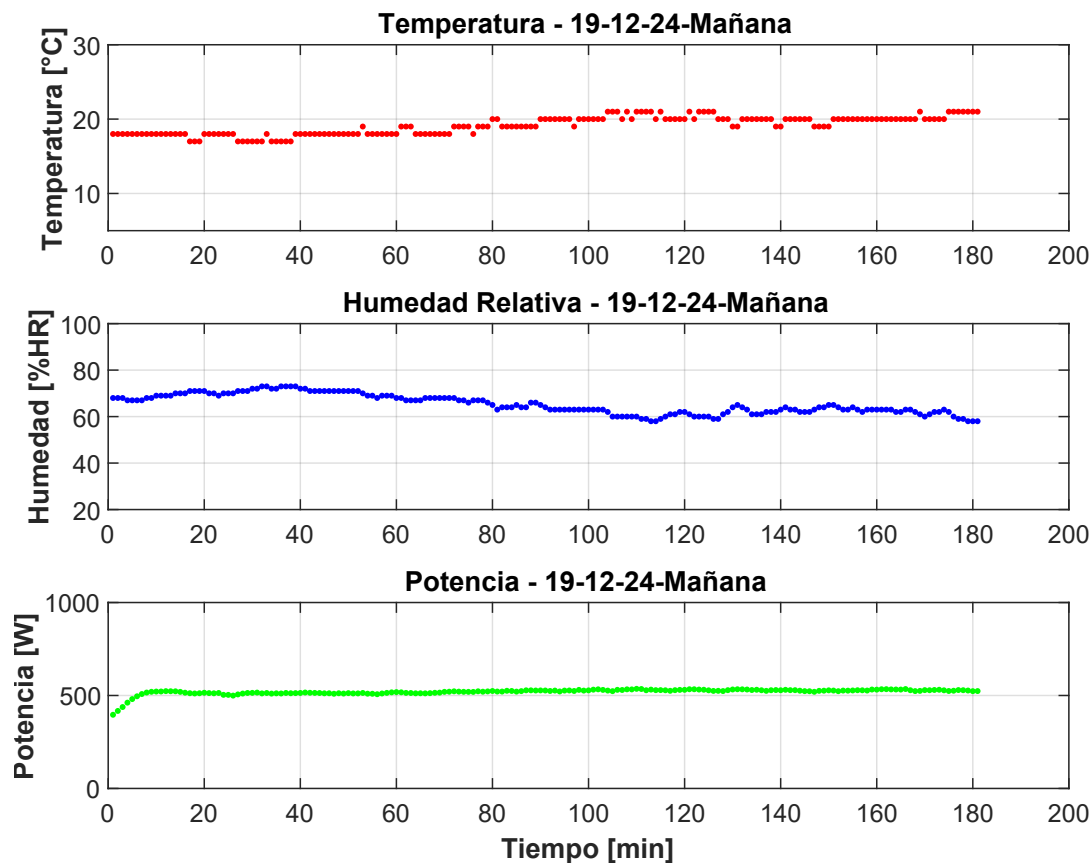


Figura 3.4: Medición 19-12-24 Mañana

Generación de Agua	3200 ml
Tiempo Total Medición	181 minutos
Agua por hora	1.06 L/h
Humedad Inicial	68 % HR
Humedad Final	58 % HR
Temperatura Inicial	18°C
Temperatura Final	21°C
Clima	Nublado

Tabla 3.4: Medición 19-12-24 Mañana

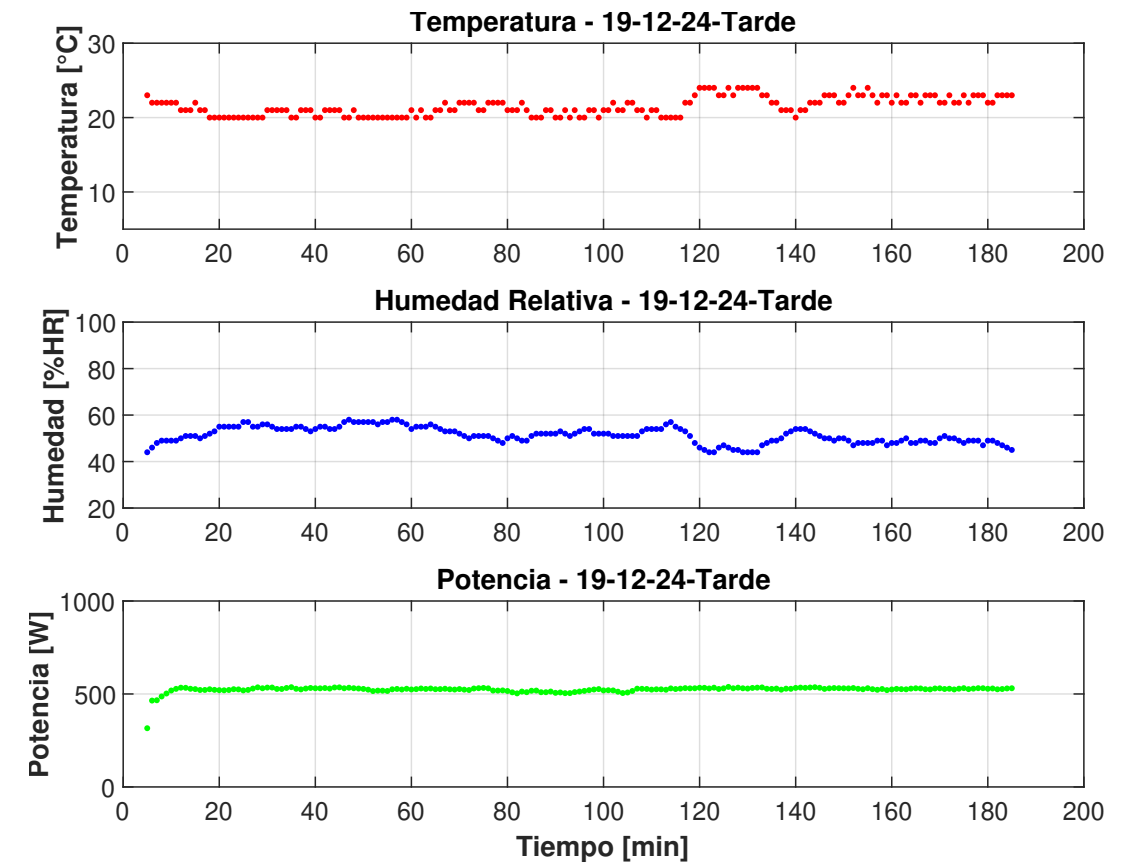


Figura 3.5: Medición 19-12-24 Tarde

Generación de Agua	2800 ml
Tiempo Total Medición	185 minutos
Agua por hora	0.9 L/h
Humedad Inicial	44 % HR
Humedad Final	45 % HR
Temperatura Inicial	23°C
Temperatura Final	23°C
Clima	Soleado

Tabla 3.5: Medición 19-12-24 Tarde

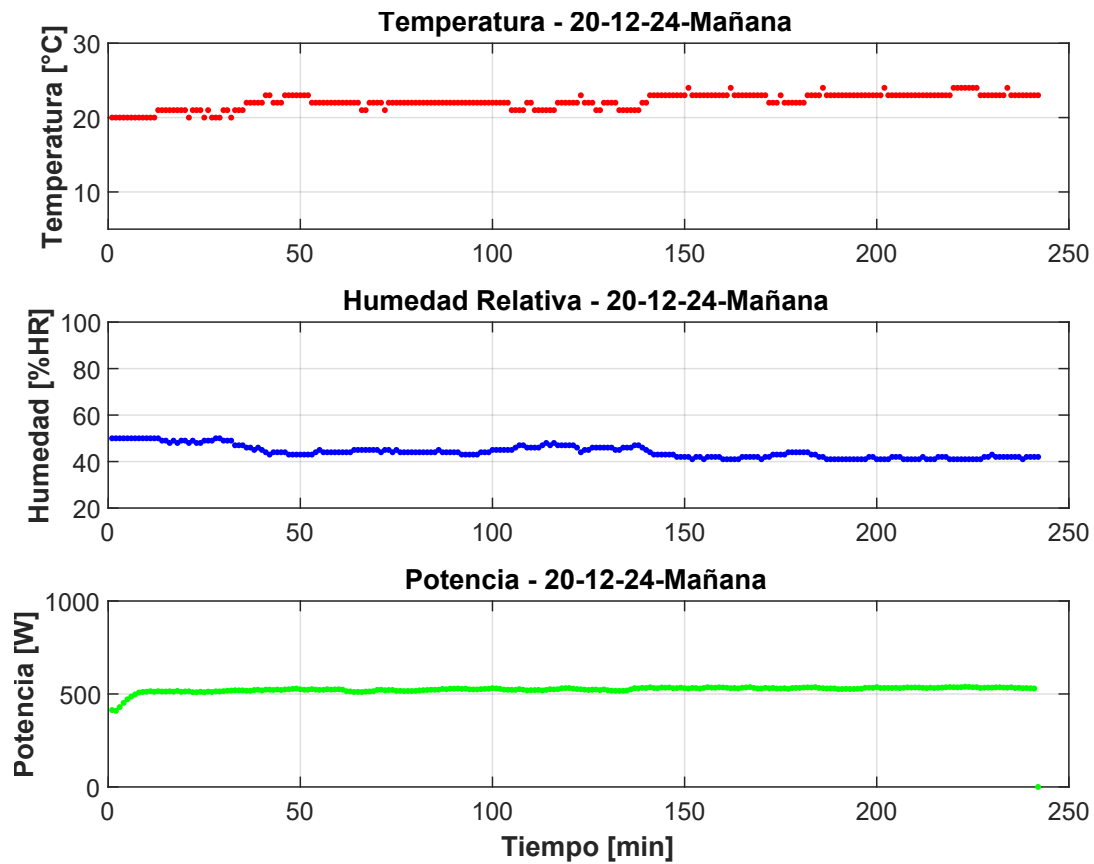


Figura 3.6: Medición 20-12-24 Mañana

Generación de Agua	3200 ml
Tiempo Total Medición	242 minutos
Agua por hora	0.79 L/h
Humedad Inicial	50 % HR
Humedad Final	42 % HR
Temperatura Inicial	20°C
Temperatura Final	23°C
Clima	Soleado

Tabla 3.6: Medición 20-12-24 Mañana

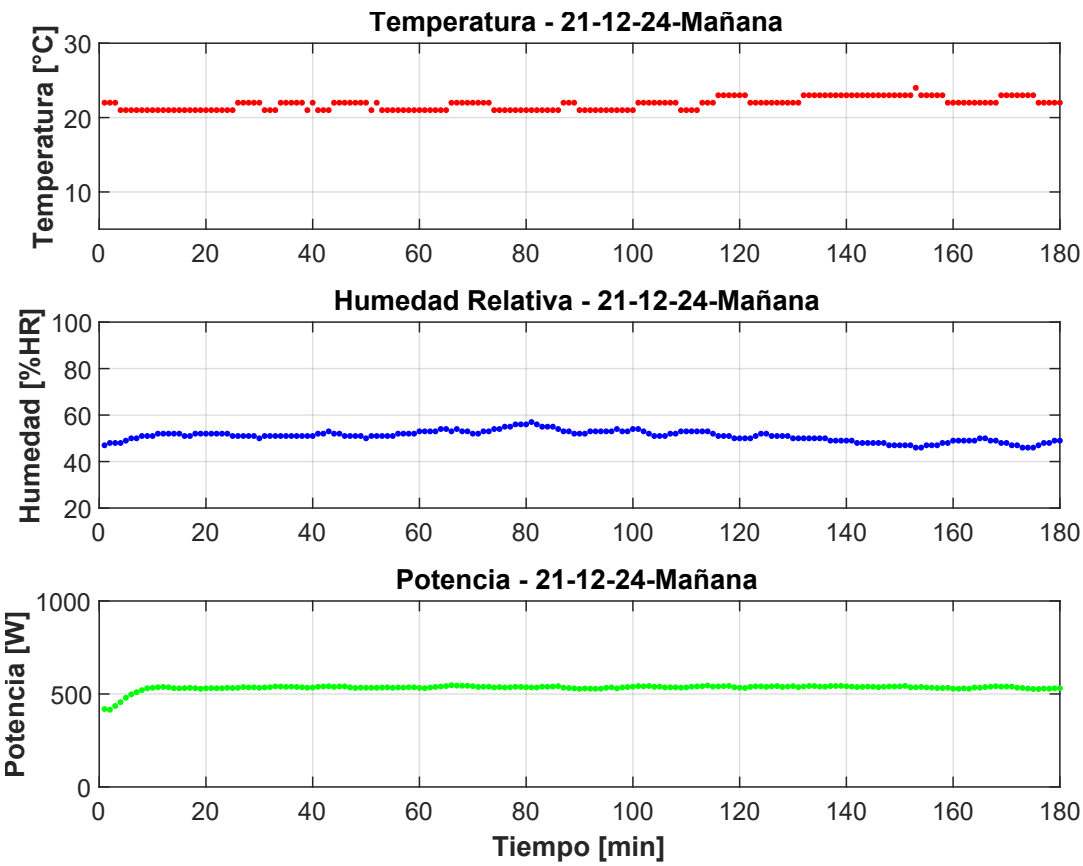


Figura 3.7: Medición 21-12-24 Mañana

Generación de Agua	2900 ml
Tiempo Total Medición	180 minutos
Agua por hora	0.96L/h
Humedad Inicial	47 % HR
Humedad Final	49 % HR
Temperatura Inicial	22°C
Temperatura Final	22°C
Clima	Soleado

Tabla 3.7: Medición 21-12-24 Mañana

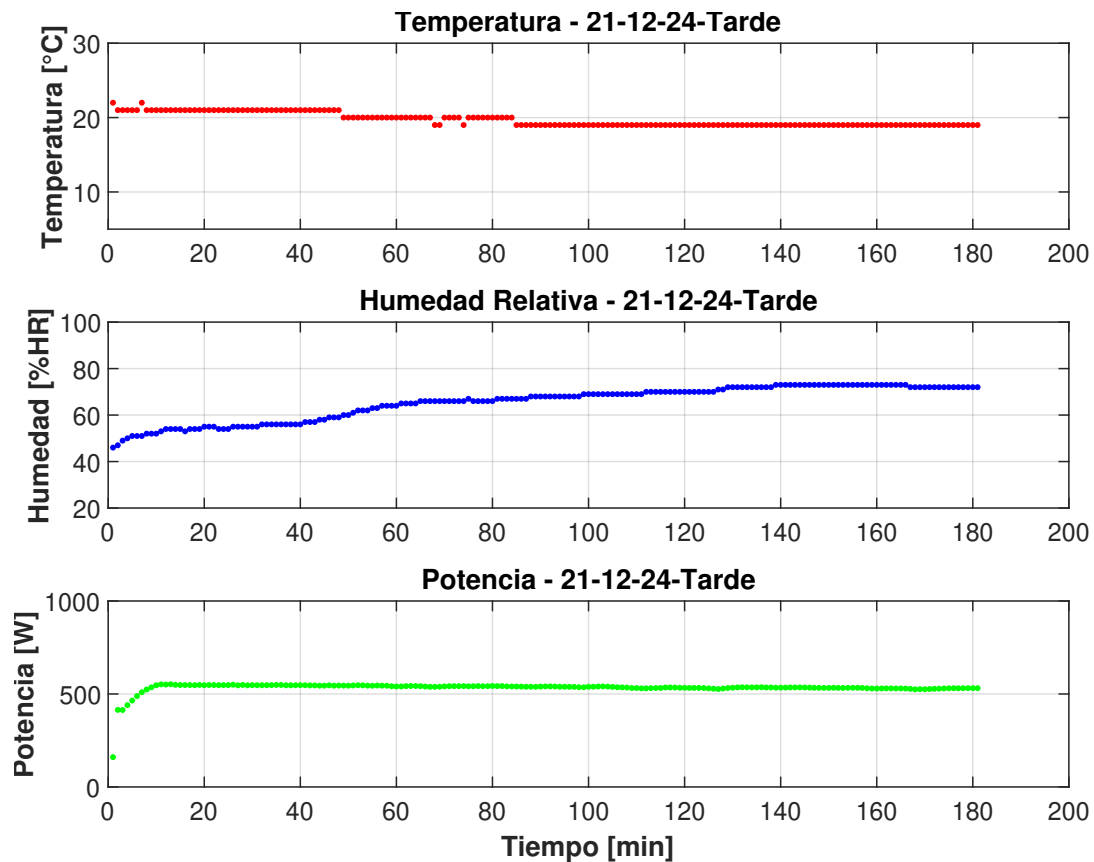


Figura 3.8: Medición 21-12-24 Tarde

Generación de Agua	3400 ml
Tiempo Total Medición	181 minutos
Agua por hora	1.12 L/h
Humedad Inicial	46 % HR
Humedad Final	72 % HR
Temperatura Inicial	22°C
Temperatura Final	19°C
Clima	Soleado

Tabla 3.8: Medición 21-12-24 Tarde

3.2. Propuesta de solución

El clima árido y la baja precipitación acumulada en Taltal, con periodos largos sin lluvias y solo algunos meses de precipitación esporádica indican que la captación de agua lluvia no es una solución viable para la agricultura. Sin embargo, las temperaturas moderadas y la alta presencia de humedad ambiental viene siendo clave para proponer un sistema que sea capaz de captar la humedad del ambiente y convertirla en agua apta para regadío, es por eso que como solución se propone un sistema de deshumidificación ambiental.

3.3. Descripción e implementación del sistema propuesto

Para la alimentación del sistema piloto se utilizará un sistema fotovoltaico off grid, el cual está diseñado para funcionar de forma autónoma sin conexión a la red eléctrica. Este sistema está compuesto por el inversor cargador Aexpert VP de 3000W de onda pura con controlador PWM, tres paneles solares policristalinos de 285W cada uno conectados en paralelo y 4 baterías de 100ah 12V de ciclo profundo.

A la salida AC del inversor se incorpora un sistema de protección compuesto por un interruptor diferencial de 30mA y un interruptor termomagnético de 16A. Por otro lado, la carga del sistema está representada por un computador junto a un centro de control y un sensor de humedad y temperatura y un analizador de redes.

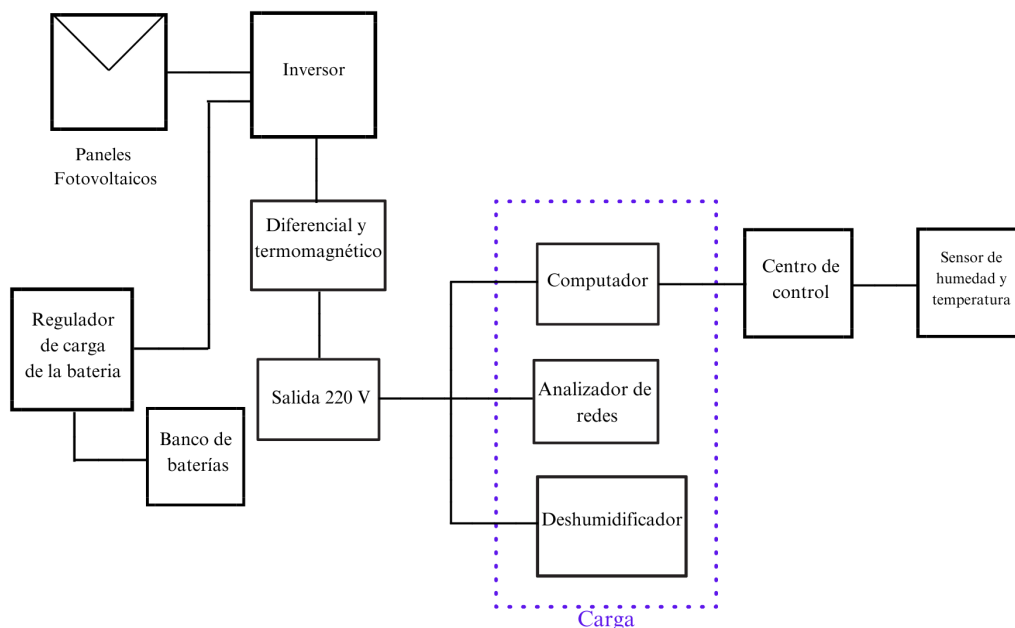


Figura 3.9: Layout del sistema experimental

Como se aprecia en la figura 3.9 el sistema propuesto permite evaluar en condiciones reales el comportamiento energético del deshumidificador alimentado por energía solar, así como realizar el registro y análisis de variables eléctricas y ambientales relevantes para el proyecto.

3.4. Metodología mediciones piloto

Para validar el funcionamiento del sistema piloto, se desarrolló un esquema de medición experimental con enfoque en dos líneas: el comportamiento ambiental (temperatura y humedad relativa) y el comportamiento energético del sistema (potencia eléctrica demandada por el deshumidificador).

El sistema fotovoltaico, compuesto por el inversor, el banco de baterías y los paneles se dispuso al interior de la cabaña y en el techo de la misma, respectivamente, mientras que el deshumidificador se ubicó en el exterior bajo sombra, junto con el sensor de temperatura y humedad y el analizador de redes portátil. En este escenario de operación el quipo estuvo expuesto a las condiciones climáticas del entorno.

Considerando el desempeño del DHT11 durante la primera ronda de mediciones, tanto en la Casa Central de la Universidad Técnica Federico Santa María como en la localidad de Taltal y teniendo en cuenta los factores ambientales más críticos del norte del país, se optó por reemplazarlo.

Sensor	DHT11	SHT31
Rango de temperatura $^{\circ}C$	0 - 50	-40 - 125
Rango de humedad	20 - 90 % HR	0 - 100 % HR
Precisión	2 $^{\circ}C$ // 5 % HR	0.3 $^{\circ}C$ // 2 % HR
Resolución	8 bit	14 bit
Precio	\$ 2.300	\$ 7.990

Tabla 3.9: Comparación entre SHT31 y DHT11

Como se aprecia en la tabla [3.9](#) se realizó una comparación entre sensor DHT11 y el sensor SHT31, ambos compatibles con el centro de control Arduino UNO. La elección se fundamentó en su mayor precisión, resolución y rango de medición, lo que resulta fundamental para caracterizar de manera confiable la temperatura y la humedad relativa. Para la toma de datos se enlazó a un computador portátil y la toma de datos se realizó mediante excel de forma automática gracias a la herramienta de transmisor de datos.

De forma paralela, se continuó usando el analizador de redes QA 8333 portátil. Este equipo se conectó en paralelo al deshumidificador para registrar la tensión de entrada y, adicionalmente, se instaló una pinza de corriente en el conductor de fase, permitiendo así obtener valores de corriente y tensión en rms y el resto del perfil de la red, logrando así registrar el consumo de potencia del deshumidificador durante distintas condiciones de operación. El analizador de redes cuenta con memoria interna, por lo que una vez terminada la medición, los datos se descargaron posteriormente a través del software Dataview para su análisis.

Las mediciones se realizaron en los meses de junio y julio de 2025, tanto de día como de noche. En cada medición se registraron las variables ambientales y energéticas en varios rangos de horas, definido este por las condiciones ambientales y disponibilidad del recurso solar. El intervalo de muestreo se estableció en un minuto, buscando un equilibrio entre la captura de variaciones en parámetros ambientales y la generación de bases de datos manejables. Al final de cada sesión se midió manualmente el volumen de agua recolectada en litros, lo que permitió complementar la información obtenida.

3.5. Sistema de riego automatizado

3.5.1. Alimentación energética del sistema de riego

Para alimentar de manera autónoma el sistema de riego se utilizó un kit fotovoltaico de 10 W, diseñado para aplicaciones de bajo consumo energético en zonas sin acceso a red eléctrica convencional y se usa principalmente para alimentar alarmas. Este kit está compuesto por:

- Panel solar 10Wp
- Controlador de carga básico de 12V/24V
- Batería de 12V 7Ah.



Figura 3.10: Kit fotovoltaico 10W con controlador de carga y batería

El panel solar permite captar la radiación solar y transformarla en energía eléctrica en corriente continua, mientras que el controlador de carga regula la energía proveniente del panel hacia la batería, evitando sobrecargas o descargas profundas. Este controlador es básico y no posee pantalla digital, solo tiene una entrada positiva y negativa para los cables del panel, una entrada positiva y negativa para la carga de la batería, una salida positiva y negativa de la batería y también una salida USB de 5V, como se observa en la figura [3.10](#). La batería asegura el suministro energético continuo, incluso en horas sin radiación solar, lo que permite seguir monitoreando la humedad del cultivo.

Este pequeño kit fotovoltaico permitió independizar energéticamente al sistema de riego del resto de la instalación de deshumidificación y generación fotovoltaica principal, garantizando así su funcionamiento autónomo.

3.5.2. Centro del control

Para el sistema de control del riego automatizado se utilizó el microcontrolador ESP32-Wroom-32, desarrollado por Espressif Systems. Esta plataforma de control cuenta con conectividad Wi-Fi y Bluetooth integrada, lo que permite la posibilidad de que el sistema se comuniquen de forma inalámbrica con una plataforma de monitoreo remoto, facilitando el registro de datos y la eventual automatización basada en condiciones ambientales.

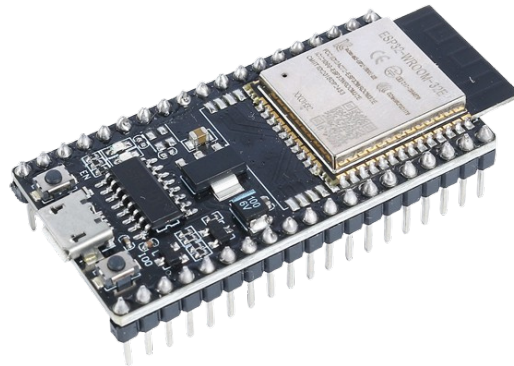


Figura 3.11: ESP32-WROOM-32

Otra ventaja significativa es su bajo consumo energético, especialmente en modos de operación como el deep-sleep, lo cual lo hace adecuado para ser alimentado por un sistema fotovoltaico. Además, el ESP32 cuenta con una mayor capacidad de procesamiento, memoria y número de pines GPIO que el Arduino UNO, lo que permite conectar múltiples sensores y manejar tareas concurrentes como adquisición de datos, control de actuadores y comunicación inalámbrica sin comprometer el rendimiento.

Característica	Arduino Uno	ESP32-WROOM-32
Microcontrolador	ATmega328P	Tensilica Xtensa dual-core 32-bit LX6
Frecuencia de reloj	16MHz	Hasta 240MHz
Memoria RAM	2KB	520KB SRAM interna
Memoria flash	32KB	4MB (externa)
Conectividad inalámbrica	No integrada	Wi-Fi y Bluetooth integrados
Número de pines GPIO	14 digitales, 6 analógicos	Hasta 34 GPIOs configurables
Capacidad para monitoreo remoto	Requiere hardware adicional (Wi-Fi o GSM) y PC para enviar datos	Puede conectarse directamente a plataformas IoT sin PC
Consumo energético	Bajo, no configurable	Bajo, con modos de sueño profundo
Facilidad para sistemas autónomos	Necesita módulos externos para conectividad	Puede tomar y enviar datos sin intermediarios

Tabla 3.10: Comparación entre Arduino Uno y ESP32-WROOM-32

3.5.3. Medición humedad de suelo

Para la medición de humedad del suelo se usó el sensor de humedad capacitivo, el cual es compatibles con la placa ESP32. La inclusión de ambos dispositivos tiene como objetivo generar una comparación directa en condiciones reales de operación, lo que permite validar lecturas, evaluar la estabilidad de los sensores y analizar su sensibilidad frente a variaciones de salinidad, textura y humedad del suelo.



Figura 3.12: Sensor capacitivo

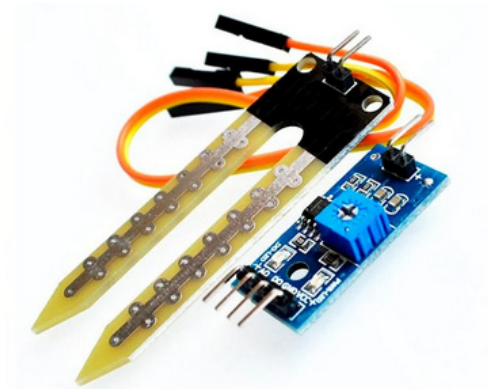


Figura 3.13: Sensor resistivo

Esta estrategia permitió realizar una validación cruzada de datos y reducir la incertidumbre en las mediciones. Asimismo, sienta las bases para una futura caracterización y calibración más precisa, lo que es clave en sistemas de monitoreo ambiental que buscan entregar información confiable para la toma de decisiones en el riego. Aunque el sensor resistivo es más económico, su durabilidad es limitada debido a la corrosión de sus electrodos. El sensor capacitivo, en cambio, ofrece lecturas más estables y consistentes, siendo más adecuado para aplicaciones de largo plazo. Esta comparación permitirá determinar la conveniencia de su uso según el tipo de suelo y las condiciones climáticas presentes.

3.5.4. Sensor de luminancia

Según datos del INIA contenidos en el Boletín N° 392, obtenidos desde la estación agrometeorológica “La Cachina” (ubicada a 300 metros de la parcela demostrativa en Taltal), la evapotranspiración potencial diaria sigue un patrón horario muy definido: se incrementa progresivamente desde las primeras horas del día, alcanza su punto máximo entre las 12:00 y las 15:00 horas (con valores que pueden superar los 0,3 mm/h), y desciende bruscamente durante la tarde [9], alcanzando valores cercanos a cero en la noche. Esta dinámica confirma que el riego durante el día conlleva pérdidas significativas de agua por evaporación, mientras que el riego nocturno permite una mayor eficiencia hídrica.

Considerando esto, se incorporó un sensor de luminancia al sistema monitoreo, con el objetivo de condicionar la apertura de la electroválvula exclusivamente durante la noche o en momentos de baja radiación solar. Se utilizó el sensor GY-302, basado en el fotodiodo digital BH1750, el cual entrega mediciones de iluminancia en lux.

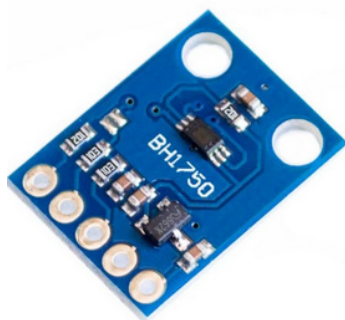


Figura 3.14: GY-302 Sensor BH1750

El uso del sensor de luminancia permite automatizar el riego en función de las condiciones ambientales, evitando el riego en momentos de alta radiación y maximizando la eficiencia del uso del recurso hídrico en contextos de escasez, como los observados en Taltal.

3.5.5. Electrovalvula solenoide

El control del flujo de agua en el sistema se realizó mediante una electroválvula solenoide de 12V DC, la cual opera en condición normalmente cerrada, permitiendo la apertura únicamente cuando recibe la señal eléctrica correspondiente.



Figura 3.15: Electrovalvula solenoide

Las principales características técnicas de esta válvula son:

- Tensión de operación: 12V DC
- Consumo de potencia: 8W (0.6 A nominal)
- Precisión de trabajo: entre 0,02MPa (0,2bar) y 0,8MPa (8bar), compatible con sistemas de riego por goteo.
- Temperatura de operación: entre 1 y 75.
- Tiempo de respuesta: $0,15 < t < 0,3$ entre apertura y cierre, respectivamente.
- Conexión hidráulica: rosca externa de 1/2" NPS macho.
- Estado de reposo: Normalmente cerrada.

El material de fabricación es plástico de alta resistencia, adecuado para el manejo de agua en aplicaciones agrícolas. Su diseño permite un control confiable del paso de agua, asegurando que el riego se produzca únicamente cuando las condiciones de humedad y luminosidad entregadas por el centro de control sean suficientes.

3.5.6. Monitoreo online de datos

El sistema de riego automatizado fue diseñado con capacidad de monitoreo y control remoto, utilizando la conectividad Wi-Fi integrada del microcontrolador ESP32-Wroom-32. Para habilitar esta función en un entorno sin acceso a red fija, se utilizó un hotspot móvil permanente, lo que permitió establecer una conexión inalámbrica continua entre el microcontrolador y la plataforma en la nube.

Para la visualización de datos y el control remoto se empleó la plataforma Blynk, una herramienta que permite crear interfaces personalizadas para dispositivos IoT. Mediante esta aplicación se configuró un panel virtual accesible desde un teléfono móvil, a través del cual se pueden visualizar en tiempo real las variables ambientales medidas por los sensores, las cuales corresponden a humedad del suelo y luminosidad.

Además del monitoreo, la plataforma Blynk permitió implementar control manual o automático del sistema de riego, específicamente mediante la activación o desactivación de una electroválvula, que regula el paso de agua hacia los cultivos. Esta válvula es comandada por el ESP32 a través de una señal digital, y puede ser activada automáticamente cuando se cumplen ciertas condiciones (por ejemplo, humedad del suelo por debajo de un umbral y baja luminosidad), o bien, ser activada manualmente por el usuario desde la aplicación móvil.

Este sistema de monitoreo y control online no solo facilita la operación del sistema de riego desde ubicaciones remotas, sino que además permite registrar el comportamiento ambiental del sitio de instalación, generando una base de datos que puede ser utilizada posteriormente para ajustar los parámetros de riego o analizar el desempeño del sistema.

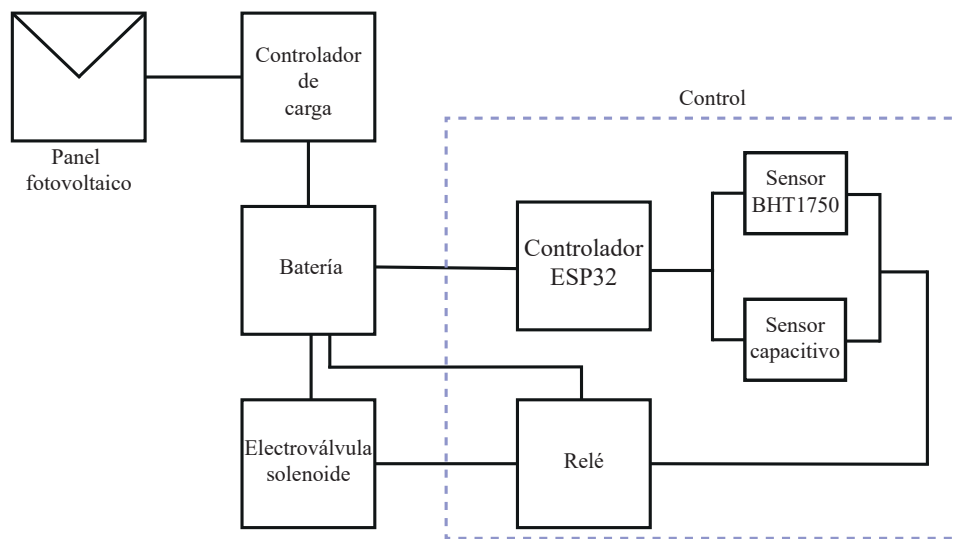


Figura 3.16: Layout sistema de riego automatizado

3.5.7. Puesta en marcha del sistema

Considerando que la potencia máxima registrada del deshumidificador durante las pruebas realizadas tanto en las dependencias de la universidad como en la etapa preliminar en Taltal no superó los 600W, se dimensionó un sistema fotovoltaico off-grid capaz de entregar al menos 800W. Esto permite asegurar el funcionamiento del equipo.

El sistema diseñado está compuesto por un inversor cargador de 3000W, tres paneles solares policristalinos de 285W cada uno, y un banco de baterías de ciclo profundo de 24V compuesto por cuatro unidades conectadas en serie-paralelo.

Elemento	Modelo	Parámetros eléctricos	Cantidad
Inversor cargador	Axpert VP	3000W, 24V, onda senoidal pura	1
Paneles fotovoltaicos	Poly-crystalline Series 285W	285W, 31.96V, 8.92A	3
Banco de baterías	Nimac ciclo profundo	100Ah, 12V (conexión serie)	4

Tabla 3.11: Especificaciones del kit fotovoltaico

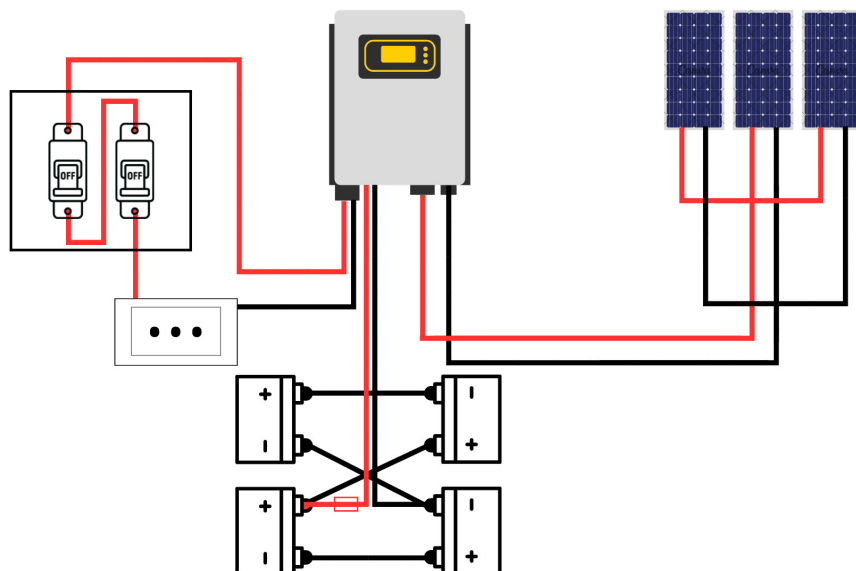


Figura 3.17: Esquema de conexión del sistema fotovoltaico off-grid

El sistema fotovoltaico se instaló en la parcela experimental destinada al piloto, específicamente en una cabañana desocupada que se encontraba en el terreno. Se aprovechó la inclinación preexistente del techo para poner estructuras de sujeción coplanares para los paneles, garantizando los 30° óptimos para la zona según el explorador solar.

Este sistema fotovoltaico está destinado de forma exclusiva para alimentar el deshumidificador. Dado que es una instalación del tipo off grid, no es necesario mantener la tensión a 220V, por lo que se trabajó con la salida de tensión propia del inversor, la cual fue de 230V y está dentro del margen de operación del deshumidificador según la tabla [2.7](#).

Además, se incorporaron tres protecciones para el sistema: un fusible para el banco de las baterías y dos interruptores en la salida de corriente alterna del inversor para resguardar la instalación y el equipo conectado. Estas fueron:

- Fusible Midi 150A 32V, dispuesto en el terminal positivo del banco de baterías.
- Interruptor Diferencial Standford Tipo AC 2x25A 30mA, destinado a proteger a los usuarios frente a posibles fugas de corriente.
- Interruptor termomagnético de 16A Curva C, a continuación del diferencial, que protege ante sobrecargas o cortocircuitos.

El orden de instalación (diferencial seguido por termomagnético) se eligió para asegurar que, ante una falla a tierra, el corte sea inmediato y con menor riesgo para las personas.

A continuación, se muestran fotografías de la instalación final:



Figura 3.18: Paneles montados sobre el techo de la cabaña



Figura 3.19: Inversor y banco de baterías instalados

La implementación del sistema de riego automatizado se llevó a cabo interviniendo en la malla de riego de la parcela demostrativa. El panel fue instalado en el techo del estanque de acumulación de agua, con orientación noroeste y sin inclinación, aprovechando la infraestructura existente de la red de riego por goteo.

El conexionado eléctrico se realizó de la siguiente forma:



Figura 3.20: Controlador de carga



Figura 3.21: Panel fotovoltaico 10 W

- Salida USB 5V de controlador de carga se conectó directamente a la ESP32, centro de control encargado de la adquisición de datos y del accionamiento inteligente de la electroválvula.
- Salida de la batería de 12V se conectó a la electroválvula solenoide, a través de un relé de 3.3V, accionado por la señal proveniente de la ESP32 cuando las condiciones fueran cumplidas.

Por otro lado, el sistema de control quedó definido bajo la siguiente lógica:

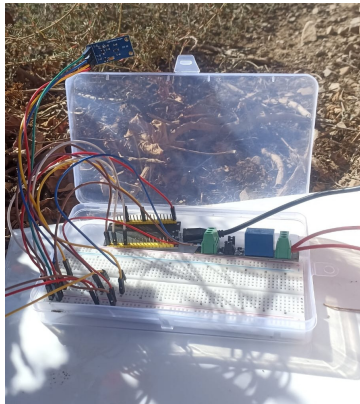


Figura 3.22: Conexión sistema de control y sensor de iluminación



Figura 3.23: Electrovalvula y sensor de humedad capacitivo

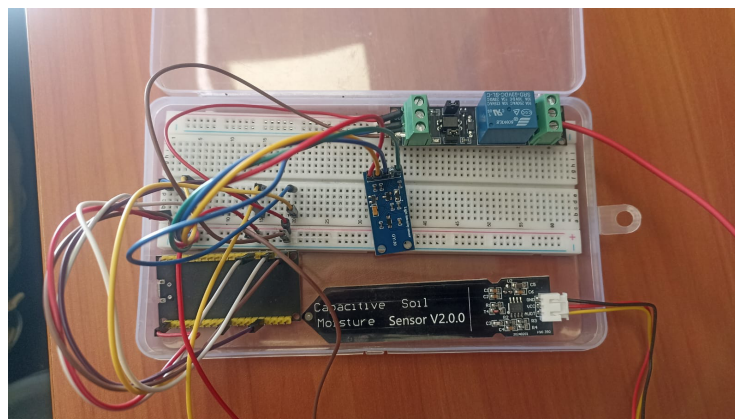


Figura 3.24: Vista completa protoboard

- Sensor de humedad de suelo [3.15](#), conectado al GPIO 35, con un umbral inferior del 30 % de humedad en suelo.
- Sensor BH1750 de iluminancia [3.22](#): Conectado SDA al GPIO 21 y SCL al GPIO 22, con un umbral de 20 lux.
- Relé 3.3V, conectado al GPIO 26, con configuración normalmente abierto, cuando se da la señal y tanto el umbral de iluminancia como el de humedad cumplen los límites, se acciona cerrando el circuito y alimentando la electroválvula.

El riego se activa cuando es de noche, es decir la iluminancia es menor a 20 lux y cuando la humedad del suelo es baja. Durante la validación de la puesta en marcha del sistema de riego, se observó que el sensor resistivo de humedad de suelo presentaba lecturas erráticas y tiempos de respuesta elevados, por lo que fue descartado en favor del sensor capacitivo, el cual es más confiable para mediciones en terreno. El montaje se realizó sobre una protoboard, como se observa en la figura [3.15](#) utilizando las líneas de alimentación de 5V y GND de la ESP32 conectadas al positivo y negativo de la protoboard para la alimentación de los sensores.



Figura 3.25: Sensor BH1750 con sol directo



Figura 3.26: Medición Blynk sensores con sol directo



Figura 3.27: Sensor BH1750 con sombra forzada



Figura 3.28: Medición Blynk sensores con sombra forzada

La prueba piloto se mantuvo en operación durante tres días, confirmando el correcto funcionamiento de la integración entre el sistema fotovoltaico, los sensores y la electroválvula, además de corroborar que funcionaba tanto la operación manual de la electroválvula como el monitoreo de datos desde la plataforma online de IoT Blynk, como se puede ver en las figuras [3.26](#) y [3.28](#) donde se observa como varía la iluminancia del sensor BH1750 al dejarlo al sol directo y al taparlo para provocar una "sombra de día", la cual debe tener una medida distinta a la oscuridad de la noche. Se verificó además la operación programada cuando las condiciones de luminancia y humedad lo permitían. Posterior a las pruebas de funcionamiento del sistema de riego, los componentes fueron retirados por razones de seguridad, restableciendo la antigua llave manual de paso del sistema de riego.

Capítulo 4

Mediciones y Resultados

4.1. Mediciones y resultados

Las mediciones experimentales del sistema piloto instalado en la parcela demostrativa fueron realizadas durante los meses de invierno, junio y julio, con la finalidad de evaluar el rendimiento del sistema piloto en condiciones adversas, con las temperaturas e irradiancia más baja del año. Este enfoque permitió someter el prototipo a escenarios de operación menos favorables, con la finalidad de obtener una versión realista y exigente de su rendimiento.

Estas mediciones se dividieron en dos tipos: diurnas y nocturnas, las cuales se especifican a continuación:

- Mediciones diurnas: El sistema funcionó con energía solar directa, siendo alimentado de manera continua por el sistema fotovoltaico off grid.
- Mediciones nocturnas: La operación se sostuvo únicamente gracias a la energía previamente almacenada en las baterías, lo que permitió evaluar tanto la autonomía del sistema como el desempeño bajo menores temperaturas y mayores humedades relativas.

Durante estas jornadas experimentales se registraron de forma continua a intervalos de un minuto las variables de temperatura, humedad y potencia, con plataforma de control Arduino UNO más el sensor SHT31 de temperatura y humedad y el analizador de redes QA. 8333 para la caracterización eléctrica. Además al final de cada medición se registró el total de agua recolectada y el tiempo total de operación el sistema.

4.1.1. Mediciones diurnas

Las mediciones diurnas se realizaron en un rango horario entre las 10:00 y las 17:00 horas, lo que corresponde a la franja de mayor disponibilidad de radiación solar. Sin embargo, debido a las características climáticas propias de la zona costera desértica, las primeras horas del día presentaron nubosidad y baja irradiancia, lo que limitó la operación en franjas previas.

En general, las pruebas realizadas durante el día mostraron temperaturas ambientales significativamente más altas que las observadas en los ensayos nocturnos. No obstante, este incremento en temperatura se acompañó de una disminución en la humedad relativa, lo que condicionó la tasa de condensación de agua. Así, el sistema debió operar en un equilibrio entre mayor energía disponible por radiación solar y menor contenido de humedad en el aire.

Fecha	Temperatura (°C)	Humedad Relativa (%)	Minutos de Operación	Agua Total (L)	Agua por hora (L/h)
02-06-25	14.59 - 17.36	64.22 - 71.66	112	1.6	0.86
03-06-25	12.94 - 21.9	52.76 - 76.28	181	2.25	0.75
04-06-25	14.75 - 20.8	53.78 - 68.97	264	3.5	0.80
05-06-25	13.54 - 15.16	73.27 - 79.73	94	1.05	0.67
07-06-25	14.66 - 22.5	51.50 - 74.05	301	4.1	0.82
10-06-25	15.78 - 25.76	39.89 - 68.95	134	1.75	0.78
16-06-25	13.91 - 25.16	40.70 - 68.48	344	4.95	0.86
17-06-25	13.4 - 22.5	42.49 - 78.36	254	4.05	0.96
18-06-25	13.62 - 22.54	48.31 - 76.33	240	3.7	0.93

Tabla 4.1: Resumen de mediciones diurnas con duración en minutos y tasa de recolección de agua

Como puede observarse en el Cuadro 4.1, los volúmenes de agua recolectados durante las jornadas diurnas fueron variables, con un mínimo de 1.05 L y un máximo de 4.95 L en un periodo de operación cercano a 6 horas. Se aprecia que los días con mayor amplitud térmica y menores humedades relativas tendieron a generar mayores volúmenes, lo cual concuerda con la lógica de operación del deshumidificador, que requiere un diferencial de temperatura suficiente para la condensación del agua.

4.1.2. Mediciones nocturnas

Las mediciones nocturnas se realizaron con el sistema alimentado únicamente por la energía almacenada en las baterías durante el día. Esto permitió analizar la autonomía energética del prototipo en periodos sin sol, así como el efecto de las condiciones nocturnas sobre la eficiencia de la extracción.

En este caso, la temperatura ambiental fue considerablemente más alta que en las mediciones diurnas, pero la humedad relativa aumentó en promedio en más de un 10 %, alcanzando valores cercanos al 85 %. Este escenario fue favorable para la producción de agua, ya que el aire más frío y húmedo incrementa la cantidad de condensación.

Fecha	Temperatura (°C)	Humedad Relativa (%)	Minutos de Operación	Agua Total (L)	Agua por hora (L/h)
11-06-25	14.49 - 15.51	77.36 - 83.37	66	1.125	1.03
12-06-25	12.16 - 15.06	68.01 - 81.01	170	2.52	0.89
17-07-25	11.00 - 12.43	79.12 - 85.21	110	1.2	0.65
19-07-25	11.16 - 12.87	74.89 - 81.87	142	1.3	0.55

Tabla 4.2: Resumen de mediciones nocturnas con duración en minutos y tasa de recolección de agua

Los resultados, resumidos en el Cuadro 4.2, muestran volúmenes de agua recolectados entre 1.125 L y 2.52 L, con periodos de operación algo más extensos que en el caso diurno. Aunque los volúmenes absolutos son menores respecto de los mejores días de prueba con radiación directa, se destaca que el sistema logró mantener un funcionamiento estable y

continuo sin depender de la irradiancia, lo que valida la integración del banco de baterías como respaldo energético.

4.1.3. Mediciones de operación continua en exterior con una red estable

Además de las pruebas en la parcela demostrativa, se realizaron ensayos de operación continua en condiciones controladas de red estable, con el fin de aislar las variables ambientales y observar el comportamiento del deshumidificador en ciclos completos de llenado del estanque interno.

Se llevaron a cabo cuatro mediciones, dos diurnas y dos nocturnas, con el objetivo de comparar directamente la tasa de producción en ambos escenarios. En todos los casos, el volumen máximo obtenido fue de 6 L, correspondiente a la capacidad del tanque interno, lo que implica que el sistema mantuvo un ritmo de extracción constante hasta alcanzar dicho límite.

Fecha	Temperatura (°C)	Humedad Relativa (%)	Minutos de Operación	Agua Total (L)	Agua por hora (L/h)
12-08-25	13.92 - 22.88	53.93 - 84.10	374	6	0.96
13-08-25	13.57 - 25.16	47.25 - 82.29	429	6	0.84
13-08-25	13.43 - 17.74	63.32 - 80.76	451	6	0.80
14-08-25	12.95 - 16.96	61.97 - 86.79	491	6	0.73

Tabla 4.3: Resumen de mediciones preliminares con duración en minutos y tasa de recolección de agua

En la tabla [4.3](#) se presentan los resultados, donde se observa que la eficiencia fue similar en las pruebas de día y de noche, siempre que existiera un rango de humedad relativa suficiente. Estos resultados contrastan con los obtenidos en la parcela, donde las fluctuaciones ambientales afectaban de forma más marcada la producción.

Estas mediciones permitieron establecer una línea base de desempeño del deshumidificador con una red estable, independiente de la variabilidad ambiental, lo que servirá como referencia comparativa para futuros estudios de optimización y escalamiento.

Fecha M.D.	Minutos de operación	Agua recolectada (L)	Agua por hora (L/h)
02-06-2025	112	1.6	0.86
03-06-2025	181	2.25	0.75
04-06-2025	264	3.5	0.80
05-06-2025	94	1.05	0.67
07-06-2025	301	4.1	0.82
10-06-2025	134	1.75	0.78
16-06-2025	344	4.95	0.86
17-06-2025	254	4.05	0.96
18-06-2025	240	3.7	0.93
promedio			0.82

Tabla 4.4: Extracción de agua mediciones diurnas

Fecha M.N.	Minutos de operación	Agua recolectada (L)	Agua por hora (L/h)
11-06-2025	66	1.125	1.03
12-06-2025	170	2.52	0.89
17-07-2025	101	1.2	0.71
19-07-2025	142	1.3	0.55
promedio			0.80

Tabla 4.5: Extracción de agua mediciones nocturnas

Fecha M.P.D.	Minutos de operación	Agua recolectada (L)	Agua por hora (L/h)
12-08-2025	373	6	0.97
13-08-2025	429	6	0.84
promedio			0.91

Tabla 4.6: Extracción de agua mediciones preliminares diurnas

Fecha M.P.N.	Minutos de operación	Agua recolectada (L)	Agua por hora (L/h)
13-08-2025	451	6	0.80
14-08-2025	491	6	0.73
promedio			0.77

Tabla 4.7: Extracción de agua mediciones preliminares nocturnas

De las tablas 4.4, 4.5, 4.6 y 4.7 se observa que el promedio de la mayor extracción de agua se obtuvo en las mediciones preliminares diurnas, donde alcanzó 0.91 L/h, mientras que las mediciones nocturnas, tanto en terreno como preliminares, se mantuvieron en 0.80 y 0.77 L/h, respectivamente.

Sin embargo, los gráficos de las mediciones experimentales en terreno (ver anexo B.2, B.3, B.7, B.9, B.11, B.12 y B.13, y también las mediciones preliminares con red estable B.16 y B.17, muestran que el deshumidificador entra en un ciclo de reposo, especialmente cuando la temperatura desciende bruscamente en comparación con la temperatura de inicio de operación. Esto sugiere una menor eficiencia en la extracción de agua, por lo que se requieren mejoras al equipo para evitar que entre en este ciclo y corroborar si efectivamente puede extraer más agua.

4.2. Mejoras técnicas del deshumidificador

Esta sección busca abordar posibles mejoras para implementar en el deshumidificador TTK127. El desempeño observado en las mediciones en terreno, durante los meses de junio y julio, evidenció una discrepancia significativa entre la potencia nominal del deshumidificador dada por el fabricante, la cual era de 1060W y la potencia efectiva registrada durante la operación en terreno, la cual fue de 530W en promedio.

El objetivo de esta sección es comprender esta diferencia y explorar las posibles mejoras a realizar al equipo. Se decidió evaluar tres estrategias para aumentar la extracción de agua, las cuales se basaron en intervenir el sistema de control del equipo, específicamente la referencia de temperatura y humedad. Para encontrar el sensor y analizar su funcionamiento interno, se desarmó el equipo.

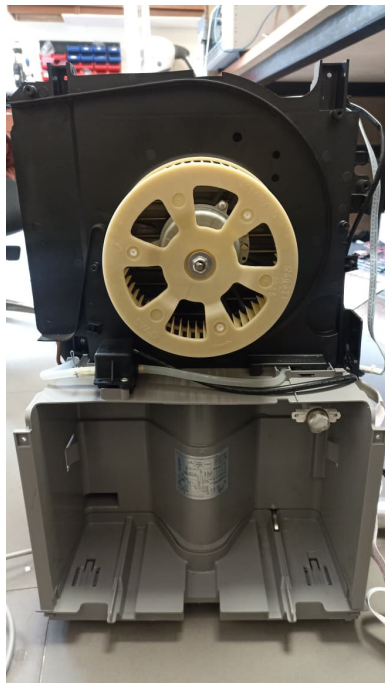


Figura 4.1: Vista frontal

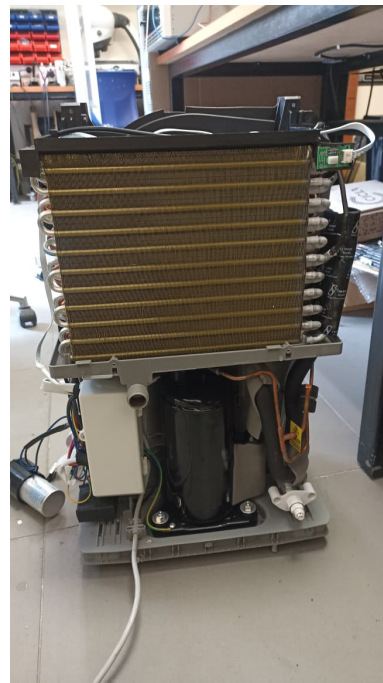


Figura 4.2: Vista posterior

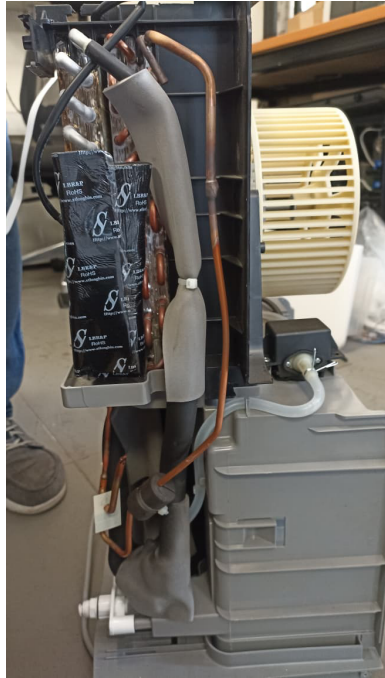


Figura 4.3: Vista lateral derecha deshumidificador



Figura 4.4: Vista lateral izquierda deshumidificador

En este proceso, se identificaron elementos claves dentro del deshumidificador, como el ventilador, el compresor, el serpentín, el refrigerante y el sensor digital que entrega la referencia de temperatura y humedad. Dicho sensor fue extraído hacia el exterior, lo que permitió realizar pruebas experimentales con referencias forzadas de temperatura y humedad.

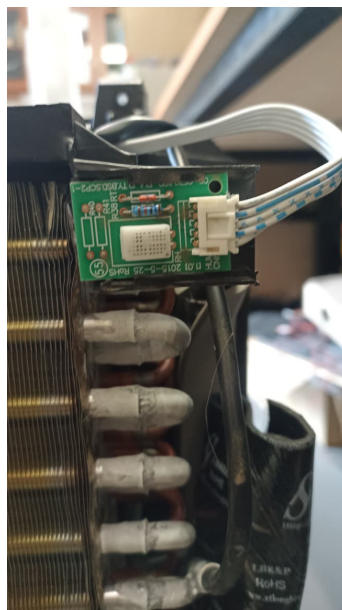


Figura 4.5: Sensor de temperatura y humedad

4.2.1. Mejoras en el control

Se realizaron tres pruebas, inicialmente en laboratorio y posteriormente fueron replicadas en terreno, registrando en cada caso las variables de temperatura, humedad y potencia del equipo. Las pruebas se basaron en forzar distintas referencias para el control, las cuales se enumeran en la siguiente lista:

- Sin referencia de temperatura y humedad.
- Referencia forzada de temperatura y humedad.
- Referencia con precalentador de aire.

4.2.2. Análisis del sistema de control original

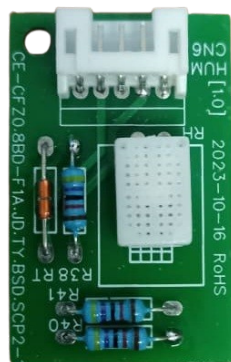


Figura 4.6: Frente de sensor

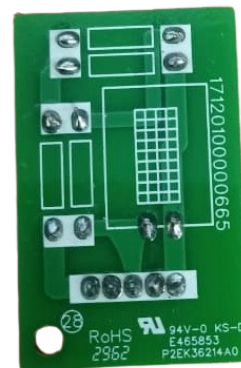


Figura 4.7: Posterior de sensor

El sensor que se observa corresponde al CE-CFZO.8BD-F1A.JD.TY, un sensor de temperatura y humedad utilizado principalmente en equipos de climatización como deshumidificadores y aires acondicionados. Se intentó caracterizar este sensor mediante conexión a un microcontrolador Arduino, sin embargo, las mediciones obtenidas fueron erráticas y no se logró establecer un protocolo de comunicación válido. Asimismo, al realizar una búsqueda en bases de datos de sensores (datasheet) y literatura técnica, no fue posible encontrar información pública disponible sobre el modelo específico, la hipótesis a esto, es que se trata de un componente con información protegida por el fabricante, sin embargo, observando el sensor se cree que cumple un rol crítico en el equipo, ya que:

- Se muestra la humedad captada por el sensor en la pantalla táctil del deshumidificador, lo que se cree da condiciones de arranque y detención del compresor.
- Activa códigos de error de protección en caso de que el sensor falle, mostrando el error A5 en pantalla al extraer el sensor.
- Ajusta la potencia de operación según los niveles de temperatura y humedad percibidos, dejando el deshumidificador en un ciclo de descanso cuando la temperatura o la humedad bajan demasiado.

4.2.3. Estrategias de modificación del control y pruebas en laboratorio

Con el equipo armado nuevamente y el sensor a la vista se procedieron a hacer tres pruebas en laboratorio y posteriormente validar los resultados en terreno. Estas pruebas se basaron en intervenir de forma ligera la señal de referencia entregada por el sensor de temperatura y humedad. El objetivo de estas fue evaluar el impacto de eliminar o modificar la referencia del sensor sobre el comportamiento del equipo y explorar estrategias que permitan incrementar la potencia de operación, lo cual debería traer como consecuencia un aumento en la capacidad de condensación y recolección de agua.

4.2.3.a. Prueba sin referencia de temperatura y humedad

La primera estrategia consistió en desconectar el sensor interno de temperatura y humedad del equipo, dejando al equipo sin referencia de humedad y temperatura, para ver si ocurrían cambios significativos en la potencia o en el sistema de control. El propósito de esta prueba fue determinar si el deshumidificador podía operar a plena capacidad en ausencia de una señal de referencia ya que se sospechaba que el control incorporado limitaba la potencia al interpretar condiciones ambientales no extremas en humedad y temperatura, de cierta forma, en un ciclo de trabajo menos exigente.

Este ensayo buscó establecer un estado base de máxima operación, verificando si el equipo alcanzaba niveles de potencia más cercanos a la especificación nominal cuando no existía un lazo de retroalimentación que lo condicionara.

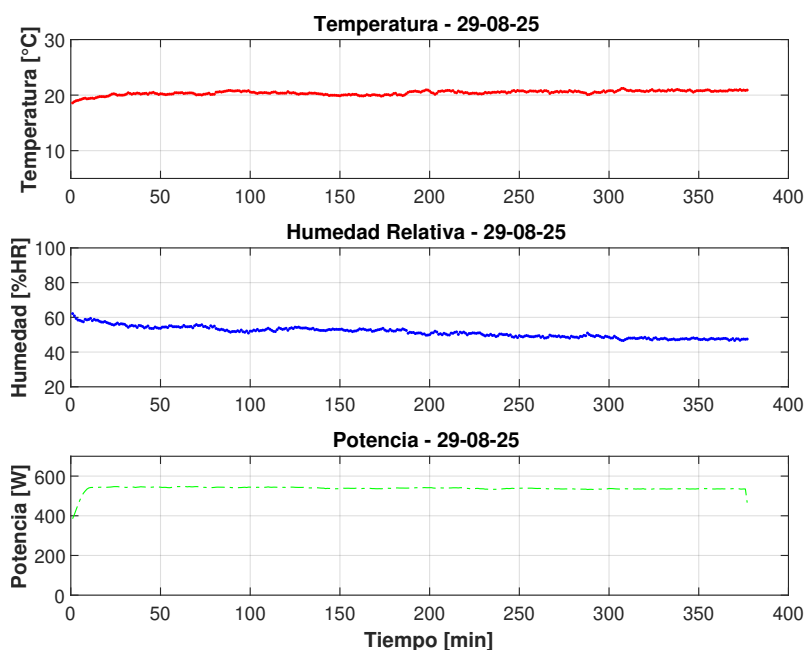


Figura 4.8: Medición sin referencia: Temperatura, humedad y potencia vs tiempo

4.2.3.b. Prueba con referencia forzada de temperatura y humedad

Como segundo ensayo, se inyectaron referencias forzadas de temperatura y humedad al sensor, de este modo el control del deshumidificador “creería” que opera en condiciones

de mayor temperatura y humedad que las que realmente habían presentes en el ambiente.

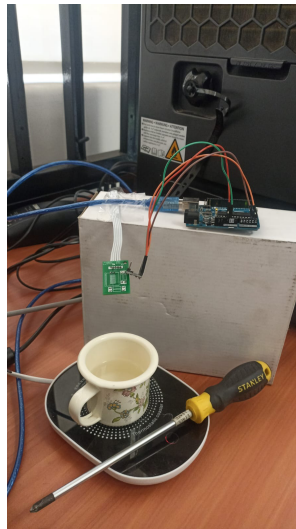


Figura 4.9: Desarrollo experimental para forzar referencia de temperatura y humedad en el sensor

De forma experimental, se mantuvo una taza con agua caliente y un precalentador de taza para evitar que bajara la temperatura, como se muestra en la figura 4.9 forzando al sensor a leer temperaturas y humedades más altas de lo que realmente habían en el espacio de laboratorio.

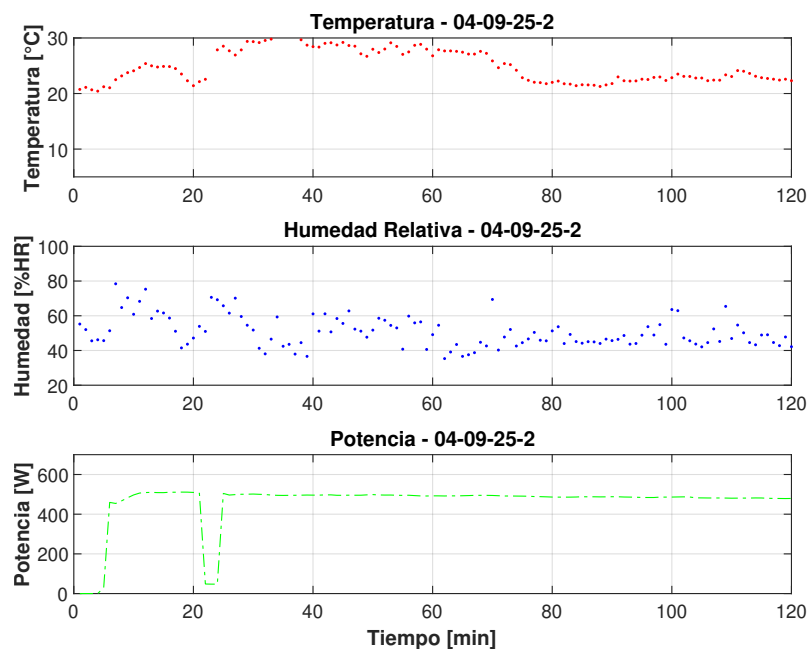


Figura 4.10: Medición referencia forzada: Temperatura, humedad y potencia vs tiempo

Sin embargo, a pesar de tener un precalentador que mantuviera lo más constante posible el agua para simular condiciones de alta temperatura y humedad, las mediciones dadas por el sensor SHT31, que son las registradas en la figura 4.10 son irregulares, ya

que al no ser una cavidad húmeda constante, el entorno de laboratorio podía entrometerse en las mediciones de este sensor digital preciso, no así con el sensor del deshumidificador, quien en la mayor parte de la medición mantuvo una diferencia del 20 % de humedad relativa con respecto al entorno real. Sin embargo, queda como tarea a la medición en campo mejorar la estabilidad de la temperatura y humedad.

4.2.3.c. Prueba con precalentador de aire

La tercera prueba incorporó un precalentador en la entrada de aire del deshumidificador, con el fin de aumentar la temperatura del aire antes del ingreso al sistema. Esta prueba, más que intervenir directamente en el control del deshumidificador, busca determinar si un aumento controlado de temperatura favorecía la absorción de humedad en el serpentín. Esta prueba tuvo dos mediciones, probando dos distancias del precalentador de aire con respecto al deshumidificador.



Figura 4.11: Primera disposición experimental con precalentador de aire



Figura 4.12: Segunda disposición experimental con precalentador de aire

Este ensayo permitió explorar el potencial de combinar el sistema de deshumidificación con una etapa de acondicionamiento previo, lo cual podría ser relevante en escenarios agrícolas donde la temperatura ambiente es baja y la humedad relativa alta, evitando que el sistema entre en un ciclo de descanso forzado por el control debido a las bajas temperaturas.

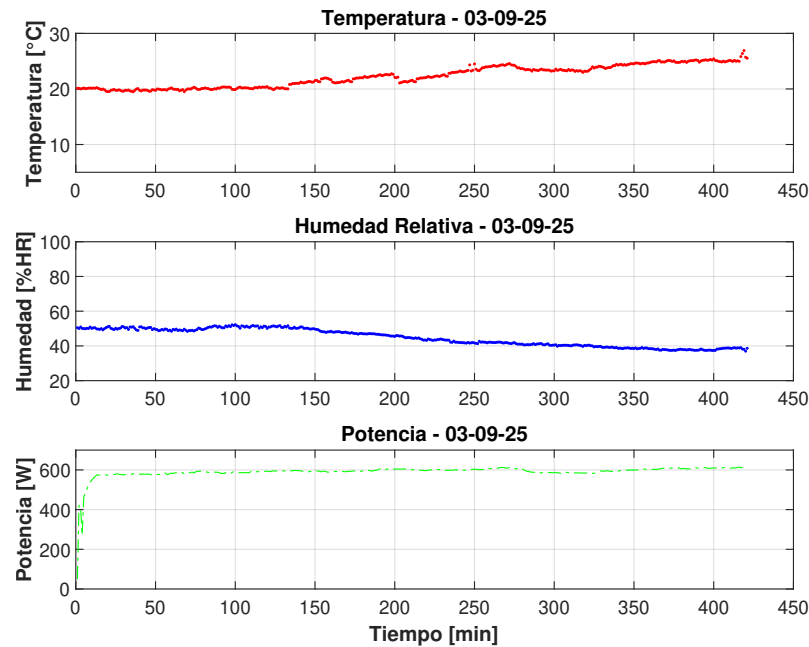


Figura 4.13: Medición 1 con precalentador de aire: Temperatura, humedad y potencia vs tiempo

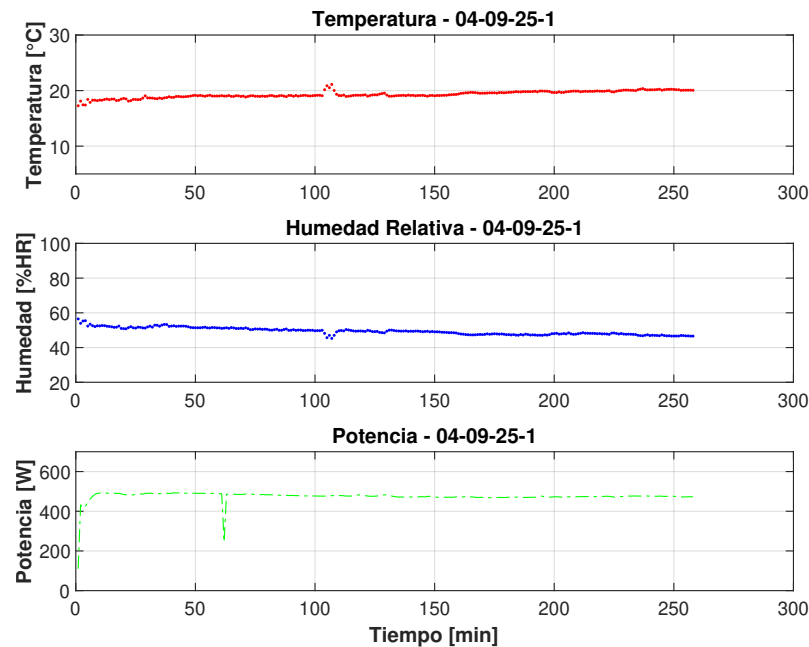


Figura 4.14: Medición 2 con precalentador de aire: Temperatura, humedad y potencia vs tiempo

El dato más importante de las figuras 4.11 y 4.12 es el aumento de potencia con el precalentador de aire, mientras que en la figura 4.11 se muestra que la potencia alcanzó los 600W y se mantuvo durante toda la medición, mientras que en la figura 4.12 la potencia se mantuvo en los 500W durante la medición. Sin embargo, aunque tanto la potencia de la medición 1 como el tiempo de muestreo y la temperatura fueron mayores, se obtuvo

menos agua que en la medición 2.

4.2.4. Validación en terreno

Una vez realizadas las pruebas en laboratorio, se procedió a replicar las tres estrategias en condiciones reales de operación en la parcela demostrativa de Taltal. El objetivo de esta fase fue contrastar los resultados experimentales con el comportamiento del equipo en ambiente exterior, considerando las variaciones propias de temperatura, humedad relativa e irradiancia solar de la zona norte costera desértica de Chile.

4.2.4.a. Prueba sin referencia de temperatura y humedad

Esta prueba se desarrolló en terreno, donde nuevamente el sensor del deshumidificador fue retirado, eliminando así la señal de referencia del equipo, esto permitió que el equipo operara de forma continua y sostenida, sin interrupciones. Sin embargo, a pesar de este funcionamiento más estable, no se alcanzó la potencia nominal indicada por el fabricante. El comportamiento fue similar al observado en laboratorio, evidenciando que el limitante no era únicamente el control por sensor, sino posiblemente una restricción interna del equipo.

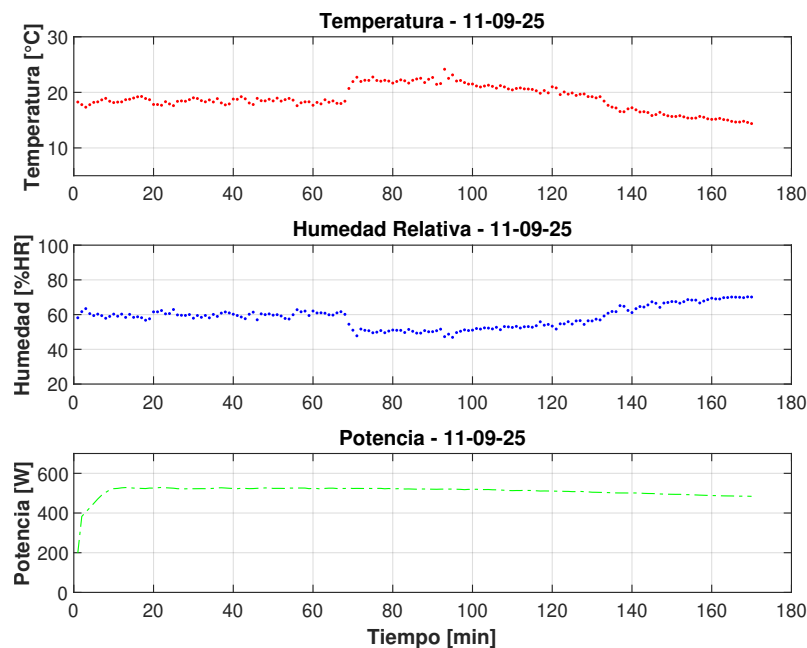


Figura 4.15: Medición sin referencia en terreno: Temperatura, humedad y potencia vs tiempo

4.2.4.b. Prueba con referencia forzada de temperatura y humedad

Figura 4.16: Configuración experimental en terreno de referencia forzada

Para forzar una mayor temperatura y humedad, se utilizó la configuración observada en la figura 4.16, la cual corresponde a un termo con agua tibia en vez de caliente para evitar que el valor dañe los sensores digitales y su tapa semi-cerrada, lo que ayuda tanto al sensor SHT31 como al sensor del deshumidificador a mantener una medición alta de temperatura y humedad por un periodo de tiempo.

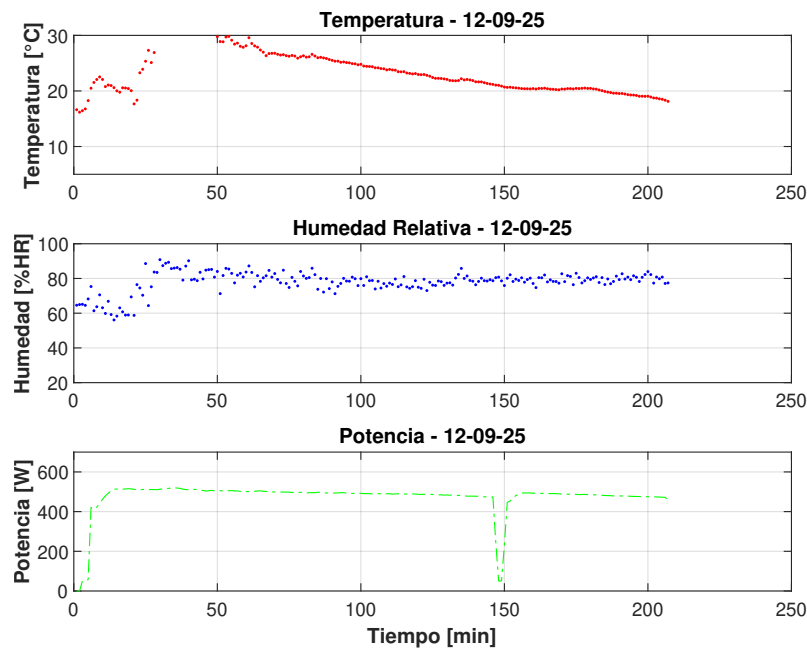


Figura 4.17: Medición referencia forzada en terreno: Temperatura, humedad y potencia vs tiempo

Del gráfico [4.17](#) se observa que la potencia se mantuvo casi constante hasta el minuto 150, donde ocurrió una baja de la potencia por aproximadamente dos minutos donde se observa que la temperatura igual comienza a bajar de los 20°C , cambio que el sensor del deshumidificador tomó para hacer una pequeña variación en la potencia.

4.2.4.c. Prueba con precalentador de aire

Durante la tercera y última prueba de verificación de mejora en terreno se utilizó el mismo precalentador de aire que en laboratorio, a una distancia prudente del equipo, donde no secara el aire que ingresaba al deshumidificador.



Figura 4.18: Configuración experimental en terreno de medición con precalentador de aire

En la figura [4.18](#) se puede observar la configuración experimental de esta medición.

El principal desafío de esta medición fue el alto requerimiento de potencia total del sistema, ya que el deshumidificador demanda en promedio 530W y el precalentador de aire alrededor de 1050W, lo que implica una potencia combinada cercana a 1,6 kW. Esta potencia supera ampliamente la capacidad instantánea de generación fotovoltaica disponible en el sistema (875W) y exige una descarga considerable del banco de baterías, compuesto por cuatro unidades de gel de ciclo profundo de 12V y 100Ah conectadas en paralelo.

Bajo estas condiciones, y considerando además que la jornada de prueba presentó irradiancia variable y periodos de nubosidad parcial, el sistema operó principalmente alimentado por las baterías. La descarga simultánea de aproximadamente 1,6 kW provocó una caída rápida de la tensión, motivo por el cual el inversor interrumpió el funcionamiento luego de cerca de hora y media de operación continua. Posteriormente se reanudó la medición en una segunda tanda, de duración similar, una vez que las baterías recuperaron parte de su carga.

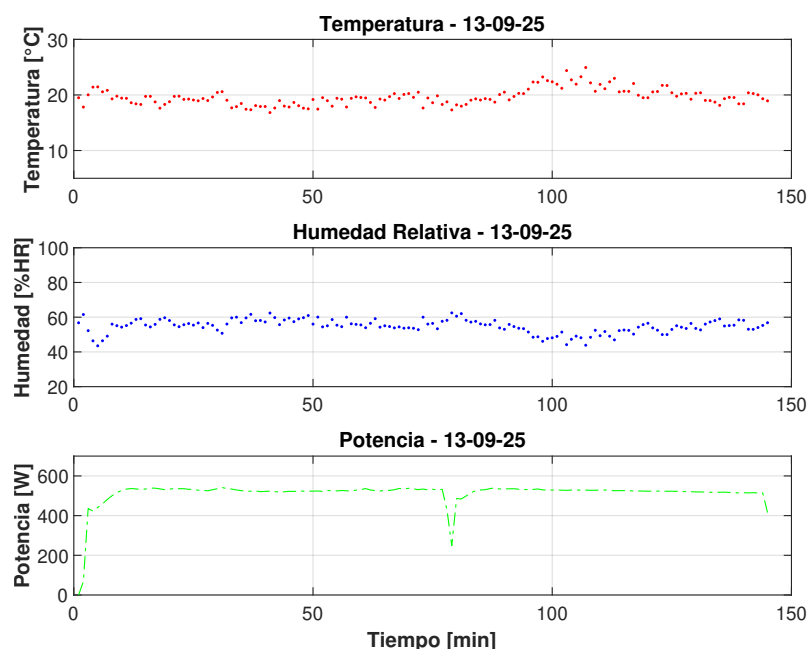


Figura 4.19: Medición con precalentador de aire en terreno: Temperatura, humedad y potencia vs tiempo

Esta pausa durante la medición es evidente en la baja que existe entre el minuto 50 y 100 del gráfico 4.19 de potencia vs tiempo.

Medición	Potencia máxima (W)	Potencia mínima (W)	Agua (L)	Duración (min)	Producción (L/h)
Sin referencia lab	547.2	385.1	3.150	377	0.50
Referencia forzada lab 1	533.9	4.1	2.800	481	0.35
Referencia forzada lab 2	511.3	30	1.550	120	0.78
Precalentador lab 1	613.9	50.4	0.45	421	0.06
Precalentador lab 2	493.4	110	1.750	258	0.41
Sin referencia terreno	529	198	2.700	170	0.95
Referencia forzada terreno	520.4	50	2.800	207	0.81
Precalentador terreno	541.7	68	1.700	145	0.70

Tabla 4.8: Resumen de mediciones y rendimiento del deshumidificador

En la tabla 4.8 se observa la generación de agua, potencia y duración de cada prueba y se puede contrastar el experimental con el terreno. De esta tabla se infiere que si bien las potencias máximas registradas se mantienen cercanas a 500 - 600 W en la mayoría de los casos, la cantidad de agua recolectada no sigue una correlación directa con la potencia del equipo. Como se observa, la medición de precalentador en laboratorio alcanzó la potencia más alta pero recolectó un volumen de agua menor al de la prueba sin referencia a pesar de que estuvo funcionando durante 421 minutos. Esto indica que la eficiencia en la condensación depende tanto de la energía consumida como de las condiciones del aire de entrada, lo que refuerza la importancia de futuras optimizaciones enfocadas en la interacción entre temperatura, humedad y potencia, más que en un solo parámetro por separado.

De la tabla 4.8 se observa que la prueba sin referencia fue la mejora exitosa, ya que la prueba con medición forzada mantuvo la misma extracción de agua por litro que el promedio de las mediciones diurnas y la prueba con precalentador de aire extrae incluso menos agua que las mediciones nocturnas y además consume mucha potencia, descartando por completo la posibilidad de que esta mejora sea viable, a pesar de que en laboratorio se obtuvo un aumento significativo en la potencia, no se demuestra empíricamente que este aumento de potencia aumente la extracción de agua. Esto se debe, a como se puede observar en las figuras 4.16 cerca del minuto 150 y 4.18 cerca del minuto 80, el deshumidificador entra en un ciclo de descanso. Una explicación a esta baja en la extracción de agua, se cree que la condensación se ve interrumpida por unos minutos, lo que deriva en menos extracción de agua por hora por parte del equipo en estas condiciones.

Capítulo 5

Análisis Técnico-Económico

5.1. Metodología para el estudio técnico-económico

Con el objetivo de evaluar la viabilidad de implementar el sistema de deshumidificación fotovoltaica a escala productiva, se desarrolló un estudio técnico-económico basado en los resultados obtenidos en el piloto experimental y en la proyección de un escenario ampliado con cinco deshumidificadores en paralelo. Este escenario permitió aproximar el análisis a condiciones de aplicación real en la agricultura, superando las limitaciones del prototipo inicial.

El estudio consideró tanto los costos de inversión (*CAPEX*) como los costos de operación y mantenimiento (*OPEX*), junto con el rendimiento energético y la producción hídrica esperada. Para ello, se tomaron como referencia las mediciones experimentales realizadas en terreno y se proyectó la operación anual del sistema considerando la estacionalidad de la radiación solar y la humedad relativa de la zona.

De manera específica, el análisis contempló:

- Los costos de adquisición e instalación de los componentes principales: campo fotovoltaico, banco de baterías, deshumidificadores, sistema de control y mano de obra.
- El rendimiento energético y el volumen promedio de agua extraído bajo condiciones representativas.
- La proyección de la producción anual considerando la operación diferenciada entre otoño-invierno y primavera-verano.
- Los costos de operación y mantenimiento, así como los reemplazos de equipos a lo largo de la vida útil.
- La comparación con los costos actuales de abastecimiento hídrico en zonas rurales, utilizados como referencia de mercado.

Con estos elementos, fue posible estimar el costo equivalente por litro de agua producido, así como el periodo de recuperación de la inversión (*payback*), bajo los criterios nominal y descontado.

5.2. Análisis Técnico-Económico

El análisis técnico-económico del sistema de extracción de agua atmosférica mediante deshumidificación alimentado por energía fotovoltaica evaluó la viabilidad económica de ampliar el sistema piloto hacia un proyecto de mayor escala y aplicabilidad real. Para mejorar la rentabilidad y aumentar la capacidad de extracción de agua, se planteó incrementar el número de deshumidificadores a cinco, suprimiendo además la referencia al control del sensor de temperatura y humedad con el fin de evitar que el equipo entrara en ciclos de reposo. Asimismo, el sistema fotovoltaico inicial se amplió para soportar la demanda energética de los cinco equipos, sustituyendo los tres paneles de 225W por seis paneles de 550W, manteniendo el inversor de 3000kW e incrementando el banco de baterías de cuatro a diez unidades. También se contemplaron los mantenimientos necesarios para garantizar una operación continua. Esta configuración permitió aproximarse a una escala más realista orientada a la autosuficiencia hídrica de pequeños y medianos agricultores.

5.2.1. Supuestos

A partir de las mediciones experimentales del piloto, se proyectó un esquema de operación ampliado para 5 deshumidificadores.

Se observa a continuación el precio de todos los elementos necesarios para ejecutar el proyecto.

Elemento	Precio (CLP)	Cantidad	Precio unitario (CLP)
Inversor 3kW	\$295.000	1	\$295.000
Baterías	\$1.550.000	10	\$155.000
Paneles fotovoltaicos	\$539.070	6	\$89.845
Envío kit fotovoltaico	\$250.000	1	\$250.000
Flete a terreno	\$50.000	1	\$50.000
Instalación de paneles	\$100.000	1	\$100.000
Herramientas	\$40.000	1	\$40.000
Protecciones y cableado	\$100.000	1	\$100.000
Deshumidificador	\$2.454.000	5	\$490.800
Flete a terreno deshumidificadores	\$250.000	5	\$50.000
Kit fotovoltaico 10W	\$59.990	1	\$59.990
ESP32 WROOM-32	\$13.000	1	\$13.000
Módulo step down	\$3.990	1	\$3.990
Kit protoboard y cableado	\$7.990	1	\$7.990
Relé 3.3V	\$3.190	1	\$3.190
BH1750	\$2.300	1	\$2.300
Sensor capacitivo de humedad	\$5.000	1	\$5.000
SHT31	\$7.990	1	\$7.990
Envío elementos de electrónica	\$25.000	1	\$25.000
Mano de obra	\$500.000	1	\$500.000
Subtotal	\$6.256.520		

Tabla 5.1: Detalle de costos de inversión del sistema propuesto (valores en CLP)

Además, los supuestos principales del sistema son los siguientes:

- Producción promedio de un deshumidificador: 0,95 L/hora, basado en lo obtenido en las pruebas de mejora al equipo [4.8](#).
- Producción promedio con 5 deshumidificadores: 4,75 L/hora.
- Horas de operación: estrictamente diurna.
- Nubosidad parcial de la zona y almacenamiento energético: debido a la nubosidad matinal recurrente producto de la camanchaca, la generación fotovoltaica efectiva se concentra entre el mediodía y las primeras horas de la tarde. Por esta razón, se priorizó aumentar la capacidad de almacenamiento energético mediante un banco de baterías de gel de ciclo profundo.

El dimensionamiento del banco de baterías se realizó considerando las condiciones de operación del sistema en Taltal, localidad costera caracterizada por una alta nubosidad matinal que reduce la radiación solar efectiva durante las primeras horas del día. Dado que el sistema debe garantizar un funcionamiento continuo incluso en periodos de baja generación fotovoltaica, se definió un banco de acumulación capaz de mantener la operación por al menos 6 horas en otoño–invierno y 8 horas en primavera–verano.

Para ello se consideró un banco compuesto por 10 baterías de gel de 12 V y 100 Ah, conectadas para entregar una energía total de almacenamiento de:

$$E_{total} = N_{bat} \times V_{bat} \times C_{bat}$$

donde $N_{bat} = 10$ corresponde al número de baterías, $V_{bat} = 12$ V es la tensión nominal de cada una, y $C_{bat} = 100$ Ah su capacidad nominal. Así,

$$E_{total} = 10 \times 12 \text{ V} \times 100 \text{ Ah} = 12\,000 \text{ Wh} = 12 \text{ kWh} \quad (5.1)$$

Dado que se emplean baterías de gel de ciclo profundo, se consideró una profundidad de descarga del 80

$$E_{útil} = E_{total} \times 0,8 = 9,6 \text{ kWh} \quad (5.2)$$

El sistema alimenta una carga equivalente a cinco deshumidificadores de 530 W cada uno, cuya potencia total es:

$$P_{carga} = 5 \times 530 \text{ W} = 2,65 \text{ kW} \quad (5.3)$$

La autonomía teórica del banco de baterías se obtiene como:

$$t = \frac{E_{útil}}{P_{carga}} = \frac{9,6 \text{ kWh}}{2,65 \text{ kW}} = 3,62 \text{ h} \quad (5.4)$$

Considerando una eficiencia promedio del inversor de 90

$$t_{real} = t \times 0,9 = 3,26 \text{ h} \quad (5.5)$$

Por lo tanto, el banco de baterías seleccionado permite un funcionamiento continuo de aproximadamente 3 horas sin generación solar, asegurando la operación del sistema durante horas nubladas o en periodos de baja irradiancia. En condiciones normales de operación, con aporte fotovoltaico diurno proveniente de los 6 paneles de 550W (3,3kW pico), el sistema logra sostener la carga durante las 6 a 8 horas diarias de operación consideradas en el análisis.

La inclusión de un banco de baterías de esta capacidad representa un aumento en el costo inicial del proyecto, sin embargo, se justifica plenamente para garantizar la autonomía y continuidad operativa del sistema en zonas con alta nubosidad costera como Taltal, donde la captación solar puede variar significativamente a lo largo del día.

- Configuración del banco de baterías:

- 10 baterías de 12 V y 100 Ah de gel de ciclo profundo.
- Reemplazo parcial de las baterías cada 4 años (cambio de 5 unidades para amortiguar costos y mantener capacidad de almacenamiento).

Esta configuración permite sostener el funcionamiento diurno estable de los cinco equipos y asegurar autonomía en condiciones invernales:

- 6 h/día en otoño-invierno.
- 8 h/día en primavera-verano.

- Producción anual: 12,136,25 L/año.

- Potencia promedio de cada deshumidificador: 530 W. Total: 2,650 W.

- CAPEX total: \$6.256.520, incluyendo equipos, instalación en terreno, envío de elementos, herramientas y mano de obra.

- Vida útil de equipos:

- Paneles + inversor: 20 años.
- Baterías ciclo profundo: 4 años (reemplazo parcial cada 4 años).
- Deshumidificadores: 10 años (reemplazo total al año 10).
- Electrónica de control: 8 años (reemplazo total cada 8 años).

- OPEX anual: filtros de deshumidificador, limpieza de paneles, revisión de baterías y un 2 % adicional por imprevistos.

- Costos extraordinarios:

- Cambio de 5 baterías cada 4 años: \$775.000.
- Cambio de 5 deshumidificadores al año 10: \$2.454.000.
- Cambio de electrónica de control cada 8 años: \$128.450.

- Tasa de descuento: 8 %.

- Precio actual del agua: 40.000 CLP/m³ (40 CLP/L).

5.2.2. Producción y rendimiento energético

Para la evaluación de la producción de agua y el consumo energético del sistema, se definió la siguiente simbología:

Magnitud	Símbolo	Valor
Producción de agua por hora	L_h	$0,91 \frac{L}{h}$
Horas de operación en invierno	H_{wi}	$6 \frac{h}{d}$
Horas de operación en verano	H_{wv}	$8 \frac{h}{d}$
Producción diaria en invierno	L_i	$28,5 \frac{L}{d}$
Producción diaria en verano	L_v	$38 \frac{L}{d}$
Producción anual	L_a	$12136,25 \frac{L}{año}$
Potencia consumida del sistema	P	$2,65 \text{ kW}$
Energía diaria en invierno	E_i	$15,9 \text{ kWh/d}$
Energía diaria en verano	E_v	$21,2 \text{ kWh/d}$
Consumo energético anual	E_a	$6770,75 \text{ kWh/año}$

Tabla 5.2: Simbología General

Considerando los valores de la producción de agua y la energía consumida en un año, se determinó el rendimiento en L/kWh del equipo:

$$\eta = \frac{L_a}{E_a} = \frac{12136,25 \text{ L/año}}{6770,75 \text{ kWh/año}}$$

$$\boxed{\eta = 1,8 \frac{L}{kWh}} \quad (5.6)$$

El indicador 5.6 de rendimiento representa la eficiencia del sistema al expresar cuántos litros de agua fueron obtenidos por cada kilowatt-hora consumido.

5.2.3. Costos de operación y mantenimiento

El *OPEX* fijo anual incluye:

- Filtros deshumidificador: 40.000 CLP/año.
- Limpieza paneles: 120.000 CLP/año (20.000 por panel).
- Revisión de baterías: 10.000 CLP/año.
- Reserva imprevistos (2 % CAPEX): 125.130 CLP/año.

$$\boxed{OPEX_{fijo} = \$ 295,130 \text{ CLP/año}} \quad (5.7)$$

Además, según lo mencionado en los supuestos, se tienen también los otros tipos de *OPEX* que se aplicarán cada X cantidad de años:

$$\boxed{OPEX_{bateria} = \$ 775,000 \text{ CLP}/5 \text{ años}} \quad (5.8)$$

$$\boxed{OPEX_{electronica} = \$ 128,450 \text{ CLP}/8 \text{ años}} \quad (5.9)$$

$$\boxed{OPEX_{deshumidificadores} = \$ 2,454,000 \text{ CLP}/10 \text{ años}} \quad (5.10)$$

5.2.4. Costo equivalente del agua

El costo por litro producido en el escenario base se calcula como:

$$C_L = \frac{Costo_{anual}}{L_a} \quad (5.11)$$

En este caso, para un costo anual de 591.844 CLP y producción de 12.136,25 L/año:

$$C_L = \frac{591,844}{12,136,25} = 49 \text{ CLP/L} \quad (5.12)$$

Por otro lado, se tiene el precio actual de mercado:

$$C_{mercado} = 40 \text{ CLP/L} \quad (5.13)$$

Donde aquí se observa que:

$$\boxed{C_{mercado} < C_L} \quad (5.14)$$

5.2.5. Proyección del precio del agua y efecto sobre el payback

El precio del agua se modeló como un proceso de crecimiento compuesto anual:

$$p_t = p_0(1 + g)^{t-1} \quad (5.15)$$

Se usó como referencia $p_0 = 40 \text{ CLP/L}$. Considerando que en 2017 el precio era de 7.000 CLP/ m^3 y que en 2025 alcanzó los 40.000 CLP/ m^3 , calculando la tasa anual compuesta se obtuvo $p_0 = 40 \text{ CLP/L}$ y $g = 0,2434$.

Considerando esto, el ahorro bruto por año sería de:

$$S_t = L_a \cdot p_t \quad (5.16)$$

El OPEX en el año t se representó como:

$$O_t = OPEX_{fijo} + OPEX_{extra}(t) \quad (5.17)$$

y el ahorro neto por:

$$N_t = S_t - O_t \quad (5.18)$$

Finalmente, el ahorro descontado:

$$D_t = \frac{N_t}{(1+r)^t} \quad (5.19)$$

5.2.5.a. Resultados del payback

Se aplicaron dos criterios de cálculo: el payback nominal (o payback bruto) y el payback descontado.

El payback bruto correspondió al tiempo requerido para recuperar la inversión inicial considerando únicamente los ingresos, los cuales, en este caso, se asociaron al ahorro obtenido por la sustitución de la compra de agua. Su cálculo se realizó acumulando los ahorros brutos año a año hasta alcanzar el valor del CAPEX, sin descontar los costos operativos ni incorporar el valor del dinero en el tiempo, lo que condujo a un horizonte de recuperación más corto y optimista.

En contraste, el payback descontado representó el tiempo necesario para recuperar la inversión inicial considerando tanto el valor futuro del dinero como los costos de operación y mantenimiento (OPEX). Su cálculo se efectuó acumulando los ahorros netos descontados año a año hasta igualar el CAPEX. Este enfoque resultó más realista, ya que incorporó la tasa de descuento y reflejó la preferencia temporal del dinero, entregando de manera sistemática un horizonte de recuperación mayor que el estimado mediante el payback nominal.

El cálculo de indicadores corresponde a:

- **Payback nominal:** el menor T tal que

$$\sum_{t=1}^T S_t \geq CAPEX \quad (5.20)$$

resultó en $T = 11$ años.

- **Payback descontado:** considerando D_t , el menor T tal que

$$\sum_{t=1}^T D_t \geq CAPEX \quad (5.21)$$

fue $T = 16$ años.

5.2.5.b. Flujo de caja a 20 años

Año	Costo agua (CLP)	Ingresos (CLP)	OPEX (CLP)	Flujo neto (CLP)	Flujo descontado (CLP)	Acum. nominal (CLP)	Acum. descontado (CLP)
0	\$0	\$0	\$0	\$-6.256.520	\$-6.256.520	\$-6.256.520	\$-6.256.520
1	\$40	\$485.450	\$295.130	\$190.320	\$176.222	\$-6.066.200	\$-6.080.298
2	\$50	\$603.609	\$295.130	\$308.478	\$264.470	\$-5.757.722	\$-5.815.828
3	\$62	\$750.527	\$295.130	\$455.396	\$361.508	\$-5.302.326	\$-5.454.319
4	\$77	\$933.205	\$295.130	\$638.075	\$469.004	\$-4.664.251	\$-4.985.316
5	\$96	\$1.160.347	\$1.070.130	\$90.217	\$61.400	\$-4.574.034	\$-4.923.916
6	\$119	\$1.442.776	\$295.130	\$1.147.645	\$723.211	\$-3.426.389	\$-4.200.704
7	\$148	\$1.793.947	\$295.130	\$1.498.817	\$874.545	\$-1.927.572	\$-3.326.159
8	\$184	\$2.230.594	\$295.130	\$1.935.464	\$1.045.671	\$7.892	\$-2.280.488
9	\$229	\$2.773.521	\$1.198.580	\$1.574.940	\$787.862	\$1.582.832	\$-1.492.626
10	\$284	\$3.448.596	\$2.749.130	\$699.465	\$323.988	\$2.282.297	\$-1.168.638
11	\$353	\$4.287.984	\$295.130	\$3.992.853	\$1.712.466	\$6.275.150	\$543.828
12	\$439	\$5.331.679	\$295.130	\$5.036.549	\$2.000.083	\$11.311.699	\$2.543.911
13	\$546	\$6.629.410	\$1.070.130	\$5.559.279	\$2.044.135	\$16.870.978	\$4.588.046
14	\$679	\$8.243.008	\$295.130	\$7.947.878	\$2.705.943	\$24.818.856	\$7.293.989
15	\$845	\$10.249.356	\$295.130	\$9.954.226	\$3.137.987	\$34.773.082	\$10.431.976
16	\$1.050	\$12.744.050	\$295.130	\$12.448.919	\$3.633.721	\$47.222.001	\$14.065.697
17	\$1.306	\$15.845.951	\$1.198.580	\$14.647.371	\$3.958.730	\$61.869.372	\$18.024.427
18	\$1.623	\$19.702.856	\$295.130	\$19.407.725	\$4.856.764	\$81.277.097	\$22.881.191
19	\$2.019	\$24.498.531	\$295.130	\$24.203.400	\$5.608.220	\$105.480.498	\$28.489.411
20	\$2.510	\$30.461.473	\$295.130	\$30.166.343	\$6.472.135	\$135.646.840	\$34.961.546

Tabla 5.3: Flujo de caja proyectado a 20 años para 5 deshumidificadores en paralelo (valores en CLP) considerando nuevo OPEX.

Los resultados muestran que el payback nominal se alcanza en el año 11, mientras que el descontado se alcanza en el año 16. Aunque el horizonte descontado es superior al de la vida útil del piloto inicial, la ampliación a 20 años del sistema fotovoltaico y la operación de 5 deshumidificadores permiten evaluar la rentabilidad en un plazo realista.

Capítulo 6

Conclusiones

El presente trabajo tuvo como objetivo estudiar la viabilidad técnico-económica de un sistema de extracción de agua ambiental alimentado por energía fotovoltaica en la localidad de Taltal. A través de pruebas experimentales tanto en laboratorio como en terreno, se verificó la viabilidad técnica del sistema, culminando en la implementación de un sistema piloto en la parcela demostrativa ubicada en el sector de Los Loros, Taltal. Durante estas mediciones, se comprobó que el deshumidificador TTK127E de Trotter, diseñado originalmente para eliminar la humedad en ambientes cerrados, es capaz de operar en exteriores extrayendo agua de manera continua bajo diversas condiciones climáticas, tanto en ambientes controlados como no controlados. Además, se confirmó que este equipo puede operar en las condiciones extremas del desierto más árido del mundo, como las del norte de Chile, específicamente en la zona desértica costera de Taltal.

El análisis técnico-económico reveló que, aunque el proyecto piloto no resulta económicamente viable a pequeña escala, la ampliación del sistema a cinco deshumidificadores mejora considerablemente la viabilidad económica. Sin embargo, la producción anual de agua de esta configuración ampliada alcanza los 12.136 litros, cifra que, aunque prometedora, aún no cubre completamente la demanda anual de la parcela, que asciende a 60 m³. Esto implica que, por el momento, el sistema podría reducir parcialmente los costos de agua en el corto plazo. A medida que el consumo de agua aumente por el crecimiento de los cultivos de olivos, será necesario optimizar la eficiencia de los sistemas e investigar alternativas para incrementar la producción de agua. A largo plazo, con avances en la eficiencia de los componentes y la ampliación del sistema, este tipo de soluciones podrían desempeñar un papel crucial en la transición hacia una agricultura más sostenible en zonas afectadas por la escasez hídrica, pero con una alta humedad ambiental y una radiación solar constante, como ocurre en la zona norte costera de Chile. La integración de tecnologías innovadoras, como la deshumidificación fotovoltaica, abre un campo de investigación prometedor para hacer frente a la crisis hídrica global.

Este proyecto no solo se centró en la extracción inmediata de agua, sino también en sentar las bases para el desarrollo de tecnologías innovadoras que combinen la captación de agua ambiental con energías renovables, creando así soluciones aplicables a comunidades rurales afectadas por la sequía o sin acceso a redes de agua potable, como es el caso de estudio. Además, la incorporación de sensores, sistemas de monitoreo inteligentes y la automatización del riego ha demostrado que es posible avanzar hacia un modelo agrícola más sostenible, con autonomía energética y adaptado a las condiciones extremas del desierto

de Atacama.

En conclusión, aunque el sistema ampliado aún no ha sido implementado en terreno, el proyecto piloto ha demostrado que es posible extraer agua ambiental y utilizarla para el riego, lo que ofrece una propuesta innovadora y viable para enfrentar la crisis hídrica. Este trabajo también ha servido como un punto de partida para el desarrollo de proyectos de mayor escala. La implementación inicial permitió identificar las principales limitaciones técnicas y económicas que deben abordarse, pero al mismo tiempo, reveló el gran potencial de la deshumidificación fotovoltaica como complemento a otras tecnologías de obtención de agua. En definitiva, este estudio subraya la necesidad de continuar con la investigación para mejorar el desempeño energético, reducir costos y hacer que estas soluciones contribuyan eficazmente a la gestión del agua en las zonas agrícolas vulnerables de Chile y del mundo.

Apéndice A

Códigos de las Figuras y Tablas

Este código se utilizó para el registro de datos de temperatura y humedad con el sensor DHT11, estos datos se utilizaron para realizar los gráficos de temperatura, humedad y potencia vs tiempo en la evaluación preliminar del deshumidificador TTK127E.

```
#include "DHT.h"
#include <Wire.h>

#define DHTPIN 2
#define DHTTYPE DHT11

DHT dht(DHTPIN, DHTTYPE);

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  Serial.println("Temperatura, Humedad"); // Encabezado para Excel
  dht.begin();
}

void loop() {
  float temp = dht.readTemperature();
  float hum = dht.readHumidity();

  if (!isnan(temp) && !isnan(hum)) {
    // Imprimir en una sola línea separado por coma
    Serial.print(temp);
    Serial.print(",");
    Serial.println(hum); // println asegura el salto de línea necesario para que funcione
  } else {
    Serial.println("Error al leer el DHT11");
  }

  delay(60000); // parametro ajustable de la medicion, *1 min= 60000 ms
}
```

Este código se utilizó para el registro de datos de temperatura y humedad con el sensor SHT31, datos que se utilizaron para realizar los gráficos de temperatura, humedad y potencia vs tiempo en varios capítulos del presente escrito. Este código fue vinculado con el transmisor de datos de excel para ir registrando los datos con fecha y hora en tiempo real.

```
#include <Wire.h>
#include "Adafruit_SHT31.h"

Adafruit_SHT31 sht31 = Adafruit_SHT31();

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  Serial.println("Temperatura, Humedad"); // Encabezado opcional para Excel
  if (!sht31.begin(0x44)) {
    Serial.println("No se encontró el SHT31");
    while (1) delay(1);
  }
}

void loop() {
  float temp = sht31.readTemperature();
  float hum = sht31.readHumidity();

  if (!isnan(temp) && !isnan(hum)) {
    // Imprimir en una sola línea separado por coma
    Serial.print(temp);
    Serial.print(",");
    Serial.println(hum); // println asegura el salto de línea
  } else {
    Serial.println("Error al leer datos del SHT31");
  }

  delay(60000); // cada 1 minuto
}
```

A continuación se muestra el código fuente en MATLAB usado para procesar las hojas de cálculo y generar los gráficos de temperatura, humedad y potencia, que se observan en distintos capítulos de la memoria. En este caso, se muestra el código para generar las figuras del Capítulo 4, sin embargo, se usó el mismo código y se llamo a otra hoja de cálculo de excel para generarlos.

```
% Nombre del archivo Excel
filename = 'Resumen General Mediciones In Situ.xlsx';

% Lista fija de hojas
sheets = {
    '02-06-25',
```

```

    '03-06-25',
    '05-06-25',
    '07-06-25',
    '10-06-25',
    '11-06-25',
    '12-06-25',
    '16-06-25',
    '17-06-25',
    '18-06-25',
    '17-07-25-MN',
    '19-07-25-MN'
};

for i = 1:length(sheets)
    hoja = sheets{i};
    fprintf('Procesando hoja: %s\n', hoja);

    try
        % Leer datos
        datos = readtable(filename, 'Sheet', hoja);

        % leer fila de encabezados
        if all(startsWith(datos.Properties.VariableNames, 'Var'))
            datos = readtable(filename, 'Sheet', hoja, 'ReadVariableNames', false);
            encabezados = table2cell(datos(1,:));
            datos(1,:) = [];
            datos.Properties.VariableNames = ...
                matlab.lang.makeValidName(encabezados);
        end

        % Identificar columnas por nombre
        nombres = datos.Properties.VariableNames;
        tiempo_col = nombres{contains(nombres, 'Tiempo', 'IgnoreCase', true)};
        temp_col = nombres{contains(nombres, 'Temperatura', 'IgnoreCase', true)};
        hum_col = nombres{contains(nombres, 'Humedad', 'IgnoreCase', true)};
        pot_col = nombres{contains(nombres, 'Potencia', 'IgnoreCase', true)};

        % Crear figura invisible
        fig = figure('Visible', 'off', 'Name', hoja, 'NumberTitle', 'off');

        % Subplot 1: Temperatura
        subplot(3,1,1);
        plot(datos.(tiempo_col), datos.(temp_col), '-.', ...
            'Color', 'r', 'LineWidth', 1.5);
        title(['Temperatura - ' hoja], 'FontWeight', 'bold');
        ylabel('Temperatura [°C]', 'FontWeight', 'bold');
        ylim([5 30]); grid on;
    end
end

```

```

% Subplot 2: Humedad
subplot(3,1,2);
plot(datos.(tiempo_col), datos.(hum_col), '-.', ...
      'Color', 'b', 'LineWidth', 1.5);
title(['Humedad Relativa - ' hoja], 'FontWeight', 'bold');
ylabel('Humedad [%HR]', 'FontWeight', 'bold');
ylim([20 100]); grid on;

% Subplot 3: Potencia
subplot(3,1,3);
plot(datos.(tiempo_col), datos.(pot_col), '-.', ...
      'Color', 'g', 'LineWidth', 1.5);
title(['Potencia - ' hoja], 'FontWeight', 'bold');
xlabel('Tiempo [min]', 'FontWeight', 'bold');
ylabel('Potencia [W]', 'FontWeight', 'bold');
ylim([0 600]); xlim([0 600]); grid on;

% Ajuste horizontal (A4)
fig.PaperOrientation = 'landscape';
fig.PaperUnits = 'centimeters';
fig.PaperPosition = [0 0 29.7 21]; % A4 horizontal

% Guardar como PDF vectorial
nombre_pdf = ['grafico_' ...
              regexp(hoja, '[^\w]', '') '.pdf'];
exportgraphics(fig, nombre_pdf, ...
              'ContentType', 'vector', 'BackgroundColor', 'white');

close(fig);
fprintf('Guardado: %s\n\n', nombre_pdf);

catch ME
    warning('Error en hoja "%s": %s\n', hoja, ME.message);
end
end
end

```

Este código fue realizado en arduino IDLE para el centro de control ESP32-w-ROOM-32 para el sistema de riego inteligente.

```

// DATOS de id y nombre del proyecto en blynk
#define BLYNK_TEMPLATE_ID "TMPL2pGrOZzK7"
#define BLYNK_TEMPLATE_NAME "ESP32 lux y humedad sensor capacitivo"
#define BLYNK_AUTH_TOKEN "M57Lc4y_agKGW9kYSIhg_YZzXMoXYnGk"

#include <Wire.h>
#include <BH1750.h>
#include <WiFi.h>
#include <BlynkSimpleEsp32.h>

```

```
// DATOS PARA CONEXIÓN AL HOTSPOT: Conexión a datos móviles celular.
char ssid[] = "mili";
char pass[] = "23698912";

// SENSORES Y CÓDIGO DE LA ESP32-WROOM-32

BH1750 lightMeter; // SENSOR DE LUMINOSIDAD

// DEFINIR PINES DE ESP32 PARA LOS SENSORES
// TRABAJANDO CON LA PROTOBOARD, PONER GND EN EL -, 3V3 EN EL +.
// PARA LA SALIDA DE LOS PINES CONECTAR DE MENOR A MAYOR PARA MÁS CLARIDAD

#define SOIL_CAPACITIVE 34 // Sensor capacitivo EN EL GPIO34
#define RELAY_PIN 26      // Pin que controla el relé EN EL GPIO26

// PARÁMETROS PARA ACCIONAMIENTO DE LA ELECTROVÁLVULA
#define LIGHT_THRESHOLD 30 // 30 lux para que se accione de noche
#define SOIL_THRESHOLD 30  // 30% humedad en el suelo, sujeto a ajuste

// Estados de la electroválvula
bool valveState = false;
bool manualMode = false;

void setup() {
    Serial.begin(115200); // verificar monitor serial esté en esta frecuencia para corroborar

    // Iniciar Blynk + Wifi
    Blynk.begin(BLYNK_AUTH_TOKEN, ssid, pass);

    // Iniciar I2C y sensor BH1750
    Wire.begin(21, 22); // SDA=21, SCL=22 en ESP32
    lightMeter.begin();

    pinMode(SOIL_CAPACITIVE, INPUT);
    pinMode(RELAY_PIN, OUTPUT);

    digitalWrite(RELAY_PIN, LOW); // Relé apagado al inicio
    Serial.println("Sistema de riego con Blynk iniciado");
}

void loop() {
    Blynk.run(); // Mantiene conexión con Blynk

    if (!manualMode) {
        // SOLO corre la lógica automática si NO se encuentra en modo manual
        float lux = lightMeter.readLightLevel();
        int soilCapRaw = analogRead(SOIL_CAPACITIVE);
    }
}
```

```
int soilCapPercent = map(soilCapRaw, 4095, 0, 0, 100);

Serial.print("Lux: "); Serial.print(lux); Serial.println(" lx");
Serial.print("Humedad capacitiva: "); Serial.print(soilCapPercent); Serial.println("%")

// ===== Lógica nocturna =====
if (lux < LIGHT_THRESHOLD) {
  if (!valveState && (soilCapPercent < SOIL_THRESHOLD)) {
    digitalWrite(RELAY_PIN, HIGH);
    valveState = true;
    Serial.println("Válvula ABIERTA (inicio de riego nocturno)");
  }
} else {
  digitalWrite(RELAY_PIN, LOW);
  valveState = false;
  Serial.println("Válvula CERRADA");
}

// Enviar datos a Blynk
Blynk.virtualWrite(V0, soilCapPercent);
Blynk.virtualWrite(V1, lux);
Blynk.virtualWrite(V2, valveState ? 1 : 0);
}

delay(5000); // actualiza dato cada 5 segundos
}

// ===== BOTÓN MANUAL EN BLYNK (V4) =====
BLYNK_WRITE(V4) {
  int pinValue = param.asInt();
  if (pinValue == 1) {
    manualMode = true;
    digitalWrite(RELAY_PIN, HIGH);
    valveState = true;
    Serial.println("Modo MANUAL: riego ON");
  } else {
    manualMode = false;
    digitalWrite(RELAY_PIN, LOW);
    valveState = false;
    Serial.println("Modo AUTOMÁTICO reactivado");
  }
}
}
```

Apéndice B

Anexos

B.1. Mediciones diurnas

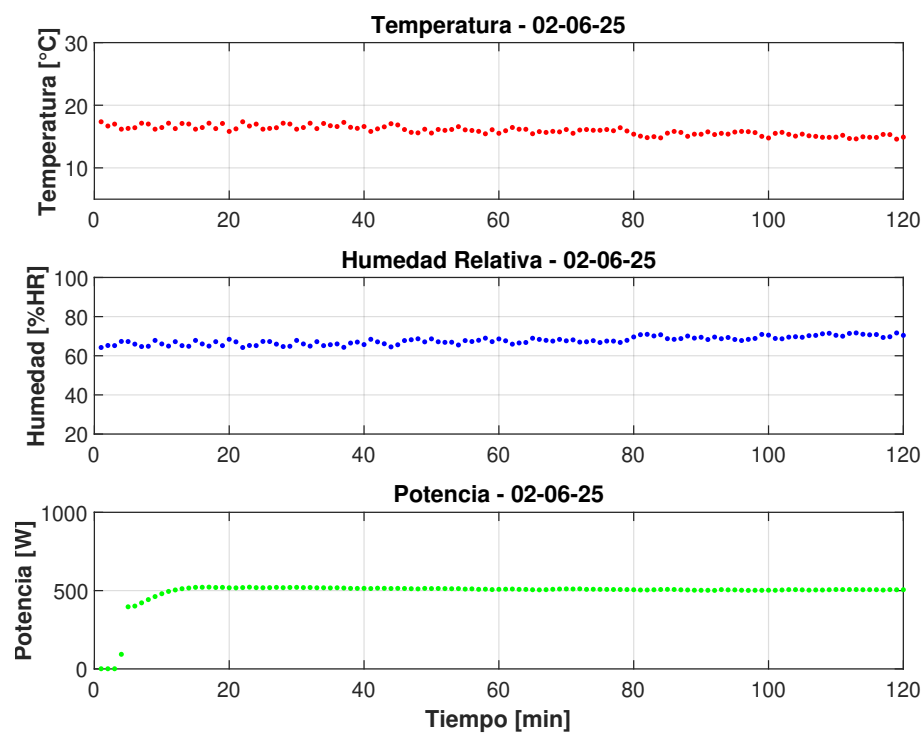


Figura B.1: Medición diurna: 02-06-25

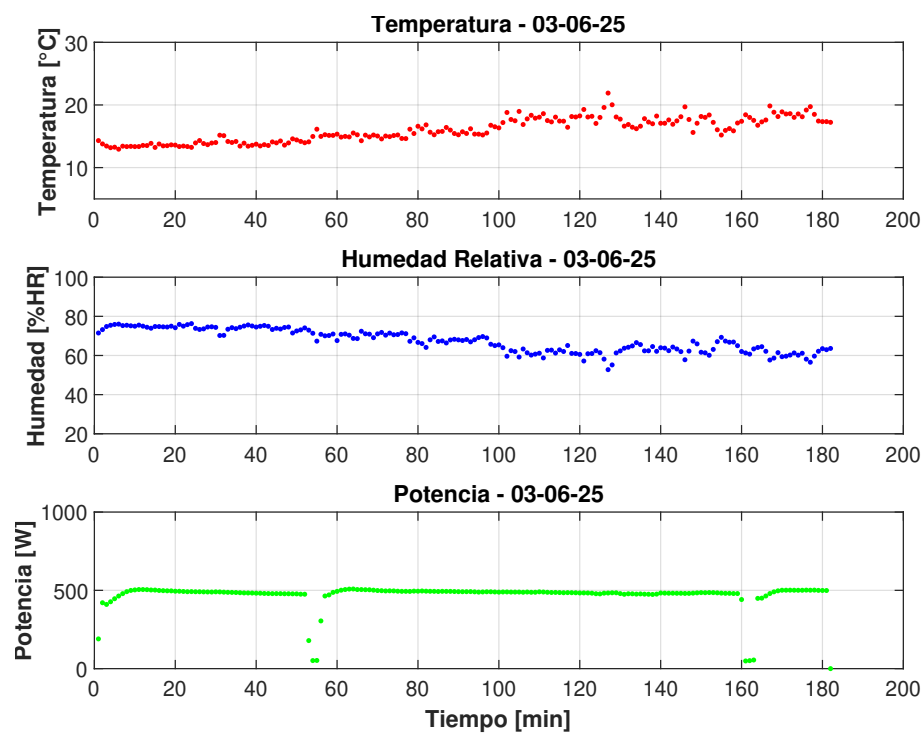


Figura B.2: Medición diurna: 03-06-25

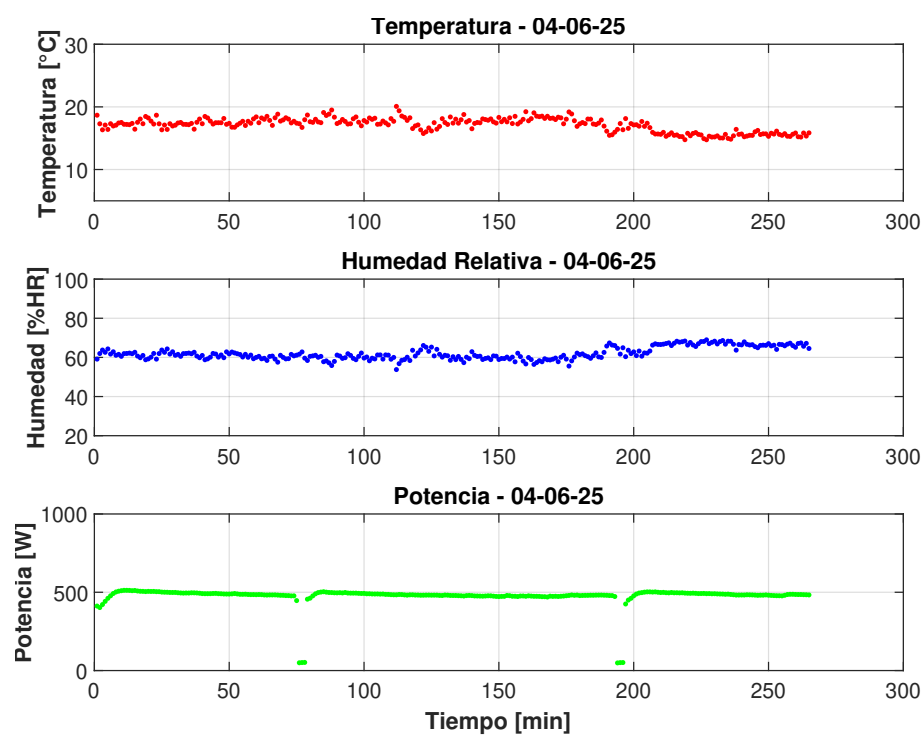


Figura B.3: Medición diurna: 04-06-25

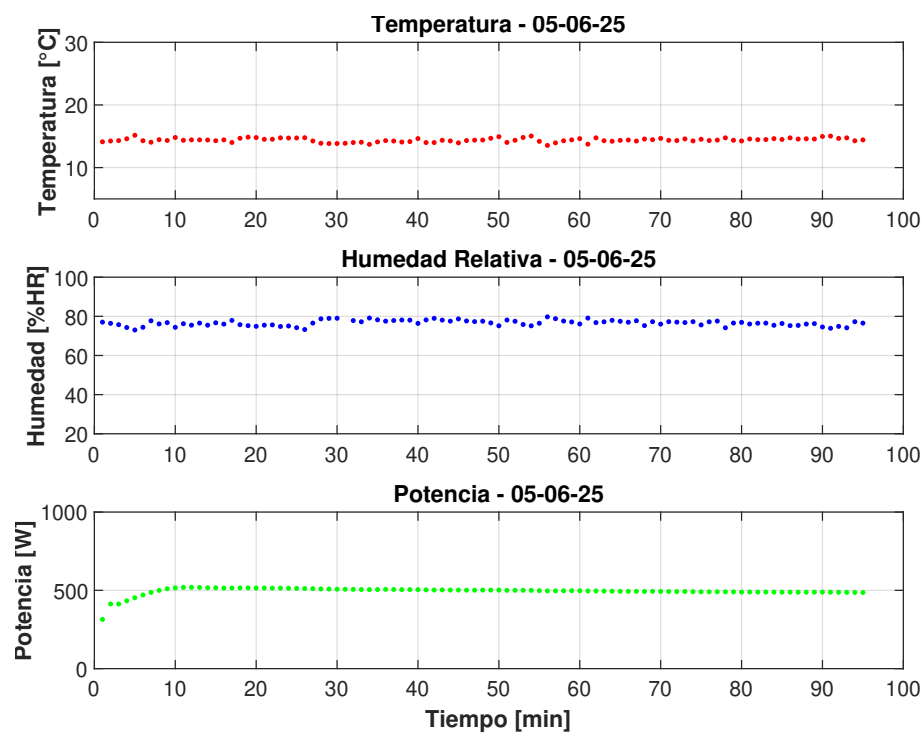


Figura B.4: Medición diurna: 05-06-25

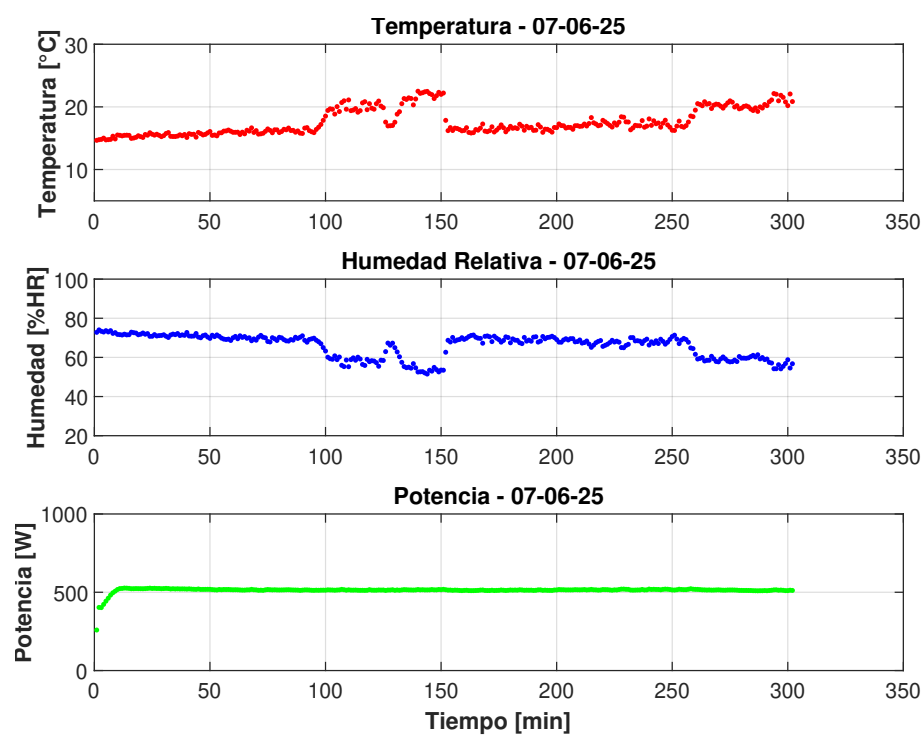


Figura B.5: Medición diurna: 07-06-25

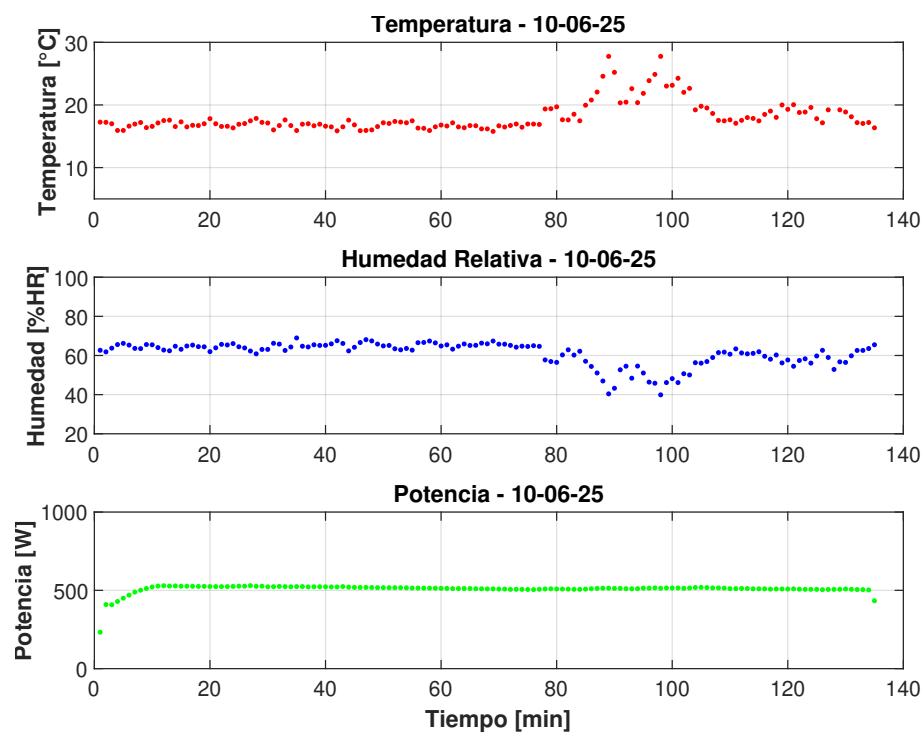


Figura B.6: Medición diurna: 10-06-25

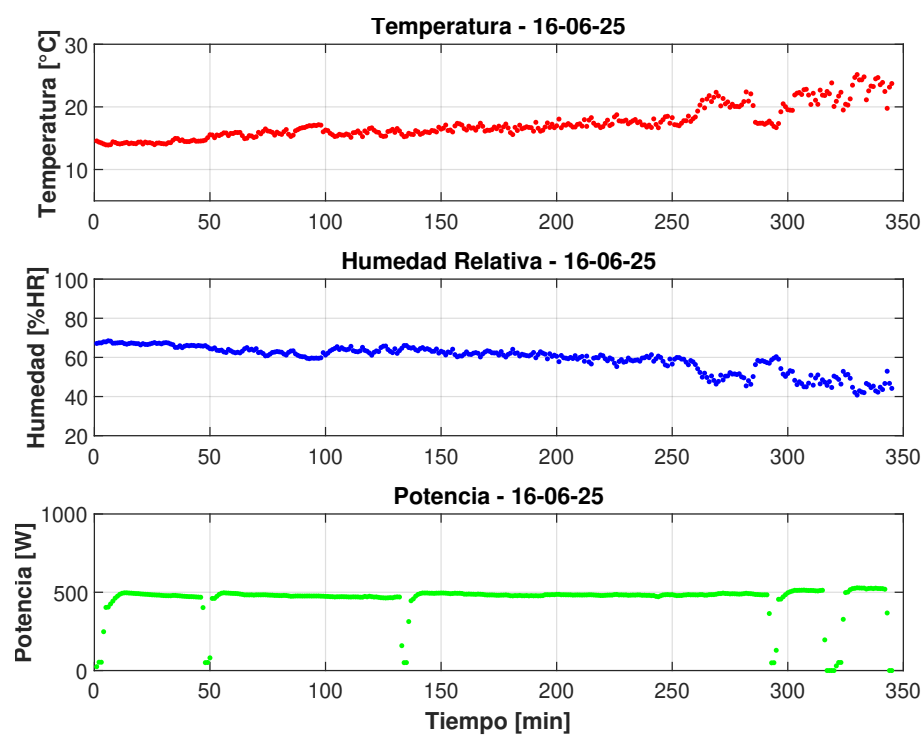


Figura B.7: Medición diurna: 16-06-25

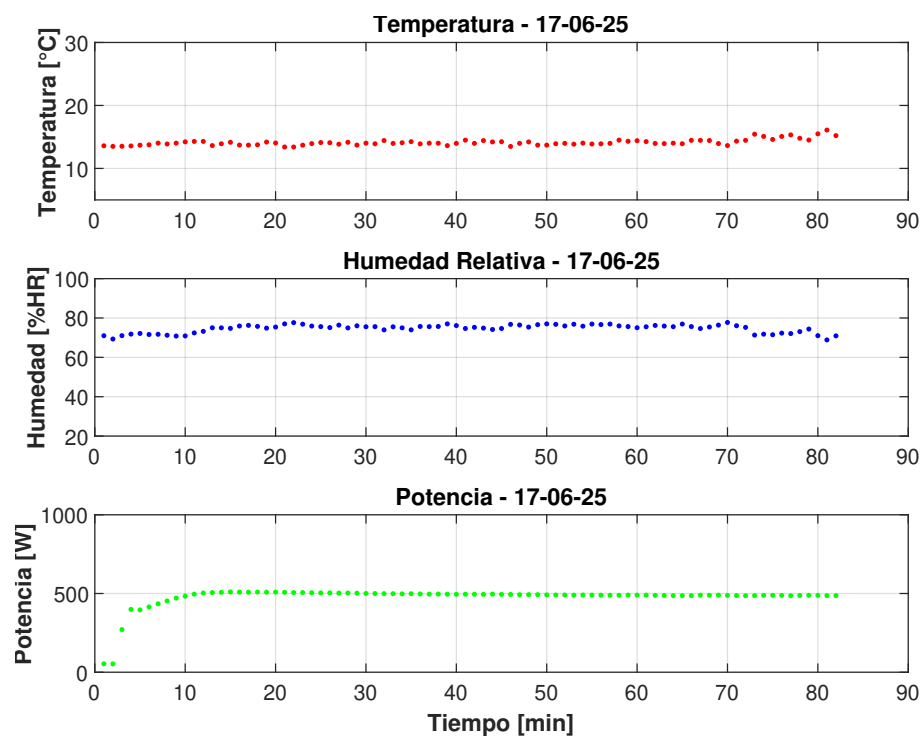


Figura B.8: Medición diurna: 17-06-25

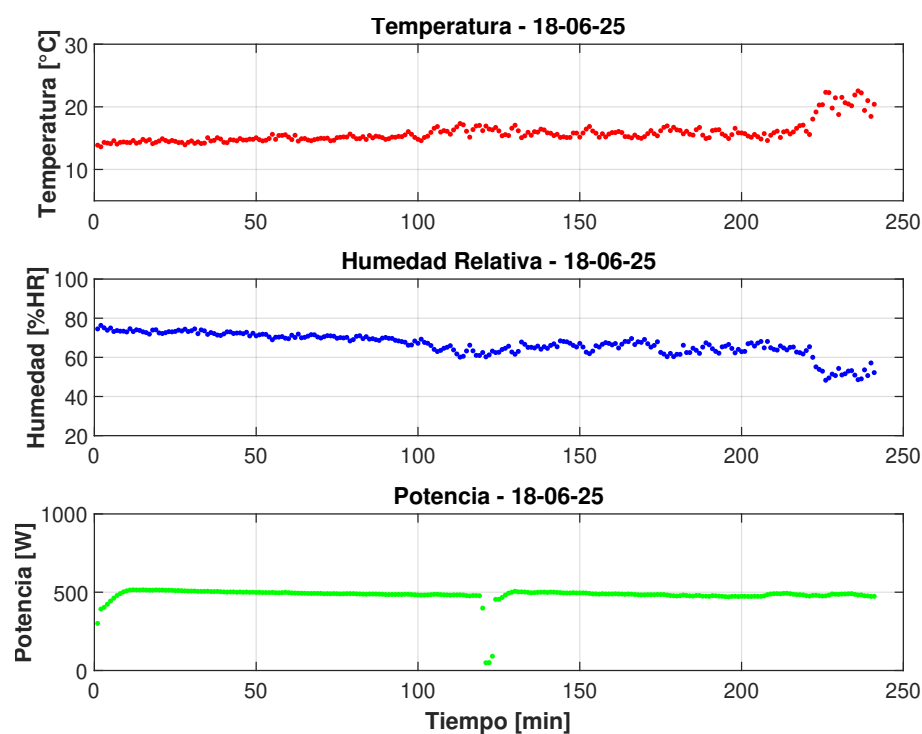


Figura B.9: Medición diurna: 18-06-25

B.2. Mediciones nocturnas

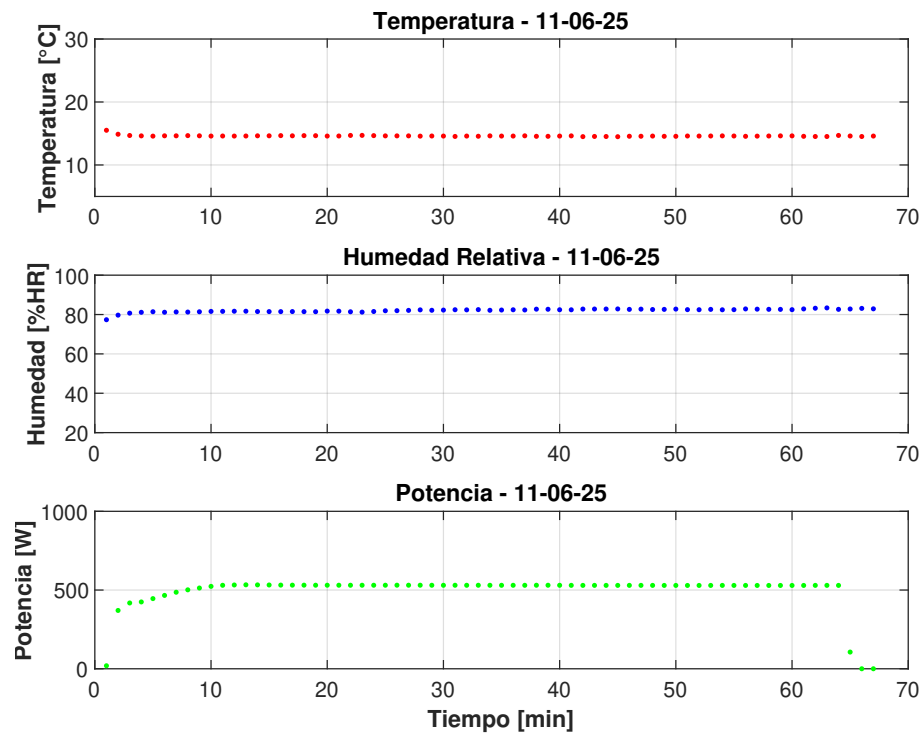


Figura B.10: Medición nocturna: 11-06-25

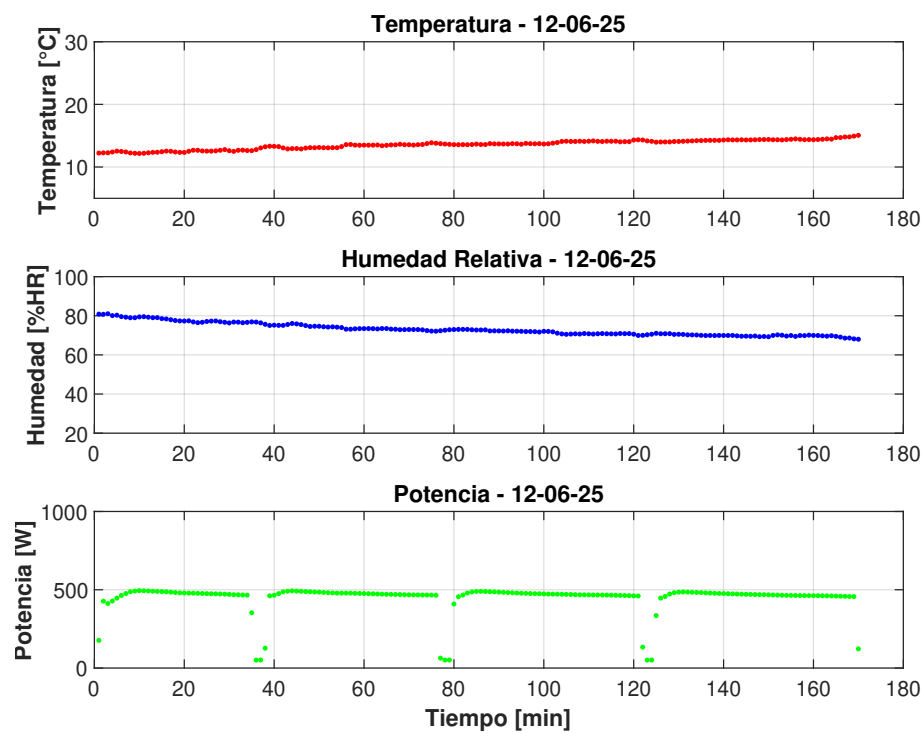


Figura B.11: Medición nocturna: 12-06-25

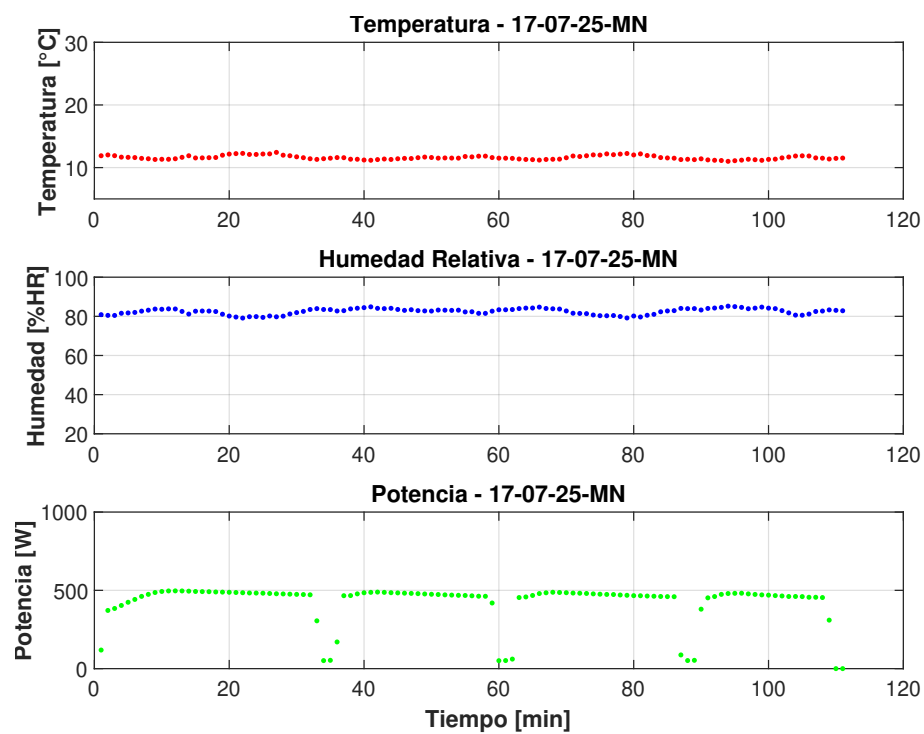


Figura B.12: Medición nocturna: 17-07-25

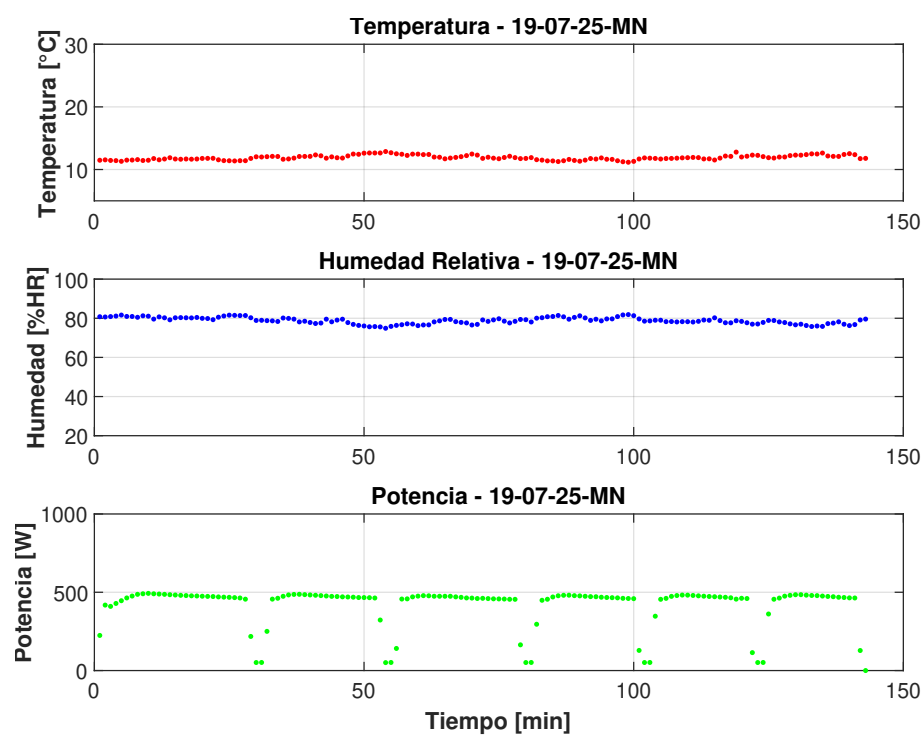


Figura B.13: Medición nocturna: 19-07-25

B.2.1. Mediciones con red estable

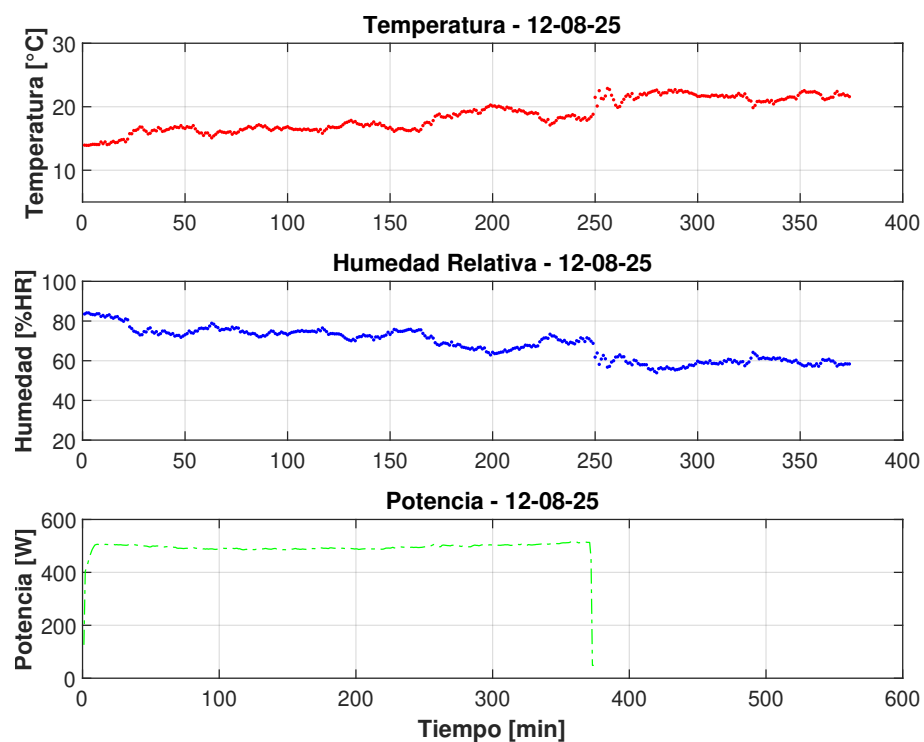


Figura B.14: Medición preliminar diurna: 12-08-25

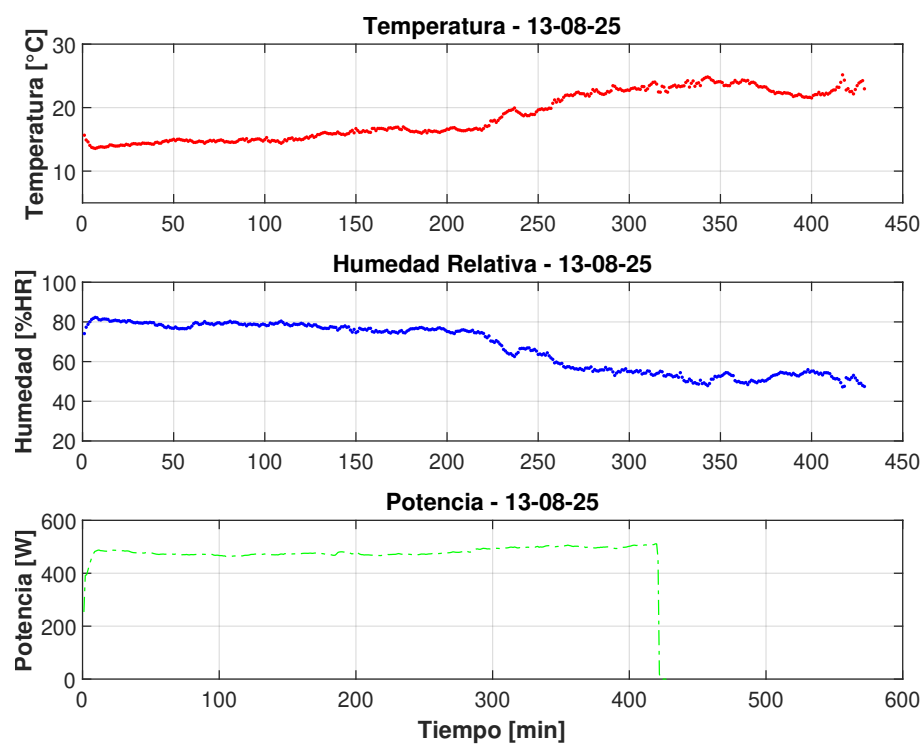


Figura B.15: Medición preliminar diurna: 13-08-25

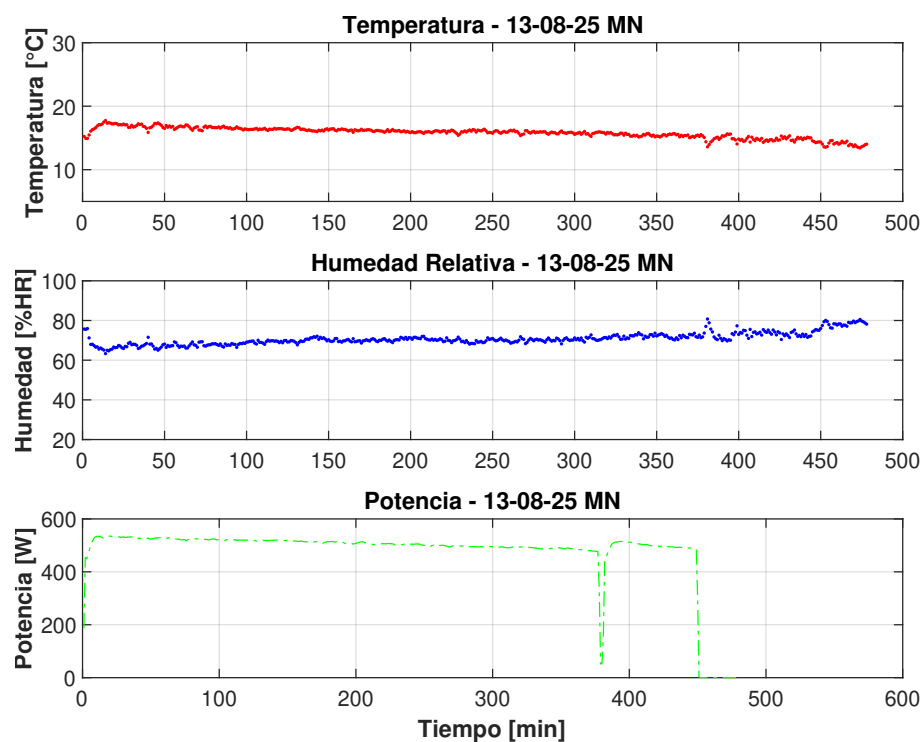


Figura B.16: Medición preliminar nocturna: 13-08-25

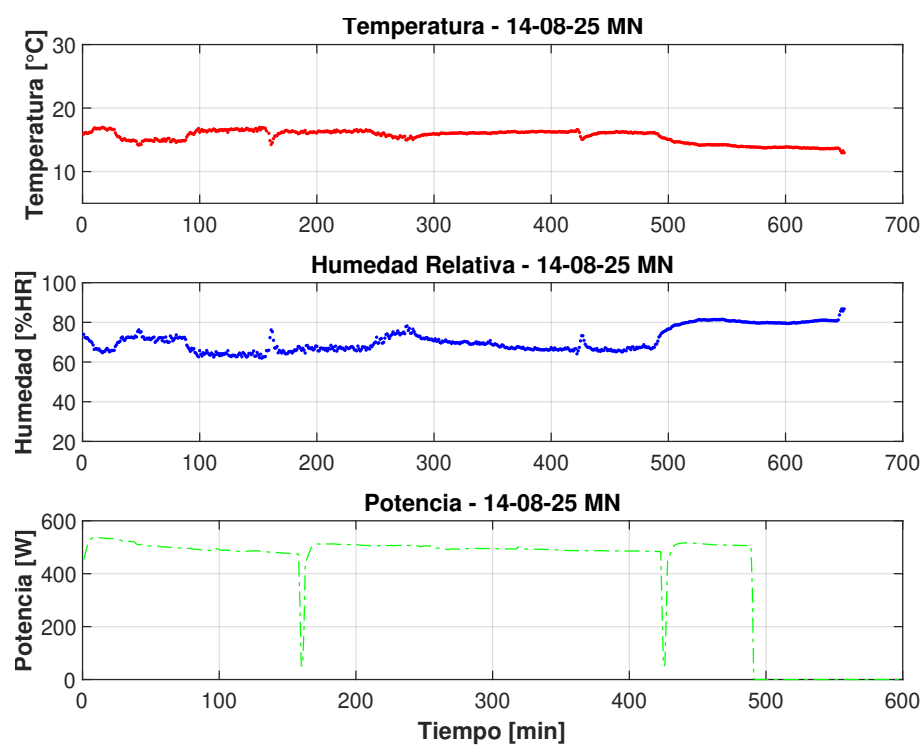


Figura B.17: Medición preliminar nocturna: 14-08-25

Bibliografía

- [1] G. M. del Sistema de las Naciones Unidas (SNU), *Escasez hídrica en Chile: Desafíos Pendientes*, Febrero, 2021.
- [2] F. T. C. I. Agrónomo, *Estrategia de riego para mitigar el estrés hídrico en olivos cultivados en Taltal, Desierto de Atacama*, 2018.
- [3] O. de las Naciones Unidas, *ONU. (2015). Objetivo de desarrollo sostenible 6: Agua limpia y saneamiento*. 2015.
- [4] P. Kubalík, S. Mišák, J. Stuchlý y J. Vramba, “Techno-economic analysis of different battery storage suitable for Off-Grid systems,” *Proceedings of the 2014 15th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE)*, págs. 385-390, 2014.
- [5] A. Fattah, M. A. Kashem y M. J. Islam, “Time Reduction of Deep Cycle Lead Acid Battery Negative Plate Curing Process by Changing Curing Parameters,” *Proceedings of the 2019 4th International Conference on Electrical Information and Communication Technology (EICT)*, págs. 1-6, 2019.
- [6] I. M. de Taltal, “PLADECO Taltal,” *Plan de Desarrollo Comunal*, pág. 6, 2015.
- [7] R. d. A. Comuna de Taltal, *Plan de Acción de Innovación Agraria*, 2017.
- [8] F. Tapia, *Boletín INIA N° 423*, 2017.
- [9] F. T. C., F. M. A., P. H. P., R. A. P. y C. M. M., “Estrategia de riego para mitigar el estrés hídrico en olivos cultivados en Taltal, Desierto de Atacama,” *Boletín INIA*, vol. N° 392, pág. 63, 2019.
- [10] I. Chile, *Plan de Innovación Agraria*, 2017.
- [11] J. A. C. Dellepiane, “Los Hijos de la Camanchaca: la ‘otra’ historia-prehistoria de la costa del Desierto de Atacama,”
- [12] Charmex, “Guía en soluciones de deshumidificación: Tipos de deshumidificadores y aplicaciones,” *Sitio web de Charmex*, s.f. Recuperado el 20 de febrero de 2025 de <https://charmex.info/es/articulo/guia-en-soluciones-de-deshumidificacion-tipos-de-deshumidificadores-y-aplicaciones>.
- [13] Trotec Comercio S.L., *Deshumidificación: Guía de Conocimiento Práctico*, Disponible en: <https://www.trotec.com/es/> [Consultado: julio 2025], Madrid, España, 2025.
- [14] Trotec GmbH, *Instrucciones Deshumidificador TTK 96 E / TTK 127 E*, Disponible en: <https://hub.trotec.com/?id=42501>, Trotec GmbH, Heinsberg, Alemania, 2022.

- [15] M. Electronics, “DHT11 Humidity Temperature Sensor,” vol. 3,
- [16] C. T. Vázquez, “Instalaciones Solares Fotovoltaicas,” pág. 10, 2011.
- [17] J. H. Juan José Astudillo José Fuster, D. Jara, I. Jofré, C. L. d. L. Miguel López, J. Rosas y J. Vergara, *Sistemas de almacenamiento con energía solar fotovoltaica en Chile*, 2020.
- [18] O. L. R., C. M. P., J. C. U. et al., “Manual: Sistemas de Riego y Manejo Hídrico de Cultivos,” *Programa de Capacitación y Transferencia Tecnológica en Riego para Pequeños Agricultores en las Regiones del Biobío y La Araucanía*, pág. 5, 2021.
- [19] Wikipedia contributors, “Surface irrigation,” *Wikipedia, The Free Encyclopedia*, 2025, Retrieved July 2025, from https://en.wikipedia.org/wiki/Surface_irrigation.
- [20] Wikipedia contributors, “Riego por aspersión,” *Wikipedia, La enciclopedia libre*, 2025, Consultado el 8 de julio de 2025, de https://es.wikipedia.org/wiki/Riego_por_aspersi3n.
- [21] M. Abbasi, L. Li, F. Wang et al., “A New Dual-Purpose Flyback-based DC–DC/AC Converter with Dynamic Voltage Gain,” *2024 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, págs. 366-369, 2024.
- [22] M. Kumar, G. Panda y D. V. S. K. R. Rao K, “Analysis of Conventional and Interleaved Boost Converter with Solar Photovoltaic System,” *2022 International Conference on Intelligent Controller and Computing for Smart Power (ICICCSP)*, págs. 1-6, 2022.
- [23] F. G. D’Angiolo y J. G. Zola, “Procedimiento para el modelado de un convertidor Boost para UPS mediante variables de estado,” *Revista Elektron*, vol. 5, n.º 1, págs. 1-6, 2021, Licencia Creative Commons CC BY-NC-ND 4.0, ISSN: 2525-0159. DOI: [10.37537/rev.elektron.5.1.122.2021](https://doi.org/10.37537/rev.elektron.5.1.122.2021). dirección: <http://elektron.fiuba.ar>.
- [24] N. Mohan, *Electronica de potencia : convertidores, aplicaciones y diseño*. McGraw-Hill/Interamericana, 2008.