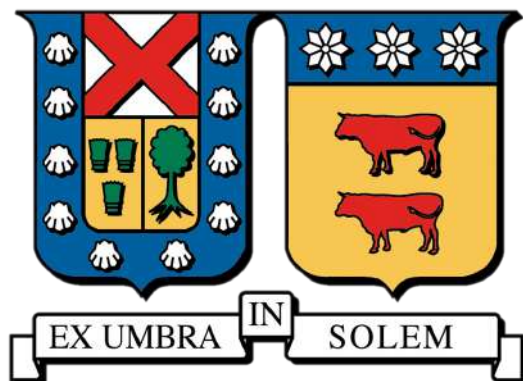


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA Y AMBIENTAL



"DISEÑO, SIMULACIÓN Y EVALUACIÓN DE UN PROTOTIPO HÍBRIDO DE
CAPTACIÓN DE AGUA ATMOSFÉRICA ALIMENTADO CON ENERGÍAS
RENOVABLES PARA ABASTECIMIENTO EN ZONAS REMOTAS"

CARLOS ANDRÉS CALVENTUS CONTRERAS

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL QUÍMICO

Guía: Danilo Carvajal
Co-referente: Paula Guerra

JULIO - 2026



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

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

Título del trabajo: Diseño, Simulación y Evaluación de un Prototipo Híbrido de Captación de Agua Atmosférica Alimentado con Energías Renovables para Abastecimiento en Zonas Remotas

Nombre del candidato(a): Carlos Andrés Calventus Contreras

Carrera / Grado: Ingeniería Civil Química

Campus: Casa Central Departamento: Química y Ambiental

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Danilo Carvajal, 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: 25-08-2026 Firma: _____

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 25-08-2026 Firma: _____

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

Resumen

El presente trabajo de título propone el diseño, simulación y evaluación tecno-económica de un prototipo híbrido de captación de agua atmosférica, concebido para el abastecimiento hídrico en zonas remotas afectadas por la escasez. Tomando como caso de estudio la localidad de El Sarco (Región de Coquimbo, Chile), el sistema integra dos tecnologías complementarias para alcanzar una meta de producción de 100 L/día: la captación activa de niebla, mediante un ventilador que fuerza el flujo de aire a través de un banco tridimensional de filamentos, y la condensación de rocío, operada bajo un ciclo térmico de compresión de vapor. Para garantizar su autonomía off-grid, se dimensionó un sistema de alimentación basado en energías renovables.

La validación técnica se realizó mediante modelado termodinámico y fluidodinámico, evaluando el desempeño del equipo con datos meteorológicos reales durante un periodo de 227 días. Los resultados indican que el sistema híbrido alcanza una recolección promedio de 99,8 L/día (22.645 litros totales), cumpliendo satisfactoriamente con la demanda de diseño. Energéticamente, el prototipo presentó un Consumo Específico de Energía (SEC) global de 0,15 kWh/L, destacando la recolección de niebla (0,10 kWh/L) como el proceso de menor consumo frente a la condensación de rocío (0,35 kWh/L).

Desde la perspectiva financiera, la evaluación del proyecto proyectada a 20 años determinó un Costo Nivelado del Agua (LCOW) de 119 CLP/L para el equipo integrado. Adicionalmente, el estudio presenta un análisis de ambas tecnologías operando por separado para evaluar su impacto individual. Si bien el costo es mayor al suministro por camiones aljibe, el sistema propuesto destaca como una solución alternativa caracterizada por su capacidad de generación en terreno. Esta autonomía operativa permite asegurar el abastecimiento de agua de manera estable, ofreciendo una eficiencia energética competitiva para las necesidades de comunidades remotas.

Abstract

This degree project proposes the design, simulation, and techno-economic evaluation of a hybrid atmospheric water harvesting prototype, designed to provide water in remote areas affected by water scarcity. Using the town of El Sarco (Coquimbo Region, Chile) as a case study, the system integrates two complementary technologies to achieve a production target of 100 L/day: active fog harvesting, which utilizes a fan to force airflow through a three-dimensional filament bank, and dew condensation, which operates on a vapor compression thermal cycle. To ensure off-grid autonomy, a renewable energy-based power supply system was sized.

Technical validation was conducted through thermodynamic and fluid dynamic modeling, evaluating the equipment's performance using real meteorological data over a 227-day period. The results indicate that the hybrid system achieves an average collection rate of 99.8 L/day (22,645 liters in total), satisfactorily meeting the design demand. In terms of energy, the prototype presented an overall Specific Energy Consumption (SEC) of 0.15 kWh/L, with fog collection (0.10 kWh/L) standing out as the more energy-efficient process compared to dew condensation (0.35 kWh/L).

From a financial perspective, the project evaluation, projected over a 20-year lifespan, determined a Levelized Cost of Water (LCOW) of 119 CLP/L for the integrated system. Additionally, the study presents an analysis of both technologies operating independently to assess their individual impacts. While the cost exceeds that of truck-based water supply, this system provides a practical alternative through its ability to generate water on-site. This operational independence ensures a reliable supply, providing competitive energy efficiency tailored to the needs of remote areas.

*«Caminante, no hay camino,
se hace camino al andar».*

— Antonio Machado

Agradecimientos

Es imposible resumir en unas pocas líneas la inmensa gratitud que siento hacia todas las personas que me han acompañado, motivado, ayudado e incluso levantado durante estos casi siete años de carrera. Si tuviera que nombrar a cada uno de los que aportaron su grano de arena para llegar a este punto final, necesitaría la misma cantidad de páginas que tiene este informe. A todos ustedes, infinitas gracias. A continuación, quisiera mencionar a quienes han sido los pilares fundamentales de este proceso.

Primero, a las constantes inigualables de mi vida: mi familia. A mi mamá y a mi papá, por ser mi base incondicional. A mi hermanos David, Eloi, Taís y a mis primos Mendez por darme su cariño, tantas risas y enseñanzas. A mi abuelo Avi y primo Jay, quienes fueron toda mi familia en 2025.

Un agradecimiento especial a María Contreras y Hugo Alarcón, quienes fueron mi refugio en Valparaíso y siempre estuvieron dispuestos a tenderme una mano en lo que necesitara. Asimismo, a mi primo Tomás, gracias por acompañarme por Discord en todas esas noches de informes.

A mis compañeros y amigos de universidad, los verdaderos protagonistas que hicieron posible que continuara y disfrutara este camino: Francisco, Jason, Javi, Fabi, Pipe, Rafa, Sofi, Vicky, Eve, Enzo, Johan, Tamy, Belén, Jo, Fran, Trini, Nicolas(es), Jabz, y Vale. Ustedes fueron lo más importante y lo que atesoraré por siempre de mi paso por la universidad. Sin duda alguna, serán un tremendo aporte para este mundo.

A mis amigos de Antofagasta, que me me hicieron mantener siempre un pie en el norte. Gracias por recordarme que las verdaderas amistades no se pierden con el tiempo ni con los cambios. Gracias Wiro, Seba, Andrés, Pato, Jairo, Jorge, Chamorro, Anto, Felipe y Nicolás.

A quienes vivieron conmigo esa experiencia que me hizo querer ampliar mis horizontes hacia el futuro, demostrándome que se pueden formar amistades profundas en muy poco tiempo. A mi familia del intercambio en Portugal: Vicente, Sebastián, Álvaro, Juan, Tomy, Valeria, Pam, Yaisa, Lorenzo, Lucca, Arturo, Sara, Isco, Stella, los Letonianos y Momi. Gracias infinitas por introducirme a las puertas del mundo.

He tenido la suerte de que todas estas personas, y muchas más, influyeran en mi vida. Solo espero, con el mismo cariño y dedicación, haber aportado en ellas mismas.

*"Out beyond ideas of wrongdoing and rightdoing,
there is a field. I'll meet you there"*

— Rūmī

Tabla de Contenidos

1	Introducción	1
2	Objetivos y Alcances	2
2.1	Objetivo General	2
2.2	Objetivos Específicos	2
2.3	Alcances y limitaciones	3
3	Marco Teórico	4
3.1	Fuentes de Agua Atmosférica	4
3.1.1	La Niebla	4
3.1.2	Condensación de Rocío	6
3.2	Propiedades del Aire Húmedo	7
3.2.1	Presión de Vapor y Saturación	7
3.2.2	Humedad Relativa y Absoluta	7
3.2.3	Temperatura de Punto de Rocío	8
3.2.4	Termodinámica de la Condensación	8
3.3	Microfísica de la Niebla	9
3.3.1	Contenido de Agua Líquida (LWC)	9
3.3.2	Eficiencia de Captación	9
3.4	Sistemas de Captación de Niebla	10
3.4.1	Sistemas de Captación Pasiva de Niebla	11
3.4.2	Sistemas de Captación Activa de Niebla	11
3.5	Sistemas de Captación de Rocío	12
3.5.1	Sistemas de Captación Pasiva de Rocío	12
3.5.2	Sistemas de Captación Activa de Rocío	13
4	Metodología	15
4.1	Condiciones de Operación y Datos Meteorológicos	15

4.1.1	Elección de la Zona Remota Representativa	15
4.1.2	Base de Datos y Variables Meteorológicas	16
4.1.3	Estimación del Contenido de Agua Líquida (LWC)	17
4.2	Dimensionamiento de la Producción Hídrica Total	18
4.3	Modelamiento Matemático de los Subsistemas	18
4.3.1	Subsistema de Captación Activa de Niebla	19
4.3.2	Subsistema de Condensación por Compresión de Rocío	23
4.3.3	Metodología del Sistema de Condensación Activa	24
4.4	Sistema de Alimentación Energética	27
4.4.1	Metodología de Dimensionamiento del Sistema Fotovoltaico	28
4.4.2	Evaluación y Dimensionamiento del Sistema Eólico	29
4.4.3	Estrategia de Control y Gestión Energética	30
4.4.4	Dimensionamiento del Sistema de Almacenamiento Energético	31
5	Resultados	32
5.1	Análisis de Resultados Técnicos	32
5.1.1	Análisis de Variables Ambientales del Emplazamiento	32
5.1.2	Resultados del Dimensionamiento de los Subsistemas	35
5.1.3	Resultados del Dimensionamiento Energético	39
5.1.4	Rendimiento Hídrico	41
5.1.5	Desempeño Energético	42
5.1.6	Diagrama de Flujo de Procesos (PFD) del Sistema	46
5.2	Análisis de Resultados Económicos	47
5.2.1	Costos de Inversión (CAPEX)	47
5.2.2	Costos Operacionales (OPEX)	49
5.2.3	Costo Nivelado del Agua (LCOW)	50
5.2.4	Análisis de Sensibilidad Económica: Sistemas Aislados	51
5.2.5	Análisis Competitivo del Costo Hídrico	52
5.2.6	Costo Nivelado de la Energía (LCOE)	53
6	Conclusiones y Recomendaciones	55
6.1	Conclusiones	55
6.2	Recomendaciones	56
	Financiamiento y Origen de Datos	57
	Referencias	58

A	Código Fuente de los Modelos Matemáticos y Simulación	I
A.1	Módulo Aerodinámico y Pérdidas de Carga	I
A.2	Módulo de Transferencia de Calor y Masa (Wang, 2000)	II
A.3	Lazo Numérico de Simulación y Balance Energético	III
B	Especificaciones Técnicas de Equipos Comerciales	V
B.1	Subsistema Frigorífico de Condensación	V
B.2	Subsistema de Generación y Almacenamiento Eléctrico	VI
B.3	Estructura y Alojamiento de Equipos	VII
C	Datos Meteorológicos y Parámetros de Simulación	VIII
C.1	Irradiancia Solar Incidente	VIII
C.2	Serie Temporal de Datos Meteorológicos	VIII

Lista de Tablas

4.1	Formato de la base de datos meteorológica para el sitio de El Sarco (período 2016-2017).	17
4.2	Comparación entre el contenido de agua líquida (LWC) empírico y el estimado teóricamente.	18
4.3	Dimensionamiento comparativo de la producción hídrica diaria.	19
4.4	Parámetros definidos para el algoritmo de captación de niebla.	22
4.5	Parámetros geométricos fijos del intercambiador de calor.	25
4.6	Parámetros adoptados para la corrección del perfil logarítmico de velocidad del viento.	29
5.1	Resumen de parámetros de diseño y resultados del dimensionamiento del sistema fotovoltaico (Off-Grid).	40
5.2	Parámetros técnicos y de diseño del sistema de generación eólica y almacenamiento.	41
5.3	Resumen de requerimientos eléctricos y consumo máximo del sistema híbrido.	42
5.4	Resultados del Consumo Específico de Energía (SEC) por módulo y global	46
5.5	Estimación de Costos Directos del Sistema Eólico mediante Factores de Lang	48
5.6	Estimación de Costos Directos del Subsistema de Niebla Activa	48
5.7	Estimación de Costos Directos del Subsistema de Condensación de Rocío	49
5.8	Estimación de Costos Operacionales y de Mantenimiento (OPEX) Anuales	50
5.9	Análisis comparativo de indicadores económicos, almacenamiento y capacidad productiva anualizada según configuración operativa.	52
5.10	Análisis comparativo de costos unitarios de suministro hídrico.	53
5.11	Comparativa del Costo Nivelado de la Energía (LCOE) según capacidad del aerogenerador evaluado con energía generada y consumida.	54
B.1	Especificaciones técnicas del motocompresor Danfoss VTZ038.	VI
B.2	Especificaciones técnicas del aerogenerador Bornay Wind+.	VI
B.3	Especificaciones técnicas del banco de almacenamiento LiFePO4.	VII
B.4	Especificaciones técnicas del gabinete autosoportado TIBOX.	VII

C.1	Promedio mensual de irradiancia solar incidente (NASA POWER, 2001-2020) para El Sarco.	VIII
C.2	Base de datos meteorológica horaria utilizada en la simulación dinámica.	IX

Lista de Figuras

3.1	Esquema de formación de niebla de advección al desplazarse aire cálido y húmedo sobre una corriente fría. (Generada con Inteligencia Artificial)	5
3.2	Formación de niebla orográfica forzada por el ascenso topográfico (Generada con Inteligencia Artificial)	5
3.3	Rocío en la naturaleza mediante condensación pasiva (Portillo, 2024).	6
4.1	Ubicación geográfica y área de los sistemas de referencia en El Sarco, Región de Coquimbo, Chile (Google Maps, 2026).	16
4.2	Esquema del arreglo escalonado de los filamentos en el banco de mallas (Regalado, 2022).	21
4.3	Curva de potencia del aerogenerador comercial seleccionado de 3.000 W (Bornay, 2020).	30
5.1	Perfil temporal de la humedad relativa promedio (00:00 - 08:00 hrs) para el periodo de evaluación.	33
5.2	Perfil temporal de la temperatura ambiente promedio (00:00 - 08:00 hrs) para el periodo de evaluación.	33
5.3	Comparación temporal entre la velocidad del viento medida en terreno (1,5 metros) y la velocidad ajustada (10 metros) mediante el perfil logarítmico para el periodo de estudio.	34
5.4	Perfil temporal del Contenido de Agua Líquida (LWC) estimado a lo largo del periodo de estudio.	35
5.5	Evolución del coeficiente de pérdida de presión de Gaddis (ζ) en función de la velocidad del aire para la configuración geométrica seleccionada ($n_R = 5$, $d = 1,1$ mm, $S_y = 2,8$ mm, $S_x = 5,0$ mm).	36
5.6	Relación entre la velocidad del aire y la caída de presión aerodinámica total ($\Delta P_{sistema}$) a través de los filamentos del colector.	37

5.7	Curva de optimización de la velocidad del aire inducido para el módulo de niebla activa.	38
5.8	Análisis de sensibilidad térmica: Evaluación de la producción de agua anual en función del área frontal del evaporador operando a potencia constante (1.260 W, COP 4,37).	39
5.9	Evolución del volumen de agua total acumulada por los subsistemas de recolección activa de niebla y condensación de rocío a lo largo del periodo de estudio.	42
5.10	Comportamiento del Consumo Específico de Energía (SEC) para el subsistema de recolección activa de niebla.	43
5.11	Comportamiento del Consumo Específico de Energía (SEC) para el subsistema de condensación de rocío.	44
5.12	Relación entre el Contenido de Agua Líquida (LWC) y el Consumo Específico de Energía (SEC) en el módulo de niebla.	44
5.13	Variación del Consumo Específico de Energía (SEC) del módulo de condensación en función de la Humedad Relativa (HR) ambiental.	45
5.14	Diagrama de Flujo de Procesos (PFD) simplificado del prototipo híbrido de captación de agua atmosférica.	46

Nomenclatura

Símbolo	Significado, unidades
A	Área efectiva de contacto / transversal de captación, m ²
a	Espaciamiento transversal, adimensional ($a = S_y/d$)
$A_{frontal}$	Área frontal activa, m ²
AOM	Costos anuales de operación y mantenimiento, CLP/año
A_{total}	Área superficial total expuesta, m ²
AWY	Volumen de agua promedio producido anualmente, L/año
b	Espaciamiento longitudinal, adimensional ($b = S_x/d$)
C	Capacidad nominal de batería, Ah
$c_{p,a}$	Calor específico a presión constante del aire, J/(kg·K)
CRF	Factor de recuperación de capital, adimensional
D	Diámetro necesario del módulo recolector, m
d	Diámetro del filamento, mm
d_0	Desplazamiento del plano cero, m
D_{AB}	Coefficiente de difusión binaria, m ² /s
D_c	Diámetro del collar del tubo, mm
D_d	Diámetro promedio de la gota, μ m
D_h	Diámetro hidráulico del aire, mm
D_o	Diámetro exterior del tubo, mm
$E_{consumida}$	Energía consumida por el sistema, Wh
$E_{generada}$	Energía generada por el aerogenerador, Wh
E_t	Energía anual generada en el año t , kWh
F_p	Espaciado entre aletas, mm
f_r	Fracción sólida por fila, adimensional
h_c	Coefficiente de transferencia de calor convectivo, W/(m ² ·K)
h_{fg}	Entalpía de vaporización del agua, kJ/kg
h_m	Coefficiente convectivo de masa, m/s
Continúa en la siguiente página...	

Tabla 1 – Continuación de la página anterior

Símbolo	Significado, unidades
HR	Humedad relativa, %
j	Factor de Colburn, adimensional ($j = f(Re_{D_c}, N, F_p, D_c, D_h, P_t)$)
K_i	Coefficiente de pérdida singular, adimensional
k	Constante empírica de von Kármán, adimensional
k_f	Conductividad térmica del fluido, W/(m·K)
l_0	Radio del filamento, mm
LWC	Contenido de agua líquida, g/m ³
$\dot{m}_{\text{agua}}$	Tasa de condensación másica teórica, kg/s
$\dot{m}_{\text{cond}}$	Tasa de condensación real, kg/s
N	Número de filas de tubos, adimensional
n	Vida útil del proyecto, años
n_R	Número de capas (filas) del banco de mallas, adimensional
NTU_m	Número de Unidades de Transferencia másico, adimensional ($NTU_m = \frac{h_m \cdot A_{\text{total}}}{Q_{\text{aire}}}$)
Nu	Número de Nusselt, adimensional ($Nu = j \cdot Re_{D_c} \cdot Pr^{1/3}$)
$OPEX_t$	Costos anuales de operación y mantenimiento en el año t , CLP
$P(v)$	Potencia eléctrica instantánea generada, W
$P_3 \dots P_6$	Exponentes empíricos de la correlación de Wang, adimensionales
P_{atm}	Presión atmosférica local, hPa
$P_{\text{compresor}}$	Potencia eléctrica del compresor, W
$P_{\text{elec,vent}}$	Potencia eléctrica de diseño para el módulo de niebla, W
P_l	Paso longitudinal entre tubos, mm
P_{rel}	Presión atmosférica relativa, hPa
P_{sat}	Presión de vapor de saturación, Pa
P_t	Paso transversal entre tubos, mm
P_{vapor}	Presión parcial de vapor real, Pa
P_{vent}	Potencia ideal mecánica del ventilador, W
Pr	Número de Prandtl, adimensional
Q_{aire}	Caudal volumétrico de aire, m ³ /s
Q_c	Carga térmica convectiva (sensible), W
Q_l	Carga térmica latente, W
$\dot{Q}_{\text{disp}}$	Capacidad frigorífica máxima disponible, W
$\dot{Q}_{\text{lat}}$	Calor latente de condensación, W
$\dot{Q}_{\text{req}}$	Carga térmica total requerida, W
Continúa en la siguiente página...	

Tabla 1 – Continuación de la página anterior

Símbolo	Significado, unidades
$\dot{Q}_{sens}$	Calor sensible de enfriamiento, W
r	Tasa de descuento, adimensional
Re_{D_c}	Número de Reynolds basado en el collar del tubo, adimensional
Re_w	Número de Reynolds del alambre, adimensional
S_x	Separación longitudinal entre filamentos, mm
S_y	Espaciado transversal entre filamentos, mm
Sc	Número de Schmidt, adimensional
Sh	Número de Sherwood, adimensional ($Sh = j \cdot Re_{D_c} \cdot Sc^{1/3}$)
St_k	Número de Stokes, adimensional ($St_k = \frac{\rho_d \cdot D_d^2 \cdot v_{viento}}{18 \cdot \mu \cdot (d/2)}$)
t	Índice temporal (año de operación), años
T_{amb}	Temperatura ambiental, °C
t_{aut}	Autonomía requerida del banco de baterías, h
T_{dp}	Temperatura de punto de rocío, °C
t_{evento}	Tiempo de duración del evento de niebla, s
TI	Inversión total inicial, CLP
T_{min}	Límite inferior de seguridad térmica de la placa, °C
T_{placa}	Temperatura de la placa evaporadora, °C
$T_{superficie}$	Temperatura de la superficie, °C
u^*	Velocidad de fricción característica del flujo, m/s
V	Tensión nominal del banco de baterías, V
V_{acum}	Volumen acumulado en el monitor estándar, L
V_{niebla}	Volumen de agua recolectado por niebla, L
V_{rec}	Volumen total de agua recolectada, L
V_{rocio}	Volumen de agua recolectado por rocío, L
V_{total}	Volumen total consolidado de agua, L
v_{viento}	Velocidad del viento / flujo de aire, m/s
z	Altura de instalación del aerogenerador, m
z_0	Longitud de rugosidad del terreno, m
ΔE	Balance neto de energía, Wh
ΔP_{malla}	Caída de presión a través de la malla, Pa
ΔP_s	Caída de presión singular, Pa
$\Delta P_{sistema}$	Caída de presión aerodinámica total, Pa
δ_f	Espesor de la aleta de aluminio, mm
Continúa en la siguiente página...	

Tabla 1 – Continuación de la página anterior

Símbolo	Significado, unidades
ε_m	Efectividad másica del intercambiador, adimensional
ε_t	Efectividad térmica del intercambiador, adimensional
ζ	Coefficiente de resistencia aerodinámica de Gaddis, adimensional
ζ_{lam}	Componente de fricción laminar, adimensional
ζ_{turb}	Componente de fricción turbulento, adimensional
η_a	Eficiencia aerodinámica, adimensional ($\eta_a = f(\text{porosidad}, v_{viento})$)
η_{coll}	Eficiencia global de recolección, adimensional ($\eta_{coll} = \eta_a \cdot \eta_{imp} \cdot \eta_d$)
η_{cyl}	Eficiencia de impacto para un cilindro individual, adimensional
η_d	Eficiencia de drenaje, adimensional
η_{imp}	Eficiencia total de impacto del arreglo, adimensional
η_{sis}	Eficiencia global del sistema fotovoltaico, adimensional
η_{sys}	Eficiencia aerodinámica e inercial de recolección pasiva típica, adimensional
η_{vent}	Eficiencia global del conjunto motor-ventilador, adimensional
μ	Viscosidad dinámica del aire, Pa·s
ρ_a	Densidad del aire, kg/m ³
ρ_{agua}	Densidad del agua, g/L
ρ_d	Densidad de la gota de agua, kg/m ³
$\rho_{v,amb}$	Densidad del vapor de agua en el ambiente, kg/m ³
$\rho_{v,placa}$	Densidad del vapor de agua evaluado en la placa, kg/m ³
ω	Humedad absoluta másica teórica, kg _{vapor} /kg _{aire seco}
ω_{amb}	Humedad absoluta másica ambiental, kg _{vapor} /kg _{aire seco}
ω_{placa}	Humedad absoluta de saturación en la placa, kg _{vapor} /kg _{aire seco}
Siglas	Significado
ACFC	<i>Active Cloud/Fog Collector</i>
APR	Agua Potable Rural
AWG	<i>Atmospheric Water Generator</i>
CAPEX	Costos de Inversión Inicial (<i>Capital Expenditure</i>)
CASCC	<i>Caltech Active Strand Cloudwater Collector</i>
COP	Coefficiente de Desempeño (<i>Coefficient of Performance</i>)
DoD	Profundidad de Descarga (<i>Depth of Discharge</i>)
HR	Humedad Relativa
HSP	Horas de Sol Pico
HVLS	Ventiladores de alto caudal y baja velocidad (<i>High Volume Low Speed</i>)
Continúa en la siguiente página...	

Tabla 1 – Continuación de la página anterior

Símbolo	Significado, unidades
LCOE	Costo Nivelado de la Energía (<i>Levelized Cost of Energy</i>)
LCOW	Costo Nivelado del Agua (<i>Levelized Cost of Water</i>)
LFC	<i>Large Fog Collector</i>
LWC	Contenido de Agua Líquida (<i>Liquid Water Content</i>)
MOF	Estructura Metal-Orgánica (<i>Metal-Organic Framework</i>)
MVD	Diámetro Volumétrico Medio (<i>Mean Volume Diameter</i>)
OPEX	Costos Operacionales y de Mantenimiento (<i>Operational Expenditure</i>)
PNFJ	Parque Nacional Fray Jorge
RHNC	Recursos Hídricos no Convencionales
SEC	Consumo Específico de Energía (<i>Specific Energy Consumption</i>)
SFC	Colector de Niebla Estándar (<i>Standard Fog Collector</i>)
SOC	Estado de Carga (<i>State of Charge</i>)
UV	Ultravioleta
VCR	Ciclos de Compresión de Vapor (<i>Vapor Compression Refrigeration</i>)

Capítulo 1

Introducción

La disponibilidad hídrica constituye un factor determinante para el desarrollo socioeconómico y la sostenibilidad ambiental. Sin embargo, el aumento de la demanda asociado a las actividades humanas, acoplado a las tendencias climáticas de largo plazo, ha intensificado el déficit hídrico regional. En el contexto nacional, los registros meteorológicos reportan un déficit pluviométrico sostenido en las últimas décadas en la macrozona centro-norte del país (Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR2), 2023). Esta condición se ve acentuada por un desbalance en la distribución del recurso, donde la zona central concentra aproximadamente el 80% de los usos totales de agua, mientras que dispone de menos del 10% de la escorrentía natural nacional (Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR2), 2023). Esta sobreexplotación, sumada a déficits pluviométricos que superan el 30% en regiones como Coquimbo, consolida un escenario de crisis a largo plazo.

Ante esto, surge la urgencia de desarrollar tecnologías para cosechar Recursos Hídricos No Convencionales (RHNC). Dado que el consumo consuntivo en Chile está dominado por la agricultura (70%) y el agua potable (10%), encontrar fuentes complementarias de agua dulce resulta vital (Fundación Chile, 2018).

Esta investigación se enfoca en los RHNC atmosféricos (niebla y rocío). Su aprovechamiento permite abastecer de manera complementaria a zonas remotas, avanzando hacia la autosuficiencia hídrica. En la zona Centro-Norte del país, la interacción topográfica con las masas de aire húmedo genera nieblas persistentes. No obstante, la captación tradicional mediante mallas pasivas presenta limitaciones de eficiencia y una alta dependencia a las condiciones del viento.

Para superar estas barreras, se propone el desarrollo de un sistema híbrido que combine la captación de niebla con la condensación activa de vapor. Al integrar energías renovables, este prototipo operará como una solución autónoma y sostenible para el abastecimiento continuo en zonas de difícil acceso.

Capítulo 2

Objetivos y Alcances

2.1 Objetivo General

Diseñar, simular y evaluar un prototipo híbrido que combine condensación de vapor de agua y captación de niebla, dimensionado para la producción de agua dulce, operando de manera autónoma con energías renovables.

2.2 Objetivos Específicos

- Modelar los subsistemas de captación de agua atmosférica de forma individual, estableciendo los modelos teóricos de rendimiento para un sistema de recolección de niebla activa (impacto inercial) y un sistema de condensación de vapor de agua mediante el ciclo térmico de compresión de vapor.
- Desarrollar una simulación dinámica del prototipo híbrido para evaluar su rendimiento técnico y producción de agua, utilizando series temporales de datos meteorológicos reales de una zona remota representativa, con el fin de optimizar el dimensionamiento final del sistema.
- Dimensionar los sistemas de generación eléctrica renovable (fotovoltaico y eólico) junto con el almacenamiento de energía mediante baterías, para garantizar el suministro autónomo y la operatividad del prototipo híbrido bajo los requerimientos de carga eléctrica de los subsistemas.
- Determinar los costos de inversión (CAPEX) y de operación (OPEX) del prototipo híbrido, evaluando su competitividad económica frente a sistemas de captación pasiva convencionales mediante el cálculo del Costo Nivelado del Agua (LCOW).

2.3 Alcances y limitaciones

El presente estudio se enmarca en el ámbito del diseño conceptual y la simulación numérica. La evaluación de rendimiento del sistema se basa en los resultados del modelo matemático, el cual se desarrolla bajo un enfoque pseudoestacionario, por lo que no se contempla la resolución de ecuaciones diferenciales para evaluar estados transitorios. Asimismo, el análisis utiliza datos meteorológicos de estaciones de referencia existentes, sin la realización de campañas experimentales para medir variables microfísicas de la niebla.

En cuanto a las delimitaciones técnicas, los componentes del colector se dimensionan de acuerdo con los requerimientos fluidodinámicos y de captura, no incluye cálculos de circuito electrónico de control, de resistencia mecánica, análisis estructural ni la evaluación de los efectos de la corrosión en los materiales seleccionados. El alcance físico del proyecto se restringe a la unidad de captación, por lo tanto, se excluye el diseño de la red de tuberías o canalización externa, así como cualquier proceso de tratamiento o purificación del agua recolectada. Finalmente, el enfoque de la investigación se orienta a analizar la factibilidad técnico-económica de la implementación del sistema híbrido propuesto. Esto permite establecer una base comparativa frente a las tecnologías de captación pasiva convencionales.

Capítulo 3

Marco Teórico

3.1 Fuentes de Agua Atmosférica

En esta sección se exponen con mayor profundidad los fundamentos teóricos de los fenómenos meteorológicos que sustentan y dan paso al trabajo realizado.

3.1.1 La Niebla

La niebla se define meteorológicamente como una nube a nivel de la superficie de la Tierra. Está compuesta por gotas de agua o cristales de hielo, con tamaños que fluctúan entre $2\text{ }\mu\text{m}$ y $50\text{ }\mu\text{m}$. Su formación requiere dos condiciones fundamentales:

- Aire saturado (Humedad Relativa de 100%)
- La presencia de núcleos de condensación (partículas higroscópicas)

Dependiendo del proceso de saturación, existen diferentes tipos de niebla, entre los más comunes que ocurren en Chile se encuentran dos tipos de niebla :

- **Niebla de Advección:** Ocurre por el transporte horizontal de una masa de aire húmeda y relativamente cálida hacia una zona más fría. La Camanchaca es un tipo de niebla de advección que se forma sobre la corriente fría de Humboldt y es transportada por el viento hacia la costa (Montecinos and Carvajal, 2023). Este tipo de niebla se puede observar en la Figura 3.1.

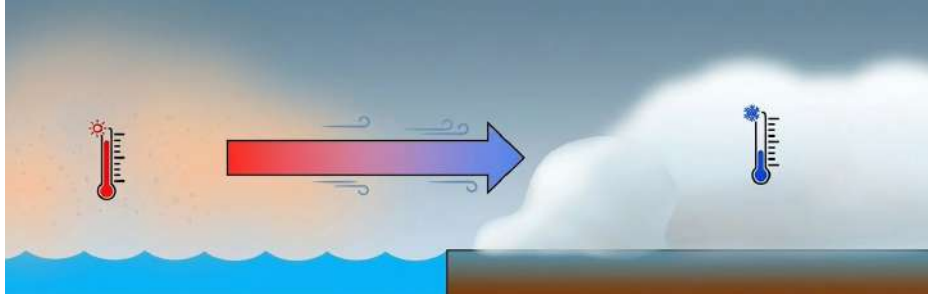


Figura 3.1: Esquema de formación de niebla de advección al desplazarse aire cálido y húmedo sobre una corriente fría. (Generada con Inteligencia Artificial)

- **Niebla Orográfica:** Se forma cuando una masa de aire húmedo es forzada por la topografía a ascender. Al subir, el aire se enfría por expansión adiabática, alcanzando condiciones de saturación. La topografía de la Cordillera de la Costa en la zona Centro-Norte de Chile juega un papel crucial en este tipo de niebla (Montecinos and Carvajal, 2023). Este proceso se observa de manera gráfica en la Figura 3.2.



Figura 3.2: Formación de niebla orográfica forzada por el ascenso topográfico (Generada con Inteligencia Artificial)

Los eventos de niebla son vitales para mantener los oasis de niebla (vegetación de lomas) en zonas áridas y semiáridas de Chile. Por ejemplo, en el Parque Nacional Fray Jorge (PNFJ), se ha estimado que hasta el 75% del agua líquida disponible para la vegetación proviene de la captación de agua de niebla, lo que equivale a una precipitación de 1.000 mm/año (Montecinos and Carvajal, 2023).

3.1.2 Condensación de Rocío

La condensación de rocío es el fenómeno físico mediante el cual el vapor de agua atmosférico pasa directamente a la fase líquida al entrar en contacto con una superficie. Esta transformación de fase se produce cuando la temperatura de dicho sustrato desciende hasta ser igual o inferior a la temperatura del punto de rocío del aire circundante.

El principal mecanismo impulsor de este enfriamiento es la radiación térmica, mediante la cual la superficie emite calor hacia la atmósfera, disminuyendo así su temperatura (Beysens, 2016). Este proceso se ve favorecido durante noches de cielo despejado y bajo condiciones de viento de baja intensidad, minimizando así la transferencia de calor por convección que tendería a calentar la superficie nuevamente. A diferencia de la niebla, en el rocío, tanto el proceso de nucleación como el crecimiento de la gota ocurren directamente sobre una superficie física, tal como se ilustra en la Figura 3.3.

Además de la condensación por radiación térmica, la condensación del vapor atmosférico también se puede producir de manera activa. La condensación activa requiere inyectar energía al sistema para subenfriar una superficie mecánicamente (por ejemplo, mediante un ciclo de refrigeración) (Khalil et al., 2016). Esto permite forzar la extracción de calor sensible y latente del flujo de aire independientemente de las condiciones de enfriamiento radiativo.



Figura 3.3: Rocío en la naturaleza mediante condensación pasiva (Portillo, 2024).

3.2 Propiedades del Aire Húmedo

3.2.1 Presión de Vapor y Saturación

El aire atmosférico se puede modelar como una mezcla de gases ideales compuesta por aire seco y vapor de agua. La presión total ejercida por esta mezcla es la suma de las presiones parciales de sus componentes, de acuerdo con la Ley de Dalton. En este contexto, la presión parcial del vapor de agua es la variable fundamental que determina la cantidad de agua presente en la fase gaseosa.

Existe un límite físico para la cantidad de vapor de agua que el aire puede retener a una temperatura y presión dadas. Este umbral termodinámico se conoce como presión de vapor de saturación. Cuando la presión parcial de vapor iguala a la presión de saturación, se dice que el aire se encuentra saturado, bajo esta condición, cualquier adición extra de vapor o, para el diseño de equipos de condensación, cualquier disminución en la temperatura, resultará en un cambio de fase, es decir, en la condensación del exceso de humedad (Montecinos and Carvajal, 2023).

La presión de saturación depende de la temperatura del aire. Esta relación es de forma exponencial, esto implica que el aire cálido posee una capacidad significativamente mayor para contener agua en estado gaseoso en comparación con el aire frío. Esta dependencia térmica es la base conceptual de los procesos de recolección por compresión de rocío: al forzar la reducción de la temperatura del aire por debajo de su punto de saturación, se reduce su capacidad de retención, obligando al agua a precipitar sobre una superficie condensadora.

3.2.2 Humedad Relativa y Absoluta

A partir de las presiones parciales de la mezcla se definen los parámetros psicrométricos del aire. La Humedad Relativa (HR), expresada en porcentaje, indica la proximidad de una masa de aire a su punto de saturación a una temperatura específica. Una HR alta no equivale directamente a un alto contenido de agua en masa si la temperatura ambiental es baja.

Para cuantificar la masa real de vapor disponible se utiliza la humedad absoluta. Esta magnitud suele expresarse inicialmente como una concentración volumétrica, con valores que varían desde 5 g m^{-3} en zonas desérticas frías hasta 40 g m^{-3} en zonas tropicales (Tu et al., 2018). Para el modelamiento y los balances termodinámicos del presente estudio, esta propiedad se evalúa mediante la Humedad Absoluta másica (ω_{amb}). Este parámetro representa la masa de vapor de agua por unidad de masa de aire seco y depende de la presión atmosférica local y de la presión parcial del vapor.

La humedad absoluta constituye la fuerza impulsora en la transferencia de masa. La diferencia de humedad absoluta entre el aire ambiente y la capa límite adyacente a la superficie fría determina la tasa de condensación de un sistema (Bergman et al., 2011).

3.2.3 Temperatura de Punto de Rocío

La temperatura de punto de rocío (T_{dp}) es la temperatura a la cual una cantidad de aire debe enfriarse, a presión constante, para que el vapor de agua que contiene alcance la saturación y comience a condensar.

3.2.4 Termodinámica de la Condensación

Desde una perspectiva fenomenológica, la condensación a partir de una corriente de aire húmedo requiere que una superficie actúe como un sumidero térmico, operando a una temperatura estrictamente inferior al punto de rocío del aire circundante ($T_{superficie} < T_{dp}$). Independientemente de si este subenfriamiento se logra de manera pasiva o activa, el proceso implica una transferencia acoplada y simultánea de calor y masa a través de la capa límite.

Durante la formación de rocío, el sumidero térmico se ve sometido a dos cargas térmicas dominantes provenientes del ambiente, las cuales intentan calentar la superficie:

Carga Térmica Convectiva (Sensible): Corresponde al flujo de calor por el enfriamiento del aire húmedo a medida que atraviesa la superficie. Este fenómeno está gobernado por la convección forzada o natural del viento ambiental (v_{viento}) y se modela mediante la Ley de Enfriamiento de Newton:

$$Q_c = h_c \cdot A \cdot (T_{amb} - T_{superficie}) \quad (3.1)$$

donde A representa el área efectiva de contacto y h_c es el coeficiente de transferencia de calor convectivo.

Carga Térmica Latente: Constituye la energía que el vapor de agua libera sobre la superficie al experimentar el cambio de fase hacia el estado líquido. La magnitud de esta transferencia depende de la tasa de condensación másica ($\dot{m}_{agua}$).

$$Q_l = \dot{m}_{agua} \cdot h_{fg} \quad (3.2)$$

donde h_{fg} representa la entalpía de vaporización del agua. Considerando el rango de temperaturas ambientales aplicables a los sistemas de captación atmosférica en la zona de estudio (típicamente entre 5 °C y 15 °C), este parámetro se obtuvo a partir de tablas termodinámicas estandarizadas de la literatura. Para las simplificaciones de diseño de la presente investigación, se optó por emplear un valor conservador constante de 2.500 kJ/kg, magnitud que corresponde a la entalpía de vaporización evaluada a una temperatura aproximada de 5 °C (Çengel et al., 2019)

En un entorno físico real, el sistema experimenta otros mecanismos secundarios de transferencia de energía. Entre estos se incluyen la radiación térmica incidente desde el entorno hacia la superficie, la demanda sensible para enfriar las gotas de agua una vez condensadas, la resistencia conductiva de la propia película de rocío, y las ganancias de calor por conducción a través de los soportes estructurales del equipo (en caso de condensación activa). Sin embargo, debido a que la magnitud de estas cargas resulta significativamente menor frente al impacto directo de la convección del aire y la entalpía de vaporización en los sistemas de condensación activa, se asume un balance energético simplificado.

3.3 Microfísica de la Niebla

Desde un punto de vista meteorológico, la niebla se define como una nube a nivel de la superficie de la Tierra (Montecinos and Carvajal, 2023). A diferencia de la psicrometría, que trata al sistema como una mezcla de gases, la microfísica de la niebla estudia el comportamiento de estas partículas líquidas, sus tamaños y su concentración, variables críticas para determinar la eficiencia de captación de cualquier prototipo.

3.3.1 Contenido de Agua Líquida (LWC)

El Contenido de Agua Líquida (LWC , por sus siglas en inglés *Liquid Water Content*) es la variable más relevante para estimar el potencial hídrico de un evento de niebla. Se define como la masa de agua líquida suspendida por unidad de volumen de aire, expresada comúnmente en $g \cdot m^{-3}$ (Montecinos and Carvajal, 2023).

A diferencia de la humedad absoluta, que incluye el agua en fase gaseosa, el LWC contabiliza únicamente el agua que ha condensado y está disponible para ser interceptada. La literatura establece que la presencia de un evento de niebla cuando el LWC supera el umbral de $0,01 g \cdot m^{-3}$. En estudios de campo realizados en la costa de la Región de Coquimbo (El Sarco), se han registrado valores promedio de LWC que fluctúan entre $0,01$ y $0,5 g \cdot m^{-3}$, alcanzando máximos de hasta $1,45 g \cdot m^{-3}$ en eventos intensos (Montecinos et al., 2018).

3.3.2 Eficiencia de Captación

El rendimiento de un sistema de captación de agua atmosférica no depende de un único factor, sino de la interacción de diversos fenómenos físicos que ocurren desde que la masa de aire se aproxima al colector hasta que el recurso es recolectado (Regalado and Ritter, 2016). Esta capacidad se define mediante la Eficiencia Global de Recolección (η_{coll}), la cual se desglosa conceptualmente en tres componentes principales:

- **Eficiencia Aerodinámica (η_a):** Representa la fracción del flujo de aire incidente que efectivamente atraviesa la estructura del colector en lugar de desviarse por sus costados debido a la resistencia mecánica de la malla (Regalado and Ritter, 2016). Es una función crítica de la porosidad del material y de la velocidad del viento ambiental (Montecinos et al., 2018).
- **Eficiencia de Impacto (η_{imp}):** Cuantifica la probabilidad de que las gotas de niebla contenidas en el aire que cruza el colector choquen con las fibras o filamentos. Este fenómeno está gobernado por la inercia de las gotas; partículas con mayor masa tienden a mantener su trayectoria lineal impactando el obstáculo, mientras que las más pequeñas siguen las líneas de corriente del aire y evaden el contacto (Regalado and Ritter, 2016).
- **Eficiencia de Drenaje (η_d):** Corresponde a la fracción del agua impactada que logra escurrir por gravedad hacia el sistema de almacenamiento. Factores como la evaporación prematura y el re-arrastre aerodinámico (gotas que son arrancadas de la malla por vientos fuertes) pueden reducir drásticamente este componente (Regalado and Ritter, 2016).

3.4 Sistemas de Captación de Niebla

El principio fundamental se basa en la intercepción de las diminutas gotas de agua que componen la niebla, cuando el viento impulsa la niebla a través de una superficie de recolección, las gotas impactan y se adhieren a esta. A medida que más gotas se acumulan, se unen por coalescencia, aumentando su tamaño y peso hasta que la gravedad las hace escurrir hacia un sistema de canaletas para su almacenamiento. Los sistemas de captación de niebla se pueden dividir en dos categorías según su requerimiento de energía:

- **Sistemas de Captación Pasiva:** Son tecnologías que no requieren energía externa para su funcionamiento. Dependen completamente de la velocidad del viento ambiental para forzar el paso del aire cargado de niebla a través de una superficie porosa. Los dispositivos más representativos son el Colector de Niebla Estándar (SFC, por sus siglas en inglés), propuesto y estandarizado para la prospección meteorológica con un área de captación de 1 m^2 , y los Collectores a Gran Escala (LFC) utilizados para el abastecimiento comunitario (Schemenauer and Cereceda, 1994). En ambos sistemas, el material de captura predominante a nivel global es la malla Raschel de polietileno típicamente con un coeficiente de sombra (o fracción sólida) del 35%, seleccionada por su bajo costo, resistencia UV y probada eficiencia aerodinámica en condiciones de terreno (Fernandez et al., 2018).
- **Sistemas de Captación Activa:** A diferencia de los pasivos, estos sistemas requieren una fuente de energía externa para forzar o facilitar el proceso de recolección de las gotas

suspendidas. Esta adición de energía puede emplearse para impulsar mecánicamente un flujo de aire constante a través de la superficie de captura (mediante el uso de ventiladores o sopladores), o bien para generar campos eléctricos que atraigan activamente las gotas hacia los colectores (sistemas electrostáticos).

3.4.1 Sistemas de Captación Pasiva de Niebla

La captación pasiva en Chile se ha estudiado desde los primeros "neblinómetros" en El Tofo, los cuales revelaron que el rendimiento depende críticamente de la altitud y la estacionalidad (Schemenauer et al., 1987). Estudios posteriores en colectores a gran escala (LFC) situaron la eficiencia real de campo cerca del 20%, evidenciando que factores como el drenaje deficiente y el re-arrastré de gotas limitan el desempeño teórico (Schemenauer and Joe, 1989).

Investigaciones recientes mediante Colectores de Niebla Estándar (SFC) en El Sarco muestran eficiencias variables entre 0% y 36,8% (Montecinos et al., 2018). Finalmente, la estructura de la malla define el umbral operativo. La malla Raschel estándar destaca en vientos bajos (< 1 m/s), diseños avanzados utilizando mallas tridimensionales (*FogHa-Tin*) son superiores en regímenes de alta velocidad (> 5 m/s). Por su parte, mallas metálicas con recubrimientos hidrofóbicos (MIT-14) superan a la Raschel en todo el espectro, incrementando la captura en un 41% bajo vientos de 4-5 m/s, aunque con costos de fabricación hasta 15 veces superiores (Fernandez et al., 2018).

3.4.2 Sistemas de Captación Activa de Niebla

Como se comentó anteriormente, los sistemas pasivos poseen una eficiencia de recolección limitada, dependiente de las condiciones meteorológicas, resultando inoperantes durante períodos de calma. Para superar estas barreras y estabilizar la producción de agua, se han desarrollado los sistemas de captación activa.

Uno de los estudios para esta tecnología es el Colector Activo de Hilos Caltech (CASCC) (Demos et al., 1996). Este equipo utiliza un ventilador para aspirar aire a través de hileras de filamentos de teflón. Su principio de funcionamiento se basa en la impactación inercial, descrita teóricamente por el número de Stokes, logrando correlaciones exitosas entre el agua recolectada y el Contenido de Agua Líquida (*LWC*) ambiental. Recientemente, un estudio presentó el ACFC, un colector activo completamente automatizado que integra sensores de humedad y lluvia. Este sistema opera solo bajo condiciones favorables ($HR > 90\%$ y ausencia de lluvia), optimizando el uso de energía y protegiendo la calidad del agua recolectada (Du et al., 2023). También se han explorado otros enfoques activos como el uso de campos electrostáticos para atraer gotas activamente, logrando rendimientos superiores a los colectores pasivos en condiciones de baja velocidad de viento con un consumo energético mínimo (Yan and Jiang, 2021).

3.5 Sistemas de Captación de Rocío

La recolección de agua atmosférica no se limita únicamente a la niebla. En muchas zonas áridas y semiáridas, las mismas condiciones climáticas que favorecen los eventos de niebla, como las noches despejadas y la alta humedad relativa, también son propicias para la formación de rocío (Lekouch et al., 2011).

Aunque los sistemas de captación de niebla tienen el potencial de recolectar volúmenes de agua considerablemente mayores, su rendimiento está ligado a la ocurrencia de estos eventos, cuya frecuencia y duración son a menudo impredecibles y altamente dependientes de las condiciones meteorológicas estacionales. Esta dependencia climática crea una variabilidad en el suministro que impulsa la necesidad de explorar alternativas que puedan operar en condiciones diferentes. El rocío, al formarse típicamente durante las noches de cielo despejado y vientos calmos, no compite con la niebla, sino que se presenta como un recurso hídrico complementario que puede ser cosechado cuando las condiciones no son favorables para la captación de niebla (Montecinos and Carvajal, 2023).

Se han desarrollado diversas tecnologías para la cosecha de rocío, las cuales, al igual que los sistemas de niebla, se pueden clasificar en pasivas y activas según su requerimiento de energía.

3.5.1 Sistemas de Captación Pasiva de Rocío

La recolección pasiva de agua atmosférica se basa en el enfriamiento radiativo nocturno, mediante el cual una superficie expuesta disipa calor hasta descender por debajo del punto de rocío, induciendo la condensación (Beysens, 2016). La viabilidad de esta técnica como fuente hídrica suplementaria ha sido validada con éxito en zonas áridas y semiáridas, logrando eventos de condensación consistentes incluso con humedades relativas bajas, tal como se ha demostrado en contextos locales en Chile (Carvajal et al., 2018) y en zonas costeras de Marruecos (Lekouch et al., 2011).

Sin embargo, a pesar de su nulo consumo eléctrico, esta tecnología pasiva enfrenta dos grandes limitaciones que impiden su uso a gran escala:

- **Barrera termodinámica:** La potencia natural de enfriamiento radiativo disponible en la atmósfera rara vez supera los 100 W/m^2 . Esto impone un límite físico a la tasa teórica de condensación, la cual se acota a un máximo de $0,7 - 0,8 \text{ L/m}^2/\text{noche}$ (Beysens, 2016). Si bien las innovaciones en recubrimientos hidrofílicos logran mejoras marginales en la nucleación (Demos et al., 1996), el rendimiento global sigue estrictamente limitado por el balance energético natural.
- **Escalabilidad espacial:** Debido a este bajo rendimiento radiativo por unidad de área, cubrir demandas hídricas significativas dependiendo exclusivamente del rocío requiere extensiones

de terreno logísticamente inviables. Por ejemplo, una planta a gran escala construida con 540 m² de superficie condensadora logra recolectar apenas 20 mm de rocío por temporada, este rendimiento se traduce en un volumen real de producción inferior a los 30 L/día en promedio anual (Sharan et al., 2017).

3.5.2 Sistemas de Captación Activa de Rocío

Dadas las limitaciones de eficiencia de los sistemas pasivos, la captación activa surge como una oportunidad para garantizar un suministro hídrico. A diferencia de los métodos pasivos, los sistemas activos inyectan energía externa (eléctrica o térmica) para forzar el proceso de recolección, permitiendo controlar el punto de rocío artificialmente o capturar humedad mediante procesos de sorción, independientemente del enfriamiento radiativo nocturno (Khalil et al., 2016).

Las tecnologías activas para la recolección de agua atmosférica se clasifican principalmente en tres categorías según su principio de operación térmico o químico:

- **Refrigeración Termoeléctrica (Placas Peltier):** Esta tecnología utiliza módulos termoelectrónicos compuestos por materiales semiconductores tipo N y P que convierten la energía eléctrica directamente en un efecto de enfriamiento a través del efecto Peltier. Sus principales ventajas radican en la conversión directa de energía, su bajo peso y sus requerimientos mínimos de mantenimiento. No obstante, estos sistemas se caracterizan por una baja producción de agua acompañada de un alto consumo específico de energía. En términos de rendimiento, los estudios experimentales muestran productividades que varían típicamente entre 0,27 y 3,9 L/día, con un consumo energético que oscila entre 0,118 y 4,8 kWh/L de agua producida (Beithou et al., 2024).
- **Condensación por Compresión de Vapor:** Este sistema opera mediante un ciclo cerrado donde un fluido refrigerante circula a través de un compresor, un condensador, una válvula de expansión y un evaporador. Al atravesar la válvula de expansión, el refrigerante reduce drásticamente su presión y temperatura, lo que le permite absorber calor y subenfriar la superficie o placa del evaporador. Cuando el aire ambiental es forzado a fluir sobre esta placa fría, el vapor de agua atmosférico experimenta una transferencia de masa y cambio de fase hacia el estado líquido. El consumo específico de energía (SEC) de estas unidades comerciales fluctúa entre 0,211 y 1,3 kWh/L, mientras que en investigaciones de laboratorio se han reportado tasas de producción de 0,13 a 4,20 L/h con consumos que varían desde 0,18 hasta 6,23 kWh/L, dependiendo fuertemente de las condiciones climáticas (Beithou et al., 2024).
- **Sistemas de Sorción (Desecantes y MOFs):** Esta técnica depende de procesos físicos o

químicos (absorción o adsorción) donde el vapor de agua es capturado por sustancias con alta afinidad hídrica, tales como sales desecantes ($CaCl_2$, LiCl) o estructuras metal-orgánicas (MOFs) (Beithou et al., 2024). Operativamente, el material absorbe la humedad durante la noche y el agua es posteriormente extraída (desorbida) mediante calentamiento solar o térmico durante el día. El rendimiento de los sistemas de sorción impulsados por energía solar térmica suele estar limitado a una producción de entre 0,25 y 10 L/día. En cuanto a productividades específicas, se han documentado valores de hasta 2,89 L/m^2 por día con ciertos aerogeles, y capacidades de más de 0,25 L por kg de MOF al día, siendo estos últimos particularmente excelentes para zonas desérticas con humedades relativas tan bajas como el 10% (Beithou et al., 2024).

Capítulo 4

Metodología

La metodología se estructura para responder a los objetivos específicos planteados: la recopilación de datos meteorológicos, el modelamiento físico-matemático de los subsistemas, la integración de los sistemas y lógica del equipo y finalmente la evaluación de los sistemas de generación eléctrica renovable

4.1 Condiciones de Operación y Datos Meteorológicos

En esta sección se detallan las condiciones climáticas del entorno de simulación, definiendo el marco geoespacial y termodinámico en el cual operará y será evaluado el prototipo híbrido.

4.1.1 Elección de la Zona Remota Representativa

Para el desarrollo de la simulación y la evaluación del desempeño del sistema híbrido, se ha seleccionado la zona de **El Sarco, ubicada en la Región de Coquimbo**, como sitio representativo de una zona remota con estrés hídrico. Esta elección se fundamenta en las condiciones climáticas del sector, el cual se caracteriza por la aridez de la zona combinada con una alta recurrencia de eventos de niebla. El Sarco representa un escenario de estudio ideal donde la demanda de agua dulce es persistente y las fuentes convencionales no son suficientes. En la figura 4.1 se observa la ubicación geográfica de la zona de estudio:



Figura 4.1: Ubicación geográfica y área de los sistemas de referencia en El Sarco, Región de Coquimbo, Chile (Google Maps, 2026).

Los resultados obtenidos en esta investigación se sustentan en el uso de un conjunto de datos meteorológicos e hídricos históricos, los cuales permiten caracterizar el comportamiento horario del entorno. Específicamente, los registros empíricos de recolección en terreno fueron obtenidos mediante el uso de monitores pasivos tipo Colector de Niebla Estándar (SFC), equipados con malla Raschel de 35% en doble capa (Schemenauer and Cereceda, 1994). Las variables meteorológicas utilizadas como datos de entrada comprenden registros de temperatura ambiente, humedad relativa, velocidad del viento, radiación solar y presión atmosférica. Adicionalmente, a partir de estos datos, se estima el contenido líquido de agua (LWC).

4.1.2 Base de Datos y Variables Meteorológicas

Para simular el modelo termodinámico y fluidodinámico, se estructuró una base de datos climática representativa de El Sarco, combinando mediciones en terreno y repositorios satelitales.

Los datos de terreno provienen de una campaña realizada entre el 16 de abril de 2016 y el 12 de abril de 2017. Específicamente, los registros de Temperatura Ambiente (T_{amb}), Humedad Relativa (HR) y la recolección de agua líquida (obtenida mediante monitores de niebla estándar de 1 m^2) fueron facilitados y validados por el proyecto FONDECYT N.º 11140863. Asimismo, el perfil de la velocidad del viento (v_{viento}), necesario para definir las condiciones fluidodinámicas y dimensionar

el rotor eólico, se obtuvo del proyecto FONDECYT Regular N.º 1241565.

Por otro lado, dado que la irradiancia solar no fue monitoreada en sitio durante esa campaña, se recurrió a los registros satelitales de la plataforma NASA POWER para determinar las Horas de Sol Pico (HSP) promedio mensuales del lugar (NASA Langley Research Center, 2024).

En la Tabla 4.1 se presenta el formato consolidado de la base de datos meteorológica tras su procesamiento.

Tabla 4.1: Formato de la base de datos meteorológica para el sitio de El Sarco (período 2016-2017).

Fecha	T_{amb} [°C]	HR [%]	P_{rel} [hPa]	v_{viento} [m/s]	V_{acum} [L]
16-04-2016 00:00	13,8	99,0	1.014,1	3,6	9,8
17-04-2016 00:00	14,1	99,0	1.016,2	2,7	22,4
18-04-2016 00:00	11,9	97,6	1.018,5	2,7	33,1
19-04-2016 00:00	10,9	98,5	1.018,0	3,4	38,6
20-04-2016 00:00	10,9	98,4	1.015,2	2,6	41,3
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

4.1.3 Estimación del Contenido de Agua Líquida (LWC)

El Contenido de Agua Líquida no fue medido directamente por instrumentos en terreno durante la campaña, su valor horario fue estimado analíticamente a partir de los volúmenes de recolección documentados por el monitor de niebla pasivo.

Para este cálculo, se utilizó la velocidad del viento durante los eventos efectivos de recolección y la duración total cronometrada de cada evento. Considerando el área transversal del monitor de referencia ($A = 1 \text{ m}^2$) y asumiendo una eficiencia de colección aerodinámica e inercial típica del 20% ($\eta_{sys} = 0,20$), se derivó el LWC mediante la ecuación de continuidad de flujo másico:

$$LWC = \frac{V_{rec} \cdot \rho_{agua}}{v_{viento} \cdot A \cdot t_{evento} \cdot \eta_{sys}} \quad (4.1)$$

Donde V_{rec} es el volumen de agua recolectada en litros, ρ_{agua} es la densidad del agua (1000 g/L), v_{viento} es la velocidad promedio del viento en m/s , y t_{evento} es el tiempo de duración del evento en segundos.

Para validar la fiabilidad de esta aproximación analítica, los perfiles de LWC calculados fueron comparados con los resultados empíricos reportados por Montecinos, quien empleó instrumentación para la medición directa de este parámetro en el área de estudio, confirmando que las estimaciones teóricas se ajustan a los rangos observados en terreno (Montecinos et al., 2018). En la tabla 4.2 se

observa la comparación de estos valores.

Tabla 4.2: Comparación entre el contenido de agua líquida (LWC) empírico y el estimado teóricamente.

Metodología	LWC Promedio (g/m ³)	Error Relativo (%)
Empírico (Montecinos, 2018)	0,146	14,38
Teórico (Presente estudio)	0,125	

4.2 Dimensionamiento de la Producción Hídrica Total

A partir del análisis climático en la zona de El Sarco, el dimensionamiento de la producción volumétrica del prototipo se estableció bajo un objetivo base de 100 L/día promedio durante el periodo evaluado de 227 días. Este volumen de diseño permite alcanzar un total de 22.700 litros en dicho periodo, igualando la capacidad de los atrapanieblas pasivos LFC de 42 m² de area colectora (100 a 150 L/día).

Para alcanzar esta meta, la demanda hídrica se dividió de acuerdo con el comportamiento fenomenológico de cada subsistema. En primer lugar, 80 L/día son destinados al módulo de recolección activa de niebla, el cual opera como la fuente principal de abastecimiento (acumulando un total estimado de 18.160 litros). El dimensionamiento de este volumen se calcula utilizando los valores ambientales del contenido de agua líquida (LWC), la velocidad aerodinámica del flujo de aire y la duración de cada evento de niebla.

Por otra parte, los 20 L/día restantes se asignan al módulo de condensación de rocío, el cual actúa como un sistema de respaldo constante (aportando 4.540 litros en el mismo periodo). Para el cálculo de este bloque, se utilizaron los perfiles locales de Temperatura y Humedad Relativa (HR), definiendo bajo parámetros termodinámicos que el equipo se mantendrá encendido operando estrictamente en la ventana horaria de 00:00 a 08:00 horas. Se selecciona este rango específico debido a que, durante la noche y madrugada, la disminución de la temperatura del aire provoca un aumento en la Humedad Relativa (elevándose de un promedio diario del 75% a casi un 80% en esta franja). Este comportamiento acerca la masa de aire a su punto de saturación, favoreciendo la eficiencia de condensación. El resumen de esta distribución operativa se detalla en la Tabla 4.3.

4.3 Modelamiento Matemático de los Subsistemas

En esta sección se presentan las ecuaciones de diseño y los modelos matemáticos que rigen el comportamiento fenomenológico de los equipos. Se detalla cómo se aplican las ecuaciones para dimensionar el sistema.

Tabla 4.3: Dimensionamiento comparativo de la producción hídrica diaria.

Módulo / Sistema	Función Operativa	Producción [L/día]
Recolección Activa	Fuente principal (Alta saturación)	~ 80
Condensación de Rocío	Respaldo constante (Baja nubosidad)	~ 20
Sistema Total	Producción total	100
<i>Atrapanieblas Pasivo (48 m²)</i>	<i>Referencia (Promedio anual)</i>	<i>100 - 150</i>

4.3.1 Subsistema de Captación Activa de Niebla

Se opta por un colector activo de filamentos impulsado por ventilador mecánico, inspirándose en las configuraciones de referencia internacional tipo CASC (Caltech Active Strand Cloudwater Collector) y ACFC (Active Cloud/Fog Collector) (Demoz et al., 1996). Estas configuraciones garantizan un flujo de aire constante y controlado hacia la superficie de captura.

Adicionalmente, se descarta la implementación de tecnologías de captura electrostática; la generación de campos de alto voltaje en ambientes atmosféricos saturados de humedad supone un riesgo eléctrico y de seguridad operativa considerable para una instalación en la zona.

Para dimensionar este módulo, se desarrolló un algoritmo secuencial que evalúa tanto la producción hídrica esperada como el requerimiento energético del ventilador. El algoritmo de cálculo se divide en dos grandes etapas: la determinación de la eficiencia de captura másica y la cuantificación de las pérdidas de presión fluidodinámicas.

Eficiencia de Captura

El proceso de cálculo inicia determinando la fracción de agua líquida (LWC) que efectivamente impactará contra la geometría de la malla. Para ello, el cálculo inicia con el Número de Stokes (St_k), un parámetro adimensional que es válido para estimar la eficiencia de impacto de partículas sobre filamentos cilíndricos. Este cálculo se encuentra referenciado al radio del filamento ($l_0 = d/2$), tomando como entradas la velocidad forzada del ventilador y el diámetro promedio de la gota (D_d):

$$St_k = \frac{\rho_d \cdot D_d^2 \cdot v_{viento}}{18 \cdot \mu \cdot (d/2)} \quad (4.2)$$

Una vez obtenido el número de Stokes, se evalúa la eficiencia de impacto para un cilindro individual (η_{cyl}) mediante la siguiente correlación empírica (Davidson and Friedlander, 1978):

$$\eta_{cyl} = \frac{St_k^3}{St_k^3 + 0,753St_k^2 + 2,796St_k - 0,202} \quad (4.3)$$

Posteriormente, para transpolar el comportamiento de un solo hilo al de un banco tridimensional de filamentos, se aplica el modelo de escalamiento basado en la cobertura fraccional. Utilizando la

fracción sólida por fila (f_R) y el número de capas (n_R), se calcula la eficiencia total de impacto del arreglo (η_{imp}):

$$\eta_{imp} = 1 - (1 - \eta_{cyl} \cdot f_r)^{n_R} \quad (4.4)$$

Para el cálculo de la eficiencia de recolección global (η_{coll}), es necesario distinguir el comportamiento de un sistema activo frente a uno pasivo. En captadores de niebla al aire libre, la eficiencia aerodinámica (η_a) penaliza el cálculo debido al volumen de aire que esquiva la estructura (Regalado and Ritter, 2016). Al tratarse de un flujo confinado dentro de un ducto, el ventilador suministra la energía necesaria para vencer la caída de presión de los filamentos (asumiendo $\eta_a = 1, 0$), Respecto a la eficiencia de drenaje (η_d), para efectos del dimensionamiento conceptual de la producción y potencia, se asume un escurrimiento ideal sin rearrastre aerodinámico de las gotas capturadas. En consecuencia, la tasa de recolección volumétrica del módulo se determina directamente por la eficiencia de impacto (η_{imp}), el caudal de aire impulsado y el contenido de agua líquida (LWC) ambiental disponible. Por lo tanto, el volumen total de agua recolectada (V_{rec}) en un intervalo de tiempo determinado se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$V_{rec} = \frac{LWC \cdot A \cdot v_{viento} \cdot \eta_{imp} \cdot t_{evento}}{\rho_{agua}} \quad (4.5)$$

donde V_{rec} es el volumen de agua obtenida, LWC corresponde al contenido de agua líquida ambiental [g/m^3], A al área transversal de captación [m^2], v_{viento} a la velocidad del flujo [m/s], η_{imp} a la eficiencia de impacto calculada, t_{evento} al tiempo de operación [s] y ρ_{agua} representa la densidad del agua, definido en $1000 \text{ g}/\text{L}$.

Cálculo de Caída de Presión y Potencia del Ventilador

Para que el ventilador logre mantener la velocidad de diseño v_{viento} a través del sistema, debe proveer suficiente energía para vencer dos restricciones fluidodinámicas consecutivas, las cuales el algoritmo calcula de forma aditiva:

- **Pérdidas en la Malla (ΔP_{malla}):** Se implementa el modelo de Gaddis para arreglos escalonados. En la figura 4.2 se observa el arreglo utilizado.

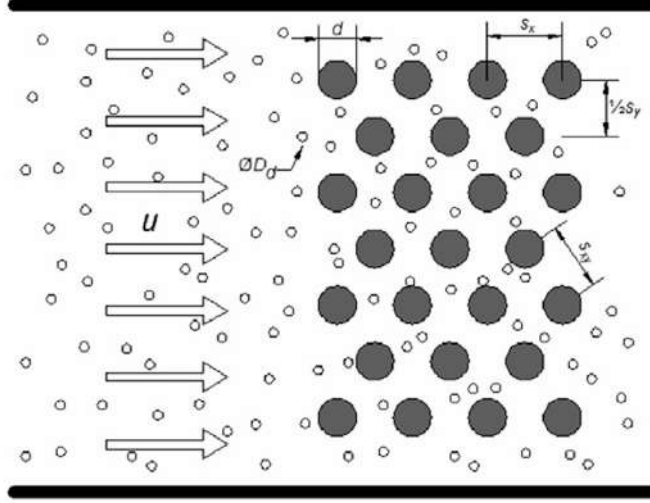


Figura 4.2: Esquema del arreglo escalonado de los filamentos en el banco de mallas (Regalado, 2022).

Se calcula primero el Número de Reynolds del filamento (Re_w) y, basándose en los espaciamientos longitudinales y transversales adimensionales ($a = S_y/d$ y $b = S_x/d$), determina el coeficiente de resistencia aerodinámica (ζ). Este coeficiente se compone de una interpolación ponderada entre un régimen laminar y uno turbulento (Gaddis, 2010).

$$\zeta = \zeta_{lam} + \zeta_{turb} \cdot \left[1 - \exp \left(-\frac{Re_w + 200}{1000} \right) \right] \quad (4.6)$$

Donde las componentes de fricción para un arreglo de n_R capas se definen como:

$$\zeta_{lam} = \frac{280\pi \left[(\sqrt{b} - 0,6)^2 + 0,75 \right]}{Re_w \cdot (4ab - \pi) \cdot a^{1,6}} \quad (4.7)$$

$$\zeta_{turb} = \frac{n_R}{Re_w^{0,25}} \left[2,5 + \frac{1,2}{(a - 0,85)^{1,08}} + 0,4 \left(\frac{b}{a} - 1 \right)^3 - 0,01 \left(\frac{a}{b} - 1 \right)^3 \right] \quad (4.8)$$

Una vez determinado el factor geométrico global ζ , se establece la caída de presión efectiva multiplicando este coeficiente por la presión dinámica del flujo impulsado:

$$\Delta P_{malla} = \zeta \cdot \left(\frac{1}{2} \rho_a v_{viento}^2 \right) \quad (4.9)$$

- **Caída de presión singular (ΔP_s):** En un sistema de captación confinado o entubado,

el flujo de aire experimenta pérdidas de energía adicionales debido a la interacción con la geometría del conducto (Çengel and Cimbala, 2018). Estas incluyen la energía necesaria para acelerar el aire desde el reposo en la entrada, así como las disipaciones provocadas por la descarga en la salida y cualquier transición o accesorio interno. Estas caídas de presión son proporcionales a la presión dinámica del fluido y se cuantifican mediante coeficientes de pérdida adimensionales (K):

$$\Delta P_s = \left(\sum K_i \right) \frac{1}{2} \rho_a v_{viento}^2 \quad (4.10)$$

Donde cada coeficiente K_i representa la resistencia específica (o pérdida singular) de un componente del sistema aerodinámico.

Para el modelado analítico, se asumió una configuración geométrica de succión tipo campana (entrada con contracción suave), lo que permite minimizar el desprendimiento de la capa límite; a este componente se le asignó un coeficiente de pérdida $K_{entrada} = 0,04$. Por otro lado, para la descarga abrupta del flujo hacia la atmósfera, se pierde toda la presión dinámica residual, por lo que se empleó un coeficiente de $K_{salida} = 1$ (Idel'chik, 1966).

Finalmente, se suman estos componentes para obtener la caída de presión total ($\Delta P_{sistema}$). A partir de este valor y del caudal volumétrico en función de la velocidad del aire y el área transversal, el modelo determina la potencia ideal mecánica requerida por el motor del ventilador para operar el subsistema de niebla en condiciones estacionarias:

$$P_{vent} = \Delta P_{sistema} \cdot Q_{aire} \quad (4.11)$$

Elección de Parámetros de Operación para Captación de Niebla

Para la implementación de la simulación y el dimensionamiento del prototipo, se han definido parámetros geométricos y físicos basados en la literatura sobre colectores de filamentos para niebla activos y pasivos. En la Tabla 4.4 se resumen los valores adoptados.

Tabla 4.4: Parámetros definidos para el algoritmo de captación de niebla.

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Número de capas (filas)	n_R	5	Adimensional
Diámetro del filamento	d	1,1	mm
Espaciado transversal	S_y	2,8	mm
Separación longitudinal	S_x	5,0	mm
Diámetro de gota representativo	D_d	15	μm

La elección de estos parámetros responde a criterios de optimización aerodinámica y de eficiencia de impacto:

- **Número de capas ($n_R = 5$):** Según el análisis paramétrico de Regalado, el aumento de capas mejora la eficiencia de recolección hasta un punto óptimo situado entre 3 y 5 hileras. Superar las 5 capas genera ganancias marginales en la captura másica, pero incrementa de forma desproporcionada la caída de presión y la resistencia al flujo de aire (Regalado and Ritter, 2016).
- **Diámetro del filamento ($d = 1,1 \text{ mm}$):** Se selecciona este valor siguiendo la propuesta de Regalado para un colector óptimo. Este diámetro maximiza la eficiencia de impacto inercial al mantener un número de Stokes elevado, proporcionando simultáneamente la rigidez estructural necesaria para soportar las fuerzas de arrastre del ventilador sin deformar la geometría del banco de mallas.
- **Espaciado transversal ($S_y = 2,8 \text{ mm}$):** Esta dimensión establece una relación de paso transversal $a = S_y/d \approx 2,54$, identificada como el equilibrio ideal entre la probabilidad de choque y la transparencia aerodinámica. Con una fracción sólida por fila (f_r) cercana al 39%, se garantiza una fracción de aire muestreado total superior al 90% para 5 capas (Demos et al., 1996), evitando la impermeabilidad del sistema.
- **Separación longitudinal ($S_x = 5,0 \text{ mm}$):** Se define este valor compacto para aprovechar la reducción drástica en el coeficiente de pérdida de presión (ζ) de Gaddis que ocurre en arreglos densos (Regalado and Ritter, 2016). Además, se recomienda un espacio libre entre 5,0 - 10,0 mm entre hilos adyacentes para prevenir el fenómeno de clogging, asegurando el drenaje gravitacional efectivo del agua capturada.
- **Diámetro de gota ($D_d = 15 \text{ }\mu\text{m}$):** Se asume este valor por los eventos de advección costera en la zona de El Sarco presentan diámetros volumétricos medios (MVD) que fluctúan predominantemente entre 10 μm y 20 μm (Montecinos et al., 2018).

Para equilibrar la producción hídrica y el gasto energético, se implementó un cálculo que evalúa la derivada de la eficiencia de colección ($d\eta_{coll}/dv_{viento}$). El punto de operación óptimo se determina mediante un criterio de ganancia marginal (ϵ), deteniendo la aceleración del flujo cuando un incremento de 1 m/s aporta una mejora en la eficiencia inferior al 3%.

4.3.2 Subsistema de Condensación por Compresión de Rocío

Se selecciona el ciclo de compresión de vapor por su óptimo balance entre consumo energético y capacidad productiva. Se descartan las celdas Peltier por su deficiente eficiencia termodinámica y

los sistemas de sorción por su limitada escalabilidad y bajas tasas de producción absoluta (Beithou et al., 2024). Para el dimensionamiento de este módulo, se implementó un modelo matemático basado en los principios de psicrometría y las analogías de transferencia de calor y masa en convección forzada. El objetivo del algoritmo es cuantificar la tasa másica de agua condensada y la carga térmica total que debe extraer el ciclo frigorífico.

Psicrometría y Condiciones de Saturación

El proceso comienza evaluando el estado termodinámico del aire húmedo. La presión de vapor de saturación (P_{sat}) en función de la temperatura (T) se determina utilizando la aproximación empírica de Magnus-Tetens (Magnus, 1844):

$$P_{sat}(T) = 611,2 \cdot \exp\left(\frac{17,67 \cdot T}{T + 243,5}\right) \quad (4.12)$$

Conociendo la Humedad Relativa (HR) ambiental, se calcula la presión parcial de vapor real ($P_{vapor} = HR \cdot P_{sat}(T_{amb})$) y se determina la humedad absoluta del aire (ω_{amb}), expresada en kg de vapor por kg de aire seco, para una presión atmosférica local P_{atm} :

$$\omega = 0,622 \cdot \frac{P_{vapor}}{P_{atm} - P_{vapor}} \quad (4.13)$$

El algoritmo evalúa la viabilidad termodinámica de la condensación comparando la temperatura fijada para la placa evaporadora (T_{placa}) con el punto de rocío del aire (T_{dp}). Únicamente existirá transferencia de masa hacia la superficie metálica si $T_{placa} \leq T_{dp}$, lo que a su vez implica que la humedad absoluta del ambiente es mayor que la humedad absoluta de saturación evaluada a la temperatura de la placa ($\omega_{amb} > \omega_{placa}$).

4.3.3 Metodología del Sistema de Condensación Activa

Para el diseño del módulo de condensación del sistema híbrido, se ha implementado un modelo numérico basado en la arquitectura de tubos y aletas, utilizando la correlación de Wang para la determinación de los coeficientes de transporte local y el método de Efectividad-NUT para la integración (Wang et al., 2000).

Parámetros Geométricos del Intercambiador

Para la simulación se asume una configuración geométrica estándar basada en los componentes comerciales de la industria HVAC (Heat, Ventilation, and Air Conditioning) para tubos de cobre

de 3/8". Estos valores se mantienen constantes para definir la compacidad del equipo, permitiendo que el escalamiento se realice mediante la variación del área frontal.

Tabla 4.5: Parámetros geométricos fijos del intercambiador de calor.

Parámetro	Símbolo	Valor
Número de filas de tubos	N	3
Diámetro exterior del tubo	D_o	9,52 mm
Espesor de la aleta de aluminio	δ_f	0,15 mm
Espaciado entre aletas	F_p	2,0 mm
Paso longitudinal entre tubos	P_l	22,0 mm
Paso transversal entre tubos	P_t	25,4 mm
Diámetro hidráulico del aire	D_h	2,0 mm

A partir de estas constantes, se define el diámetro del collar del tubo ($D_c = D_o + 2\delta_f$) como la longitud característica para el cálculo del número de Reynolds (Re_{D_c}) y el área superficial total expuesta (A_{total}), la cual se escala al área frontal seleccionada.

Cálculo de Coeficientes de Transferencia (Modelo de Wang)

La transferencia en bancos de tubos y aletas depende de la turbulencia generada en la zona de estela de los tubos. El algoritmo calcula el factor de Colburn (j) mediante la correlación empírica de Wang para $N \geq 2$:

$$j = 0,086 \cdot Re_{D_c}^{P_3} \cdot N^{P_4} \cdot \left(\frac{F_p}{D_c}\right)^{P_5} \cdot \left(\frac{F_p}{D_h}\right)^{P_6} \cdot \left(\frac{F_p}{P_t}\right)^{-0.93} \quad (4.14)$$

Donde los exponentes empíricos P_3 , P_4 , P_5 y P_6 capturan los efectos aerodinámicos de la geometría y son funciones no lineales del Número de Reynolds (Re_{D_c}):

$$P_3 = -0,361 - \frac{0,042 \cdot N}{\ln(Re_{D_c})} + 0,158 \cdot \ln \left(N \cdot \left(\frac{F_p}{D_c}\right)^{0.41} \right) \quad (4.15)$$

$$P_4 = -1,224 - \frac{0,076 \cdot \left(\frac{P_l}{D_h}\right)^{1,42}}{\ln(Re_{D_c})} \quad (4.16)$$

$$P_5 = -0,083 + \frac{0,058 \cdot N}{\ln(Re_{D_c})} \quad (4.17)$$

$$P_6 = -5,735 + 1,21 \cdot \ln \left(\frac{Re_{D_c}}{N} \right) \quad (4.18)$$

Una vez determinado el factor de Colburn, y mediante la analogía de calor y masa, se obtienen los coeficientes convectivos térmico (h_c) y de masa (h_m) utilizando el Número de Nusselt (Nu) y el Número de Sherwood (Sh):

$$Nu = j \cdot Re_{D_c} \cdot Pr^{1/3} \quad ; \quad Sh = j \cdot Re_{D_c} \cdot Sc^{1/3} \quad (4.19)$$

$$h_c = \frac{Nu \cdot k_f}{D_c} \quad ; \quad h_m = \frac{Sh \cdot D_{AB}}{D_c} \quad (4.20)$$

Dimensionamiento del Sistema

Se utiliza el método de Efectividad-Número de Unidades de Transferencia (NUT) para evitar la sobreestimación de la condensación y respetar el límite físico de saturación. El NUT másico (NTU_m) relaciona el poder del intercambiador con el caudal volumétrico de aire ($\dot{V}_a$):

$$NTU_m = \frac{h_m \cdot A_{total}}{Q_{aire}} \quad \Rightarrow \quad \varepsilon_m = 1 - e^{-NTU_m} \quad (4.21)$$

La tasa de condensación real ($\dot{m}_{cond}$) se determina por el decaimiento exponencial de la humedad a medida que el aire atraviesa las filas de tubos:

$$\dot{m}_{cond} = Q_{aire} \cdot (\rho_{v,amb} - \rho_{v,placa}) \cdot \varepsilon_m \quad (4.22)$$

Una vez determinada la transferencia de masa teórica, es fundamental establecer el balance de energía del sistema. La cantidad de energía total que el equipo debe extraer del flujo de aire se denomina carga térmica requerida ($\dot{Q}_{req}$). Esta demanda se compone de la suma del calor latente de condensación ($\dot{Q}_{lat}$) y el calor sensible de enfriamiento ($\dot{Q}_{sens}$):

$$\dot{Q}_{req} = \dot{Q}_{sens} + \dot{Q}_{lat} \quad (4.23)$$

El calor latente se obtiene directamente de la masa de agua condensada multiplicada por el calor latente de vaporización del agua (h_{fg}):

$$\dot{Q}_{lat} = \dot{m}_{cond} \cdot h_{fg} \quad (4.24)$$

Por otro lado, el calor sensible, que corresponde a la energía necesaria para disminuir la temperatura de todo el volumen de aire desde la condición ambiental (T_{amb}) hasta la temperatura de la superficie de las aletas (T_{placa}), se evalúa empleando la efectividad térmica (ε_t):

$$\dot{Q}_{sens} = Q_{aire} \cdot \rho_a \cdot c_{p,a} \cdot (T_{amb} - T_{placa}) \cdot \varepsilon_t \quad (4.25)$$

donde ρ_a es la densidad del aire y $c_{p,a}$ es su calor específico a presión constante.

Para que el proceso de condensación sea físicamente viable, el equipo debe ser capaz de abatir esta demanda. La viabilidad depende de la capacidad frigorífica máxima disponible del sistema ($\dot{Q}_{disp}$), la cual está definida por el producto entre la potencia eléctrica nominal del compresor y su Coeficiente de Desempeño (COP).

Dado que tanto el calor sensible como el latente dependen directamente de la temperatura operativa de las aletas (T_{placa}), el modelo determina este valor mediante un balance donde $\dot{Q}_{req}$ no debe superar a $\dot{Q}_{disp}$. Para ello, se establece un límite inferior de seguridad térmica de $T_{min} = 2^\circ\text{C}$ para evitar la formación de escarcha.

A partir de estas premisas, el algoritmo calcula T_{placa} siguiendo estos pasos lógicos:

1. **Evaluación de Capacidad Holgada:** Primero, el modelo calcula la carga requerida asumiendo que la placa opera en su temperatura mínima (2°C). Si esta demanda térmica resulta ser menor o igual a la capacidad del compresor ($\dot{Q}_{req}(2^\circ\text{C}) \leq \dot{Q}_{disp}$), significa que el equipo tiene potencia suficiente para abatir la carga. En este caso, la temperatura de operación se fija en el límite inferior: $T_{placa} = 2^\circ\text{C}$.
2. **Búsqueda de Equilibrio (Método de Bisección):** Si el flujo de aire entrante o su nivel de entalpía exigen demasiada energía ($\dot{Q}_{req}(2^\circ\text{C}) > \dot{Q}_{disp}$), el compresor no da abasto para mantener los 2°C y la placa inevitablemente comenzará a calentarse. Para encontrar la nueva temperatura real en la que el sistema se estabiliza, se emplea el método numérico de bisección. Este algoritmo itera dentro del intervalo cerrado $[2^\circ\text{C}, T_{amb}]$, reduciendo el espacio de búsqueda a la mitad en cada paso, hasta encontrar la T_{placa} exacta donde la carga térmica demandada iguala la capacidad frigorífica instalada ($\dot{Q}_{req}(T_{placa}) \approx \dot{Q}_{disp}$).
3. **Restricción de Condensación:** Una vez que el método numérico encuentra la temperatura de equilibrio T_{placa} , se verifica su viabilidad termodinámica. Si esta temperatura de convergencia resulta ser superior al punto de rocío de la masa de aire, el sistema no logra vencer el calor sensible y, por tanto, la tasa de condensación $\dot{m}_{cond}$ decae a cero.

4.4 Sistema de Alimentación Energética

Para garantizar la autonomía del prototipo híbrido en la zona de El Sarco, el dimensionamiento de la planta de generación de energía requiere establecer la demanda de potencia total. Esta demanda conjunta está determinada por el funcionamiento simultáneo del subsistema de captación activa de niebla y el subsistema de condensación.

A partir del modelamiento fluidodinámico, se determina la potencia mecánica teórica requerida por el ventilador (P_{vent}). Para obtener el requerimiento eléctrico real, se considera una eficiencia

global del conjunto motor-ventilador del 70% ($\eta_{vent} = 0,7$) y se aplica un factor de sobredimensionamiento por seguridad de 1,15, destinado a cubrir pérdidas y requerimientos de partida (ASHRAE, 2020). La potencia eléctrica de diseño para el módulo de niebla ($P_{elec,vent}$) se calcula mediante:

$$P_{elec,vent} = \left(\frac{P_{vent}}{0,7} \right) \cdot 1,15 \quad (4.26)$$

Por su parte, la demanda eléctrica del sistema de condensación por compresión de vapor se define a partir de las especificaciones nominales de operación del motocompresor comercial seleccionado. A partir de este requerimiento base, se plantean dos alternativas de suministro renovable para evaluar su viabilidad técnica en la localidad.

4.4.1 Metodología de Dimensionamiento del Sistema Fotovoltaico

Para evaluar la viabilidad del suministro solar como alternativa de alimentación autónoma (*Off-Grid*) del prototipo híbrido, se definió un modelo de dimensionamiento basado en la demanda eléctrica de los equipos y la disponibilidad del recurso solar en la zona de emplazamiento. El recurso solar local se caracteriza mediante el indicador de Horas de Sol Pico (HSP) promedio diario, obtenido a partir de la base de datos satelital de la plataforma NASA POWER (NASA Langley Research Center, 2024).

La potencia pico requerida (P_{pico} , en Wp) para el arreglo fotovoltaico se determina a partir del consumo energético diario máximo del prototipo (E_{diaria}) y la eficiencia global estimada del sistema (η_{sis}), la cual contabiliza las pérdidas asociadas a temperatura, eficiencia del inversor, cableado y suciedad de los módulos:

$$P_{pico} = \frac{E_{diaria}}{HSP \cdot \eta_{sis}} \quad (4.27)$$

Con la potencia pico total calculada y definiendo la potencia nominal unitaria de un módulo fotovoltaico comercial (P_{panel}), la cantidad requerida de paneles ($N_{paneles}$) se obtiene redondeando al entero superior inmediato:

$$N_{paneles} = \left\lceil \frac{P_{pico}}{P_{panel}} \right\rceil \quad (4.28)$$

Para garantizar la continuidad operativa durante periodos sin insolación o baja irradiancia, el diseño del almacenamiento autónomo requiere dimensionar un banco de baterías. El cálculo fija los días de autonomía deseados (N_{dias}) y establece una Profundidad de Descarga máxima (DoD_{max}) para preservar la vida útil de los acumuladores. La capacidad energética bruta de almacenamiento (E_{bruta} , en Wh) se rige por:

$$E_{bruta} = \frac{E_{diaria} \cdot N_{dias}}{DoD_{max}} \quad (4.29)$$

A partir del voltaje nominal de operación en corriente continua del banco (V_{DC}), la capacidad eléctrica total necesaria en Amperes-hora (C_{banco}) y el número final de unidades de almacenamiento ($N_{baterias}$) para baterías de capacidad unitaria ($C_{unitaria}$) se calculan mediante:

$$C_{banco} = \frac{E_{bruta}}{V_{DC}} \quad ; \quad N_{baterias} = \left\lceil \frac{C_{banco}}{C_{unitaria}} \right\rceil \quad (4.30)$$

4.4.2 Evaluación y Dimensionamiento del Sistema Eólico

La evaluación de la alternativa eólica requiere extrapolar los datos anemométricos medidos en terreno a la altura de operación real del rotor. Se define una altura de instalación de 10 metros para el aerogenerador. La corrección de la velocidad del viento a esta cota se realiza aplicando el modelo de perfil logarítmico de velocidades, el cual caracteriza la fricción inducida por la topografía y vegetación local del sitio (Masihy, 2026). La estimación de la velocidad se rige por la siguiente ecuación:

$$v(z) = \frac{u^*}{k} \ln \left(\frac{z - d_0}{z_0} \right) \quad (4.31)$$

Donde $v(z)$ es la velocidad del viento a la altura z , u^* es la velocidad de fricción característica del flujo, k es la constante empírica de von Kármán, d_0 representa el desplazamiento del plano cero y z_0 es la longitud de rugosidad del terreno. Los valores específicos adoptados para el modelamiento en El Sarco se detallan en la Tabla 4.6.

Tabla 4.6: Parámetros adoptados para la corrección del perfil logarítmico de velocidad del viento.

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Altura de extrapolación (buje)	z	10,0	m
Constante de von Kármán	k	0,4	Adimensional
Desplazamiento del plano cero	d_0	1,5	m
Longitud de rugosidad	z_0	0,627	m

Para satisfacer la demanda energética máxima del sistema híbrido (3.131 W), se selecciona un aerogenerador comercial con una potencia nominal de 3.000 W (Bornay, 2020). El análisis de viabilidad se efectúa superponiendo la distribución de velocidades del viento corregida a 10 metros sobre la curva de potencia del fabricante. La Figura 4.3 presenta el perfil de generación de la turbina seleccionada, ilustrando el rango de velocidades útiles.



Figura 4.3: Curva de potencia del aerogenerador comercial seleccionado de 3.000 W (Bornay, 2020).

Para el análisis numérico de la generación energética, se realizó un ajuste polinómico de segundo grado sobre la curva de operación del fabricante, permitiendo estimar de manera continua la potencia instantánea entregada por el aerogenerador en función de las velocidades corregidas, rigiéndose por la siguiente ecuación:

$$P(v) = 23,63 \cdot v^2 - 73,935 \cdot v + 45,893 \quad (4.32)$$

Donde $P(v)$ es la potencia eléctrica generada en Watts y v corresponde a la velocidad del viento ajustada a la altura del rotor, expresada en m/s.

4.4.3 Estrategia de Control y Gestión Energética

La estrategia de control del sistema se fundamenta en una lógica de operación dual que evalúa, en primera instancia, la disponibilidad del recurso hídrico atmosférico en la Región de Coquimbo y, posteriormente, la disponibilidad de energía en el banco de almacenamiento. Para evitar el funcionamiento en vacío y el consiguiente desgaste innecesario, el controlador adquiere datos meteorológicos en tiempo real y aplica los siguientes umbrales de activación:

- **Subsistema de Niebla:** Su activación está condicionada a la detección de un Contenido de Agua Líquida (LWC) superior a $0,01 \text{ g/m}^3$.

- **Subsistema de Condensación de Rocío:** El ciclo de refrigeración operará de manera exclusiva cuando los sensores identifiquen una Humedad Relativa (HR) superior al 75 %.

Una vez validadas estas condiciones climáticas, el sistema opera a su capacidad nominal de manera sostenida siempre que el banco de baterías cuente con carga suficiente. La gestión energética se rige por un esquema de operación binario (Encendido/Apagado). Si frente a un periodo prolongado de escasez eólica el banco de baterías alcanza su profundidad de descarga máxima permitida, se interrumpe automáticamente el suministro eléctrico al sistema. Durante este estado de desconexión, el sistema se detiene por completo y la producción de agua decae a cero, permaneciendo en este estado hasta que la generación eólica logre reabastecer el almacenamiento.

Dado que la frecuencia de estos eventos de pérdida de carga y la consecuente penalización sobre la recolección hídrica anual dependerán de forma directa de la disponibilidad de las baterías, se realiza un dimensionamiento de la capacidad de almacenamiento

4.4.4 Dimensionamiento del Sistema de Almacenamiento Energético

Se requiere un sistema de almacenamiento en banco de baterías para garantizar el suministro eléctrico continuo y estabilizar el lazo de control del sistema off-grid, minimizando los eventos de apagón.

Para definir la configuración óptima del banco de almacenamiento, se desarrolló un modelo dinámico del Estado de Carga (SOC), evaluado a intervalos discretos de tiempo. El comportamiento cinético del SOC se rige por el balance neto entre la energía generada por el aerogenerador y la energía consumida por los componentes del sistema, expresado como:

$$\Delta E = E_{\text{generada}} - E_{\text{consumida}} \quad (4.33)$$

Para el modelamiento de la producción energética, la energía consumida es obtenida desde el perfil de carga del sistema. Por su parte, el cálculo de la energía generada integra de forma directa la potencia real entregada por el equipo a lo largo del año utilizando el registro histórico. De este modo, la energía generada se calcula sumando la potencia interpolada para cada intervalo de 10 minutos, rigiéndose por la Ecuación 4.34:

$$E_{\text{generada}} = \sum_{t=1}^n P(v_t) \cdot \Delta t \quad (4.34)$$

Donde $P(v_t)$ representa la potencia instantánea del aerogenerador evaluada explícitamente con la velocidad del viento v ajustada en el intervalo temporal t , y Δt corresponde al paso de integración de 10 minutos.

Capítulo 5

Resultados

En el presente capítulo se exponen y discuten los resultados obtenidos de la evaluación integral del prototipo, acoplando tanto su comportamiento técnico como su viabilidad económica. El análisis comienza con la caracterización meteorológica y las condiciones de borde del entorno de estudio. A continuación, se presentan los resultados del dimensionamiento de los subsistemas y de la planta de generación energética, definiendo los parámetros aerodinámicos y térmicos óptimos, la geometría del equipo y la infraestructura eléctrica necesaria para su autonomía. Posteriormente, se determina el rendimiento de captación hídrica global y se evalúa el desempeño del prototipo a través de su Consumo Específico de Energía (SEC). Finalmente, se desarrolla una evaluación económica basada en el análisis detallado de los costos de capital (CAPEX) y operacionales (OPEX). Utilizando el Costo Nivelado del Agua (LCOW) como indicador principal, se evalúa la competitividad del sistema integrado frente a sus operaciones aisladas y al mercado actual, permitiendo proyectar la viabilidad financiera de esta tecnología en zonas remotas.

5.1 Análisis de Resultados Técnicos

5.1.1 Análisis de Variables Ambientales del Emplazamiento

Los datos empleados corresponden a registros con resolución diaria que abarcan inicialmente desde el 16 de abril de 2016 (0:00:00) hasta el 28 de marzo de 2017 (0:00:00). Cabe destacar que la serie presenta una discontinuidad temporal debido a un corte en la toma de datos comprendido entre el 13 de agosto de 2016 y el 12 de diciembre de 2016. Con el propósito de facilitar la visualización, evitar espacios vacíos en los gráficos y mejorar la interpretación de las tendencias, se ha consolidado la serie de tiempo. Por consiguiente, los resultados temporales se presentan sobre una escala continua de 227 días efectivos de medición (enumerados del Día 1 al Día 227), donde la brecha de datos original se ubica exactamente entre el Día 120 y el Día 121.

Perfiles Termodinámicos

Se presentan los perfiles temporales de humedad relativa y temperatura ambiente durante los 227 días de medición efectivos. Los datos graficados corresponden al promedio diario calculado exclusivamente en la ventana horaria entre las 00:00 y las 08:00 horas. Se emplea este periodo debido a que concentra las condiciones de enfriamiento radiativo requeridas para el cálculo de obtención de agua en el subsistema de condensación de rocío.

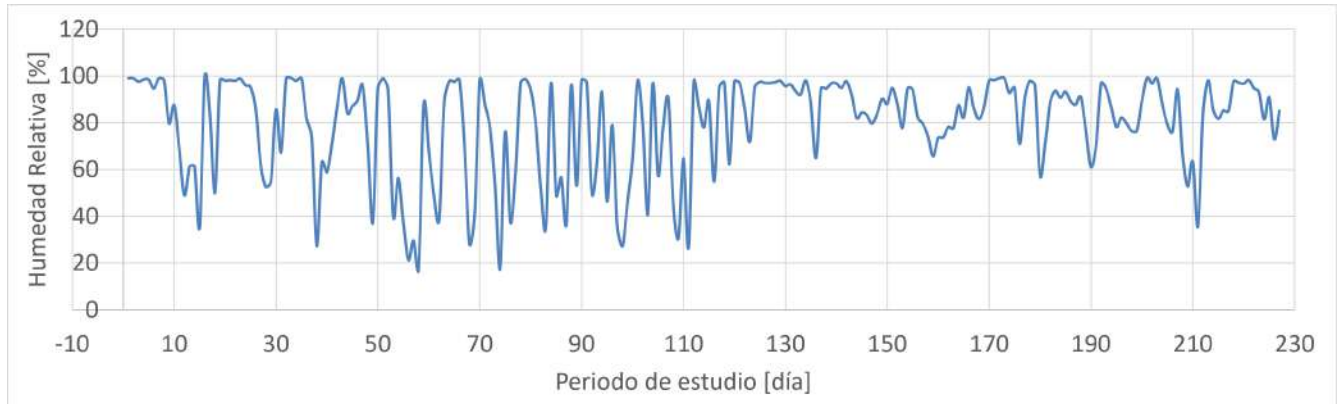


Figura 5.1: Perfil temporal de la humedad relativa promedio (00:00 - 08:00 hrs) para el periodo de evaluación.

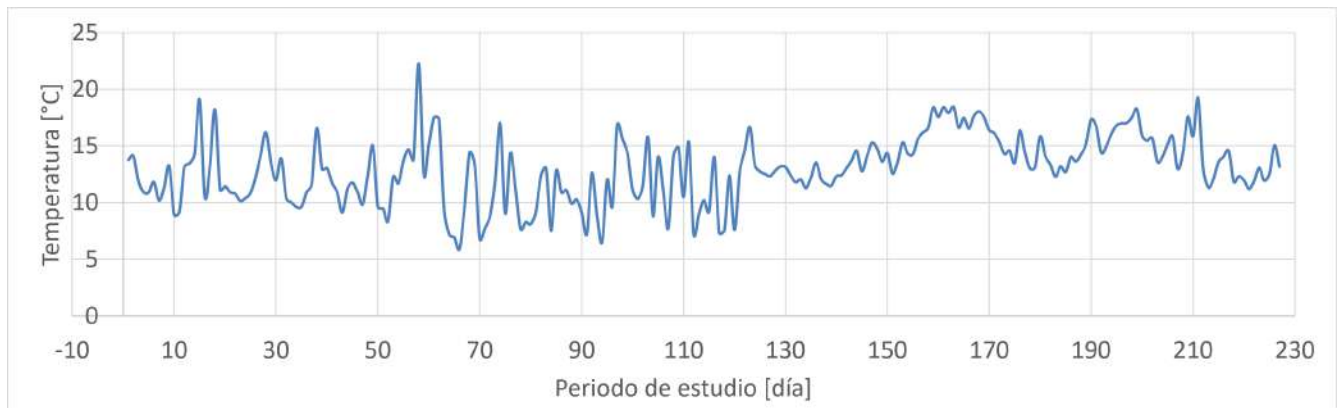


Figura 5.2: Perfil temporal de la temperatura ambiente promedio (00:00 - 08:00 hrs) para el periodo de evaluación.

A partir de las Figuras 5.1 y 5.2, se identifican dos tendencias claras en el comportamiento termodinámico del entorno. En la primera fase del estudio (16 de abril al 13 de agosto de 2016), se observa una marcada fluctuación tanto en la temperatura como en la humedad relativa, registrando promedios de 11,6 °C y 72,8 %, respectivamente. Por el contrario, para el segundo bloque de datos

(12 de diciembre de 2016 al 28 de marzo de 2017), estos perfiles experimentan un aumento junto con una menor dispersión, alcanzando valores medios de 14,5 °C y 86,4 %.

Ajuste de Velocidad del Viento

De acuerdo con los criterios establecidos en la metodología, la evaluación de la viabilidad eólica requiere extrapolar los datos anemométricos medidos a nivel de suelo hacia la altura de operación real del rotor. Para corregir la velocidad del viento y llevarla a esta altura, se aplicó el modelo matemático de perfil logarítmico de velocidades. En la Figura 5.3 se presenta el contraste temporal entre la velocidad del viento original registrada por los instrumentos de medición y el perfil de velocidad final ajustada. Este perfil corregido representa las condiciones fluidodinámicas reales a 10 metros de altura, constituyendo la base de cálculo para estimar la potencia que el sistema eólico suministrará al prototipo.

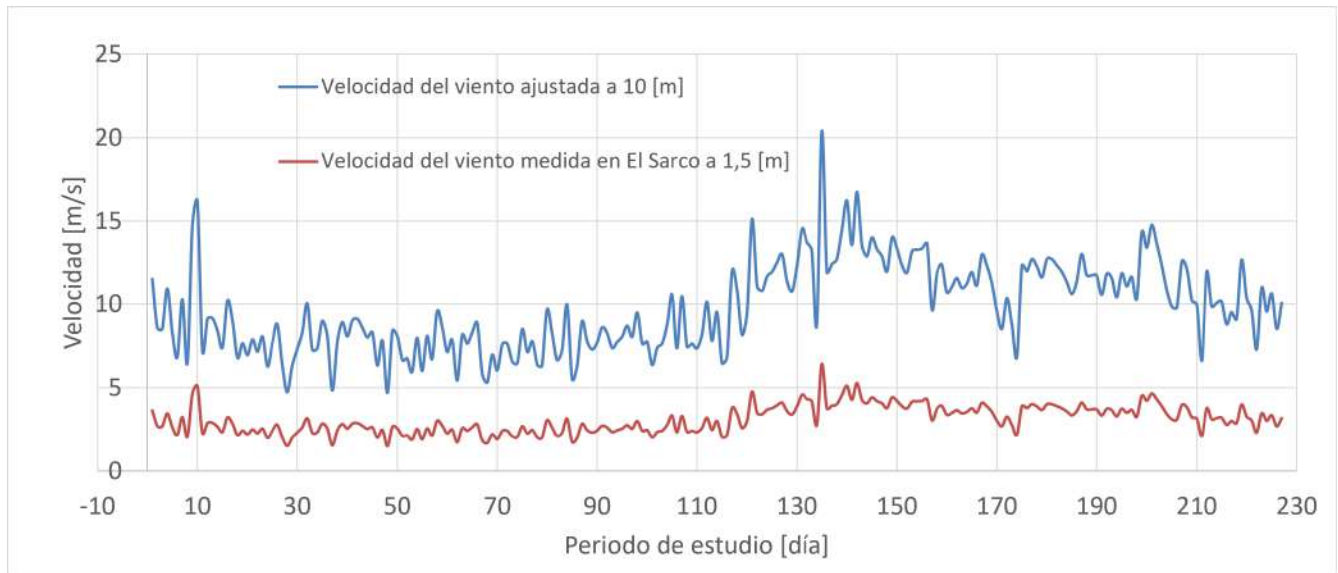


Figura 5.3: Comparación temporal entre la velocidad del viento medida en terreno (1,5 metros) y la velocidad ajustada (10 metros) mediante el perfil logarítmico para el periodo de estudio.

El ajuste revela que la velocidad efectiva del viento a la altura de 10 metros es significativamente mayor que las mediciones realizadas, estabilizándose en un rango de 5 a 20 m/s. mientras que para las mediciones en terreno el rango es entre 1,5 y 6,5 m/s.

Contenido Líquido de Agua (LWC)

Tal como se ilustra en la Figura 5.4, la disponibilidad de agua suspendida en el aire presenta una marcada variabilidad, registrándose un máximo de 0,528 g/m³. Es importante precisar que los

valles en la gráfica, donde el indicador desciende a cero, corresponden estrictamente a días de la campaña de terreno en los cuales no se presentaron eventos de niebla y, por consiguiente, no existió recolección hídrica (con un total de 73 días sin recolección). A pesar de la intermitencia, y en concordancia con los datos ya presentados en la metodología, el promedio general estimado de LWC para toda la serie temporal se situó en $0,125 \text{ g/m}^3$.

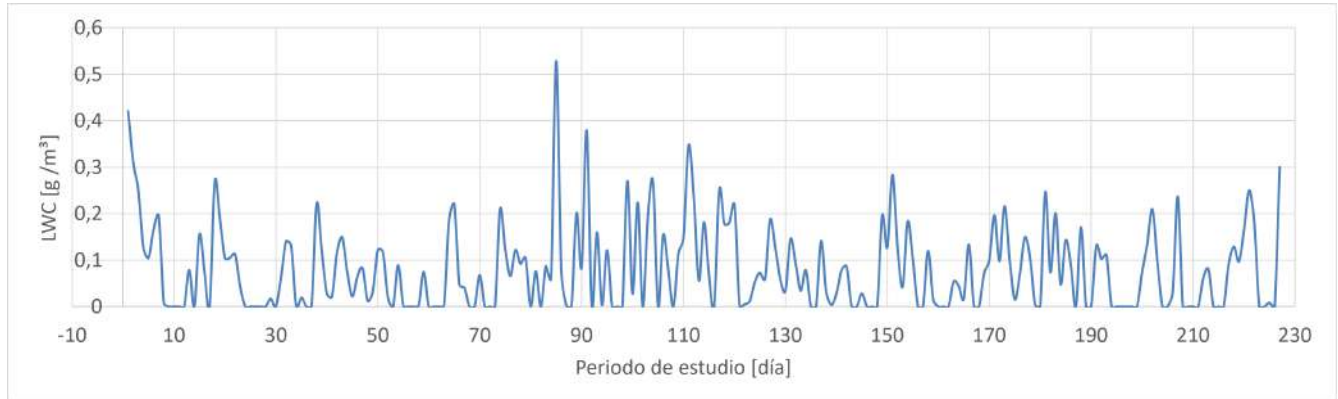


Figura 5.4: Perfil temporal del Contenido de Agua Líquida (LWC) estimado a lo largo del periodo de estudio.

5.1.2 Resultados del Dimensionamiento de los Subsistemas

A partir de las ecuaciones de transporte y los modelos de captura descritos en la metodología, se ejecutó la simulación paramétrica para determinar la geometría y las condiciones de operación óptimas de cada módulo.

Evaluación Aerodinámica del Banco de Filamentos

A partir de la configuración geométrica definida, se evaluó el comportamiento aerodinámico del banco de filamentos. En la Figura 5.5 se presenta la variación del coeficiente de pérdida de presión de Gaddis (ζ) en función de la velocidad del flujo de aire forzado, evidenciando la transición entre los regímenes de flujo y la estabilización del coeficiente a mayores velocidades.

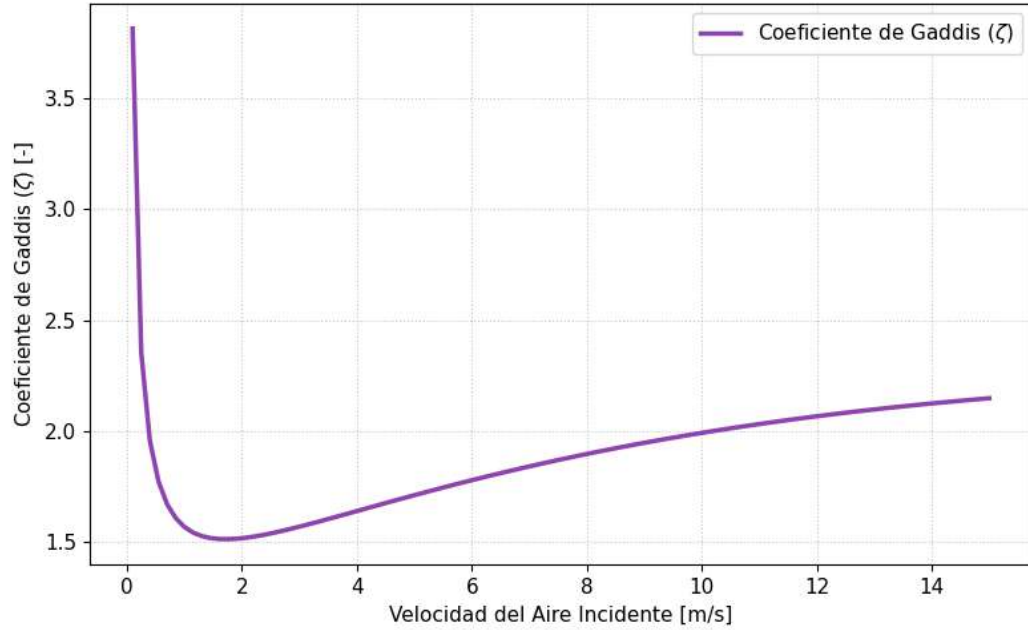


Figura 5.5: Evolución del coeficiente de pérdida de presión de Gaddis (ζ) en función de la velocidad del aire para la configuración geométrica seleccionada ($n_R = 5$, $d = 1,1$ mm, $S_y = 2,8$ mm, $S_x = 5,0$ mm).

Caída de Presión, Optimización de Velocidad, Área Frontal y Potencia Eléctrica

La evaluación del comportamiento aerodinámico anterior impacta directamente en el requerimiento energético del equipo. Para ilustrar este comportamiento, en la Figura 5.6 se presenta la curva teórica que relaciona la velocidad del aire incidente con la caída de presión total generada por el banco de mallas, evidenciando el crecimiento cuadrático de la resistencia aerodinámica ($\Delta P_{sistema}$).

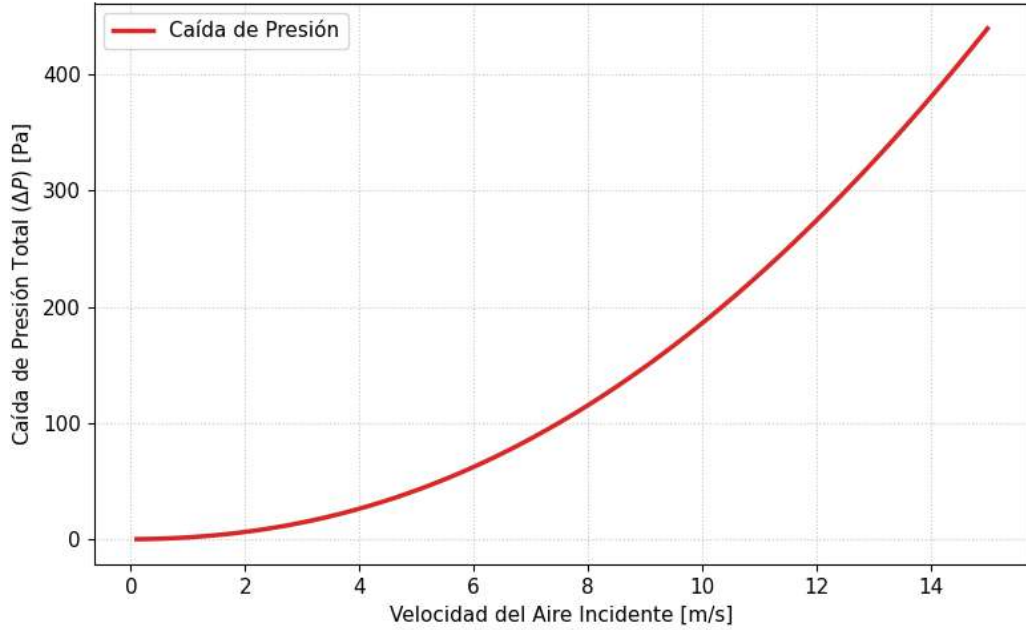


Figura 5.6: Relación entre la velocidad del aire y la caída de presión aerodinámica total ($\Delta P_{sistema}$) a través de los filamentos del colector.

Considerando este rápido incremento en las pérdidas de presión, para el subsistema de captación activa de niebla la evaluación del punto de operación óptimo del ventilador determinó una velocidad de diseño de $v_{viento} \approx 4 \text{ m/s}$. Tal como se observa en la Figura 5.7, en este valor la derivada de la eficiencia de recolección ($d\eta_{coll}/dv_{viento}$) entra en una fase de estabilización asintótica, alcanzando el criterio de parada por ganancia marginal ($\epsilon < 3\%$). Esta velocidad supera la limitante aerodinámica para gotas de $15 \mu\text{m}$ sin incurrir en caídas de presión excesivas que penalicen el consumo del motor.

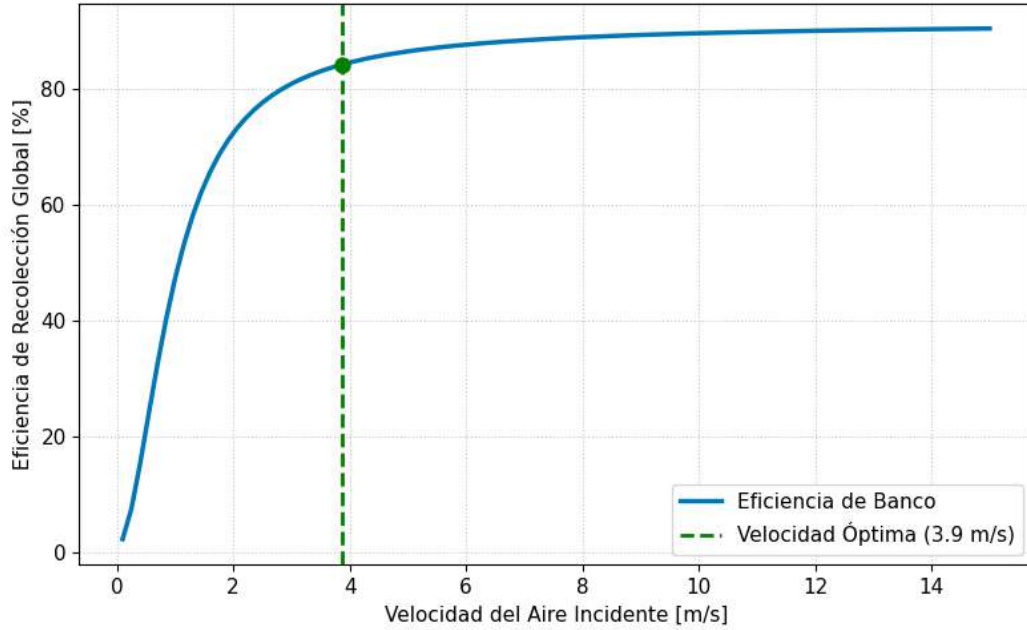


Figura 5.7: Curva de optimización de la velocidad del aire inducido para el módulo de niebla activa.

Con la velocidad fijada en 4 m/s, el sistema presenta una pérdida de carga de 26,4 Pa. Adicionalmente, al evaluar la interacción de este flujo con las series temporales de LWC, el modelo determinó que se requiere un área frontal de captación de $10,8 \text{ m}^2$. Asumiendo una sección transversal circular para el ducto, esta superficie equivale a un diámetro de 3,71 m, parámetro geométrico necesario para cumplir con la meta de producción acumulada de 18.160 litros durante el periodo evaluado.

A partir de estos parámetros consolidados (caída de presión, área transversal y velocidad), se calculó la potencia mecánica necesaria para impulsar el caudal de aire a través de la malla, obteniendo un requerimiento de 1.139 W. Aplicando los factores de eficiencia y seguridad establecidos en la metodología, la potencia eléctrica real de diseño para el ventilador ($P_{elec,vent}$) resultó en 1.871 W.

Dimensionamiento del Intercambiador y Selección del Compresor para el Módulo de Condensación

Para el subsistema de condensación de rocío, el dimensionamiento térmico mediante el software *Danfoss Coolselector 2* llevó a la selección comercial del motocompresor hermético **VTZ038-G**. Este equipo fija una potencia eléctrica nominal de 1.260 W y un Coeficiente de Desempeño (COP) de 4,37 para las condiciones térmicas promedio de la zona.

Fijada la capacidad frigorífica disponible ($\dot{Q}_{disp} = 1.260 \text{ W} \cdot 4,37$), se realizó el análisis de sensibilidad geométrica del intercambiador de tubos y aletas. En la Figura 5.8 se presenta la

producción anual simulada para distintas áreas frontales del evaporador.

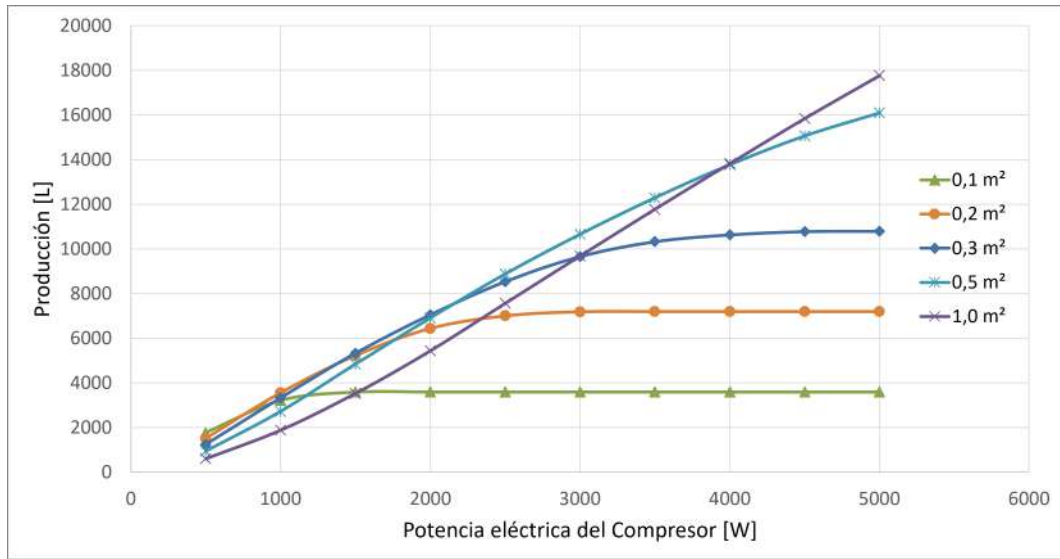


Figura 5.8: Análisis de sensibilidad térmica: Evaluación de la producción de agua anual en función del área frontal del evaporador operando a potencia constante (1.260 W, COP 4,37).

Los resultados indican que áreas inferiores a $0,25 \text{ m}^2$ saturan rápidamente la capacidad de extracción de calor sensible. Se estableció que un área frontal de $0,25 \text{ m}^2$ representa el punto de diseño óptimo, logrando absorber eficientemente la potencia térmica del compresor para satisfacer la cuota de respaldo programada (~ 4.540 Litros) sin incurrir en sobredimensionamiento físico.

5.1.3 Resultados del Dimensionamiento Energético

La determinación de la carga eléctrica total del prototipo híbrido en operación simultánea estableció una potencia eléctrica de diseño de 1.871 W para el ventilador del módulo de niebla (incorporando eficiencias mecánicas y factor de seguridad) y 1.260 W para el compresor de refrigeración, alcanzando una demanda máxima conjunta de 3.131 W y un consumo diario máximo de 49.364 Wh/día .

Evaluación de la Alternativa Fotovoltaica

A partir de una disponibilidad de $4,11$ Horas de Sol Pico (HSP) en El Sarco y considerando una eficiencia global del sistema del 80% , el dimensionamiento fotovoltaico exigió una potencia pico de $15.013,4 \text{ Wp}$. En la Tabla 5.1 se sintetizan los parámetros y requerimientos calculados para este sistema autónomo.

Tabla 5.1: Resumen de parámetros de diseño y resultados del dimensionamiento del sistema fotovoltaico (Off-Grid).

Parámetro	Valor	Unidad
Horas de Sol Pico (HSP) promedio	4,11	h
Consumo máximo diario del prototipo	49.364,0	Wh
Eficiencia global del sistema (η_{sis})	80	%
Potencia pico requerida para el campo solar	15.013,4	Wp
Potencia nominal unitaria del panel seleccionado	650	W
Cantidad total de paneles fotovoltaicos	24	unidades
Días de autonomía de diseño	2	días
Profundidad de descarga máxima permitida (DoD)	85	%
Capacidad bruta del banco de almacenamiento	116.150,6	Wh
Voltaje de operación en corriente continua	48	V
Capacidad eléctrica total del banco	2.419,8	Ah
Cantidad total de baterías (100 Ah/unidad)	25	unidades

A pesar de la factibilidad teórica del arreglo de 24 paneles (650 W cada uno), el sistema fotovoltaico fue descartado debido a desacoples técnicos y logísticos críticos:

1. **Desfase temporal del recurso:** Existe una oposición entre la generación solar diurna y la ocurrencia de los eventos hídricos (niebla y rocío), los cuales suceden mayoritariamente durante la noche y madrugada.
2. **Restricción espacial y topográfica:** La instalación exige entre 150 y 180 m² de superficie plana libre de sombreado, condición impracticable en la cumbre irregular de los cerros costeros donde se emplazan los colectores.

Selección y Dimensionamiento del Sistema de Generación Eólica

En contraposición, el perfil anemométrico corregido a 10 m de altura demostró una generación continua día y noche. Se seleccionó un aerogenerador comercial de 3.000 W de potencia nominal acoplado a un banco de almacenamiento en baterías. Las especificaciones técnicas principales y parámetros de diseño del sistema eólico-eléctrico se resumen en la Tabla 5.2.

Tabla 5.2: Parámetros técnicos y de diseño del sistema de generación eólica y almacenamiento.

Parámetro / Especificación	Valor	Unidad
<i>Sistema de Generación Eólica</i>		
Potencia nominal del aerogenerador	3.000	W
Altura del buje / rotor (z)	10,0	m
Tensión nominal de generación	48	VDC
Demanda eléctrica máxima simultánea del prototipo	3.131	W
<i>Sistema de Almacenamiento (Baterías $LiFePO_4$)</i>		
Capacidad nominal unitaria	100	Ah
Tensión nominal de banco	48	VDC
Profundidad de Descarga máxima (DoD_{max})	85	%
Déficit energético máximo en evento crítico (ΔE_{min})	17,0	kWh
Cantidad total de baterías seleccionadas	5	unidades

El modelo dinámico del Estado de Carga (SOC) del banco de almacenamiento evaluó los balances energéticos diarios continuos. Se identificó un evento crítico de bajo viento que generó un déficit de energía máximo acumulado (ΔE mínimo) de 17 kWh. Para cubrir esta demanda bajo una Profundidad de Descarga (DoD_{max}) del 85%, se determinó un requerimiento teórico de 4,17 baterías comerciales (48 V, 100 Ah), definiéndose la instalación definitiva de un banco de **5 unidades** de almacenamiento para garantizar la continuidad operativa.

5.1.4 Rendimiento Hídrico

Tal como se estableció en el marco metodológico, el dimensionamiento conceptual del sistema fijó una meta base de diseño de 100 L/día promedio, la cual fue desagregada en un aporte objetivo de 80 L/día para el módulo de recolección activa de niebla (como fuente principal) y 20 L/día para el subsistema de condensación de rocío (como respaldo constante). Al consolidar los datos de la simulación dinámica, y realizando los ajustes energéticos, se obtuvo un desempeño con un rendimiento global de 99,8 L/día, alcanzando una producción total de 22.645 litros de agua. En la Figura 5.9 se presenta la evolución temporal del volumen de agua total acumulada, permitiendo apreciar la contribución simultánea de ambos módulos.

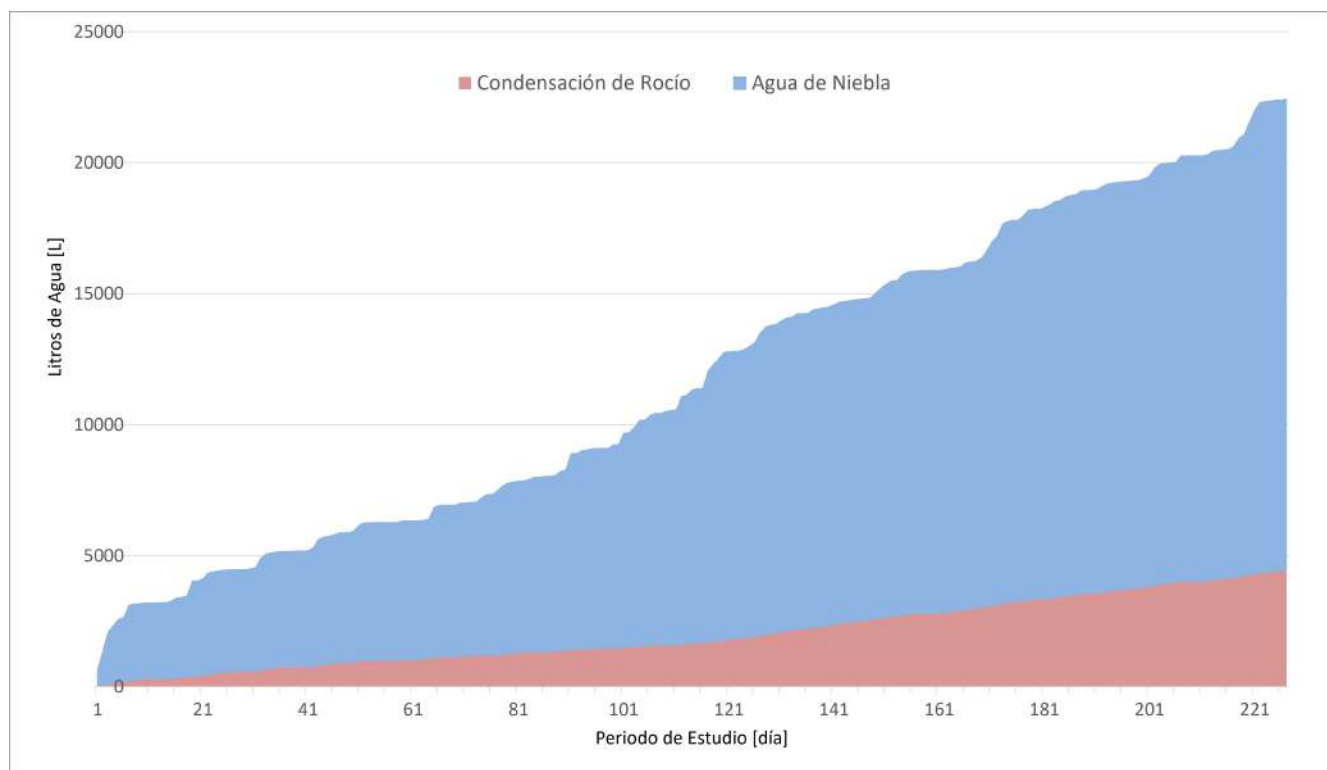


Figura 5.9: Evolución del volumen de agua total acumulada por los subsistemas de recolección activa de niebla y condensación de rocío a lo largo del periodo de estudio.

El comportamiento gráfico de las áreas apiladas permite validar la sinergia del diseño híbrido propuesto. Por un lado, el perfil de condensación de rocío (área inferior) exhibe un crecimiento constante y predecible produciendo un total de 4.479 litros. Por otro lado, la curva de captación de niebla (área superior) se incrementa de forma escalonada, respondiendo a la intermitencia y densidad de los eventos de niebla, con una producción de 18.166 litros.

5.1.5 Desempeño Energético

Este análisis parte de la caracterización de los requerimientos eléctricos de los componentes principales. En la Tabla 5.3 se resumen las potencias nominales de los equipos y la energía máxima diaria registrada.

Tabla 5.3: Resumen de requerimientos eléctricos y consumo máximo del sistema híbrido.

Subsistema / Componente	Potencia Eléctrica [W]	Energía Máx. Diaria [Wh/día]
Recolección de Niebla (Ventilador)	1.871	39.286
Condensación de Rocío (Compresor)	1.260	10.083
Total Sistema Híbrido	3.131	49.365

El indicador estándar para cuantificar la eficiencia hídrico-energética es el Consumo Específico de Energía (SEC), medido en KWh/L. Para este estudio, el SEC diario se calculó de forma independiente para cada módulo. Para el subsistema de niebla, se multiplicó la potencia del ventilador por la duración efectiva de cada evento y se dividió por el volumen recolectado:

$$SEC_{niebla} = \frac{P_{vent} \cdot t_{evento}}{V_{niebla} \cdot 3600 \cdot 1000}$$

Por otro lado, para el subsistema de condensación de rocío, se asumió un funcionamiento constante durante la ventana termodinámica favorable, correspondiente a 8 horas diarias (de 00:00 a 08:00 hrs):

$$SEC_{rocio} = \frac{P_{compresor} \cdot 8 \text{ h}}{V_{rocio}}$$

En las Figuras 5.10 y 5.11 se ilustra el comportamiento temporal del SEC para ambos subsistemas. El módulo de recolección de niebla presenta un consumo específico promedio de 0,21 kWh/L; no obstante, existe una notable variabilidad con máximos que alcanzan hasta los 1,2 kWh/L. Estos peaks de consumo ocurren durante jornadas donde el Contenido de Agua Líquida es mínimo, lo que significa que el ventilador opera con un arrastre hídrico mínimo, encareciendo el costo energético por unidad de volumen.

Por el contrario, el subsistema de condensación de rocío evidencia un perfil de consumo más estable, registrando un SEC promedio de 0,36 kWh/L y un valor máximo de 0,63 kWh/L.

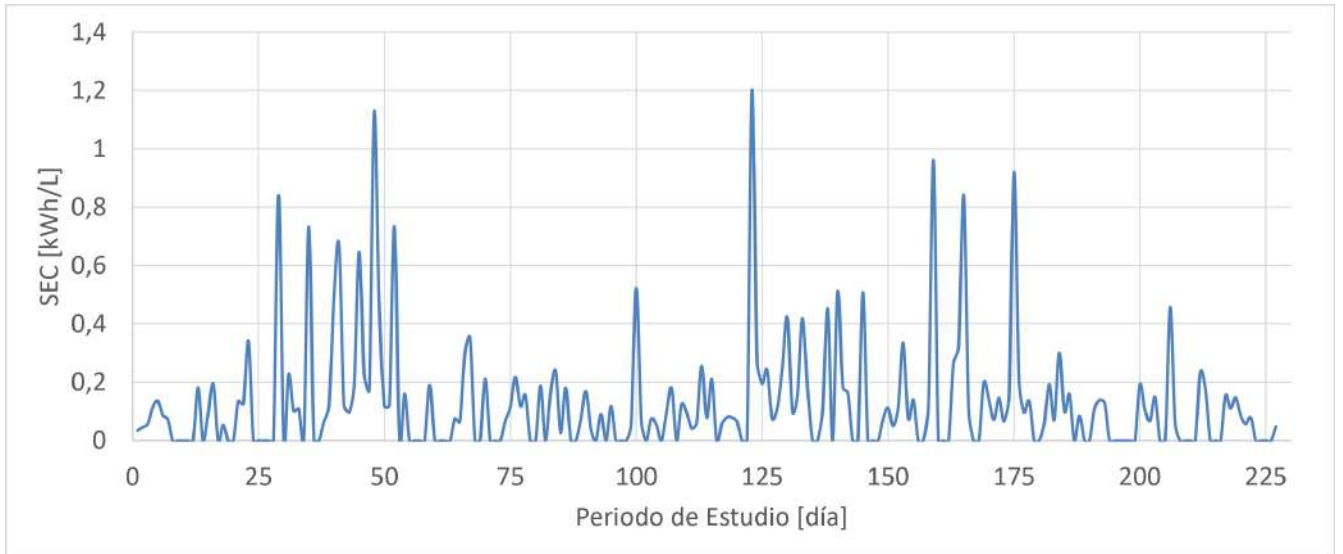


Figura 5.10: Comportamiento del Consumo Específico de Energía (SEC) para el subsistema de recolección activa de niebla.

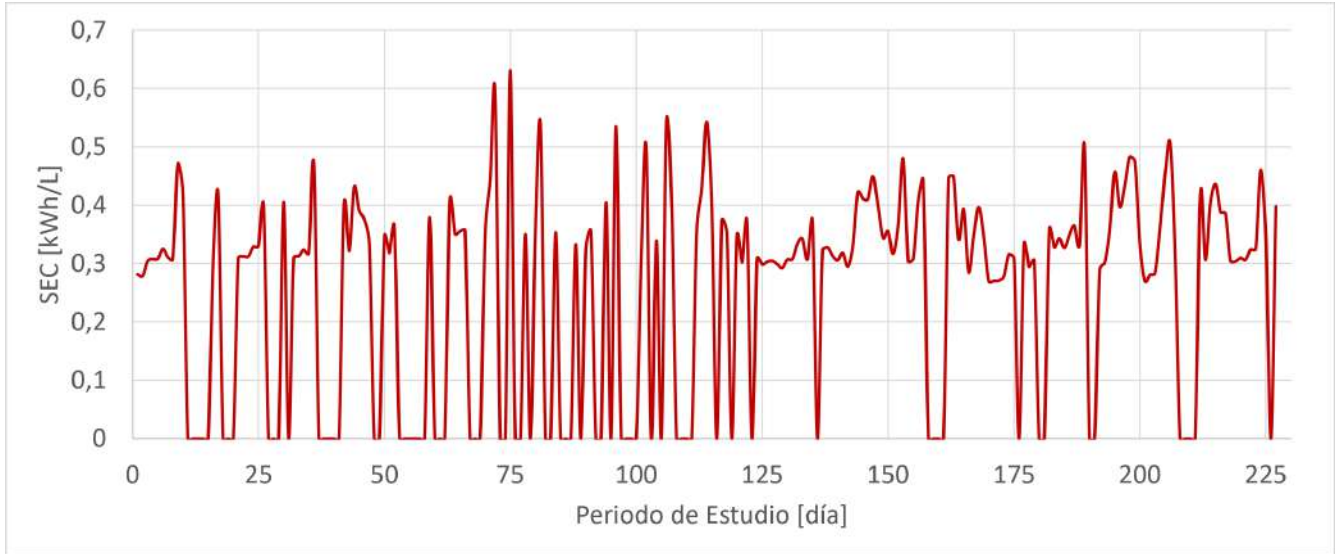


Figura 5.11: Comportamiento del Consumo Específico de Energía (SEC) para el subsistema de condensación de rocío.

Sensibilidad del Módulo de Niebla (SEC vs. LWC)

El rendimiento energético del módulo aerodinámico depende críticamente de la disponibilidad de masa hídrica en el aire. En la Figura 5.12 se presenta la relación entre el Contenido de Agua Líquida (LWC) y el SEC diario.

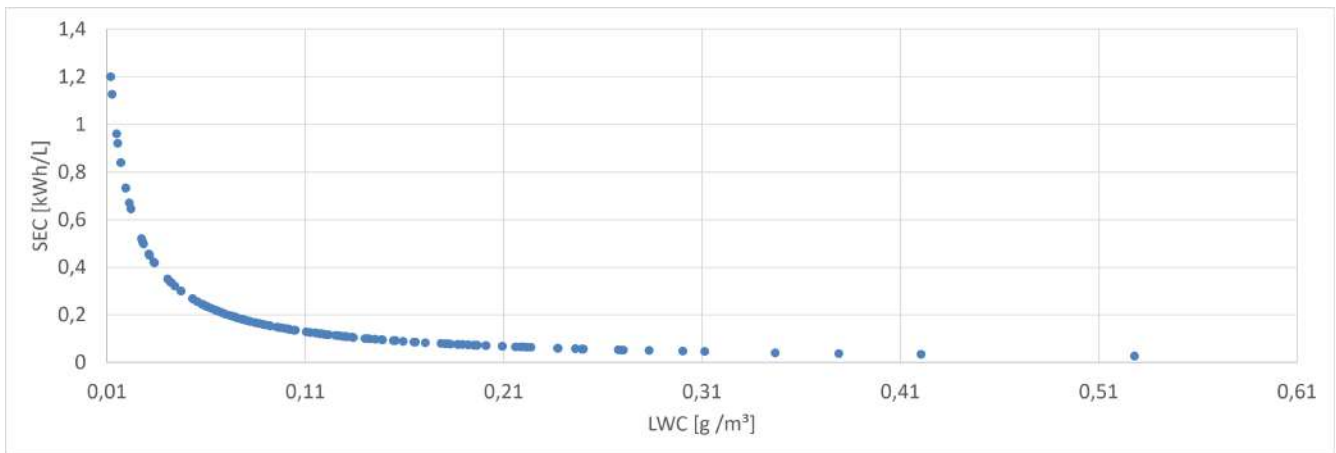


Figura 5.12: Relación entre el Contenido de Agua Líquida (LWC) y el Consumo Específico de Energía (SEC) en el módulo de niebla.

En los días con eventos de alta densidad (mayor LWC), el volumen recolectado aumenta, lo que disminuye el costo energético por litro, maximizando la eficiencia operativa del módulo.

Sensibilidad del Módulo de Rocío (SEC vs. Humedad Relativa)

Para el ciclo de compresión de vapor, la variable impulsora de la condensación es la proximidad al punto de rocío. La Figura 5.13 correlaciona la Humedad Relativa (HR) promedio nocturna con el SEC del módulo de rocío.

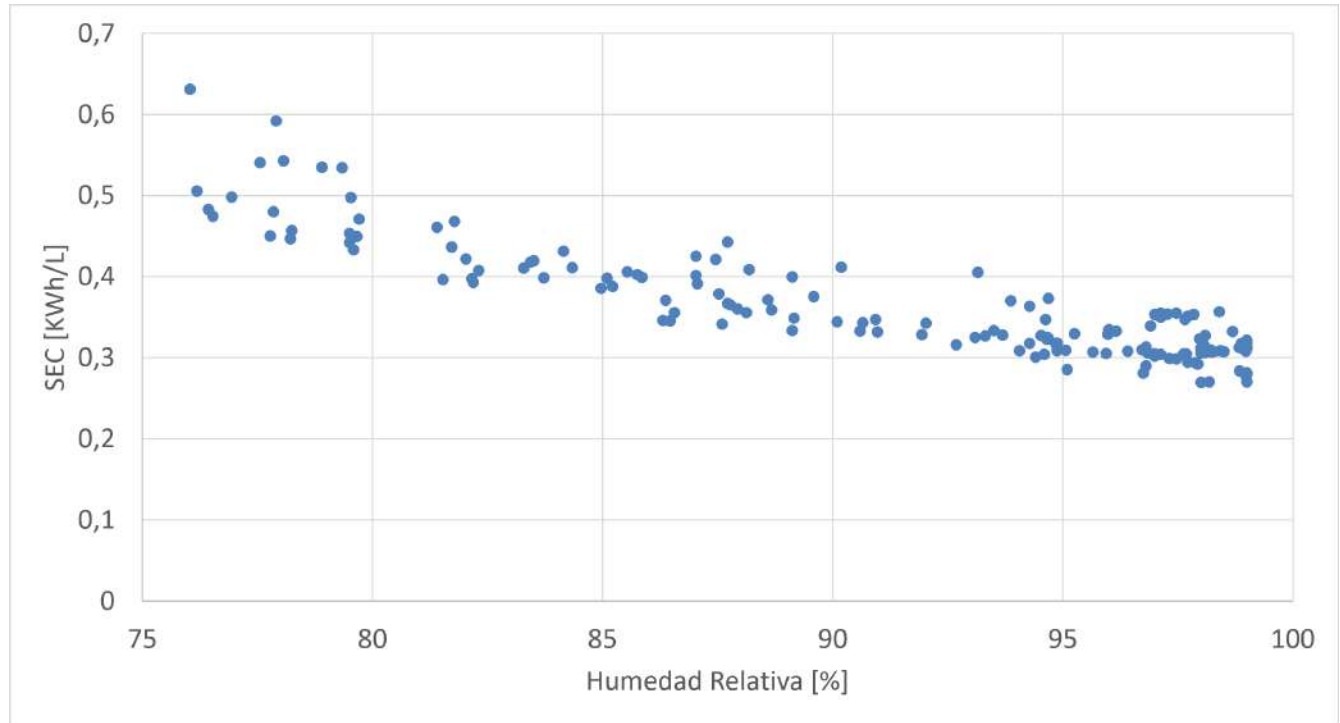


Figura 5.13: Variación del Consumo Específico de Energía (SEC) del módulo de condensación en función de la Humedad Relativa (HR) ambiental.

Se demuestra que un aumento en la humedad relativa ambiental incrementa la tasa de transferencia de masa hacia el evaporador. Al mantener el compresor consumiendo una potencia constante de 1.260 W durante las 8 horas de operación, las noches con mayor HR producen un volumen de agua superior, reduciendo proporcionalmente el SEC.

Consumo Específico de Energía (SEC) Global

Para determinar el desempeño energético del prototipo, se calculó inicialmente el Consumo Específico de Energía (SEC) de manera independiente para cada subsistema y, posteriormente, para el equipo en su totalidad. Este indicador termodinámico viene dado por la siguiente expresión:

$$SEC = \frac{\sum \text{Energía (kWh)}}{V_{total}}$$

Se evalúan los subsistemas de forma aislada, el módulo de niebla demuestra mayor eficiencia que el módulo de condensación, que registra un consumo mayor.

Finalmente, al evaluar el prototipo operando bajo la estrategia de control y gestión energética, se acopló la energía total consumida por ambos módulos durante los 227 días de simulación y se dividió por el volumen total consolidado de 22.645 litros producidos. El resumen comparativo de los rendimientos obtenidos se presenta en la Tabla 5.4.

Tabla 5.4: Resultados del Consumo Específico de Energía (SEC) por módulo y global

Subsistema / Modo de Operación	SEC Estimado (kWh/L)
Módulo de Niebla (Aislado)	0,10
Módulo de Condensación (Aislado)	0,35
Sistema Híbrido Global	0,15

5.1.6 Diagrama de Flujo de Procesos (PFD) del Sistema

Para consolidar los resultados del dimensionamiento técnico y visualizar la interacción entre la generación hídrica y la matriz energética, se elaboró un Diagrama de Flujo de Procesos (PFD) simplificado del prototipo híbrido. La Figura 5.14 presenta el diagrama general del equipo, destacando el circuito electrónico, los lazos de control y la dirección de los flujos másicos.

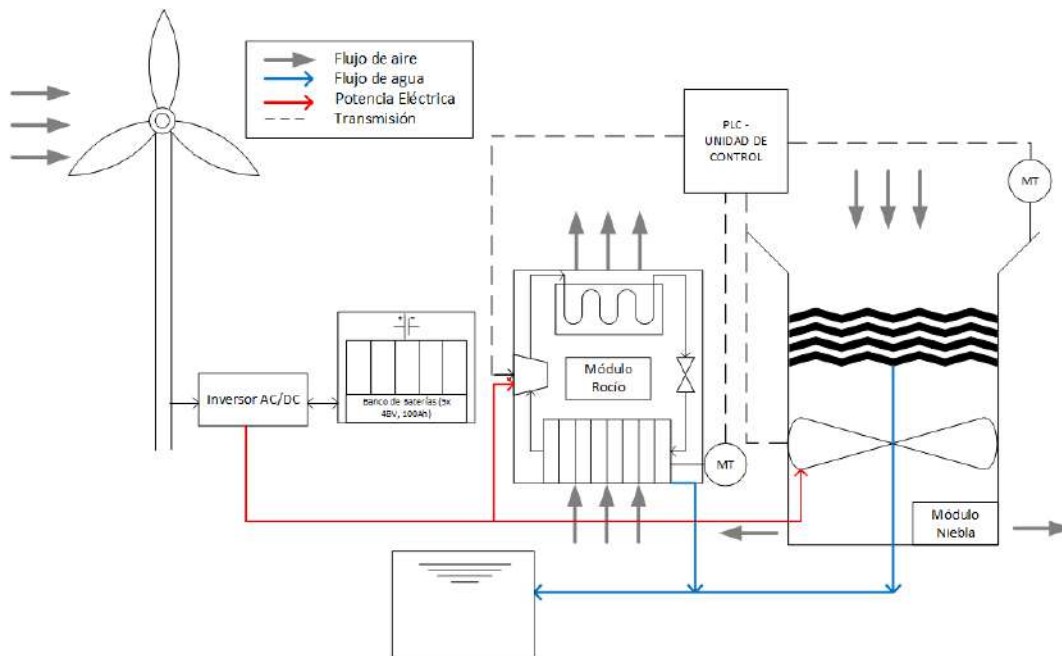


Figura 5.14: Diagrama de Flujo de Procesos (PFD) simplificado del prototipo híbrido de captación de agua atmosférica.

5.2 Análisis de Resultados Económicos

El presente análisis tiene como objetivo determinar la viabilidad financiera del sistema de recolección de agua atmosférica. Para el modelado económico, se estableció un horizonte de evaluación del proyecto de 20 años y se aplicó una tasa de descuento del 6%, valores alineados con los estándares internacionales para proyectos de infraestructura energética eólica (Jurasz et al., 2025).

Cabe señalar que, dado que el desempeño técnico del prototipo fue validado mediante un periodo de simulación meteorológica de 227 días, los resultados obtenidos de producción hídrica y consumo energético fueron extrapolados a una base anual (365 días) mediante un factor de ajuste proporcional, asumiendo una representatividad climatológica constante durante el ciclo estacional completo.

5.2.1 Costos de Inversión (CAPEX)

La estimación de los costos de inversión inicial (CAPEX) del proyecto se ha dividido en dos bloques principales: el sistema de generación energética y el equipamiento de recolección de agua atmosférica. Para la estimación se consideró el costo de los equipos sumado a los costos de instalación, obras civiles y componentes auxiliares.

Sistema de Generación Eólica

Para el suministro energético autónomo del sistema, se seleccionó un aerogenerador trifásico de imanes permanentes con una potencia nominal de 3.000 W. El costo de este equipamiento principal incluye el rotor, un controlador de voltaje, un inversor de baja frecuencia de onda sinusoidal pura y una torre de 10 metros de altura (Power Inverter Chile, 2026). al costo del equipo base se le deben adicionar los siguientes componentes y servicios:

- **Banco de Almacenamiento:** 5 baterías de 48V $LiFePO_4$, 100 Ah (Bekam, 2026).
- **Obras Civiles:** Materiales y mano de obra para la excavación y hormigonado de la zona de instalación.
- **Instalación eléctrica:** Cableado de transmisión en corriente continua, tableros de protección, y construcción del sistema de puesta a tierra.
- **Logística y Montaje:** Transporte de los equipos e instalación en terreno.

Para determinar el costo total instalado del sistema eólico a partir de la cotización base, se aplicó la metodología de estimación por factores de Lang. Se utilizaron como referencia los parámetros

estándar para plantas de procesamiento de fluidos descritos por literatura de ingeniería económica (Peters et al., 2003).

Considerando el Costo del equipo (que incluye el aerogenerador, el inversor, la torre y el banco de baterías) como la base de cálculo (100%), se estimaron los costos directos asociados a la instalación mecánica, la integración eléctrica y las obras civiles. El desglose y el costo total de inversión se resumen en la Tabla 5.5.

Tabla 5.5: Estimación de Costos Directos del Sistema Eólico mediante Factores de Lang

Ítem de Inversión	Factor de Lang	Costo Estimado (CLP)
Equipamiento Principal y Baterías	100%	\$ 11.973.000
Instalación Mecánica, Logística y Montaje	17%	\$ 2.035.410
Instrumentación, Control e Integración Eléctrica	7%	\$ 838.110
Obras Civiles y Acondicionamiento del Sitio	10%	\$ 1.197.300
Total Inversión Directa (CAPEX Eólico)	134%	\$ 16.043.820

Sistema de Recolección de Agua Atmosférica

El costo de capital (CAPEX) del sistema de recolección de agua se estimó dividiendo la infraestructura en sus dos subsistemas operativos principales: captación de niebla activa y condensación de rocío.

Para el subsistema de captación de niebla activa, el costo de la carcasa estructural se aproximó utilizando la cotización de una torre de enfriamiento, dado que comparten características geométricas y aerodinámicas similares (Insumin Chile, 2026). Para la valorización del ventilador de extracción, se tomó como referencia un equipo comercial de alto caudal y baja velocidad (HVLS), valor escalado con ajuste para ventiladores del rango de caudal utilizado (Peters et al., 2003). Al costo base de la carcasa y el ventilador se le aplicaron factores de instalación correspondientes a instalación eléctrica y de control y logística y montaje mecánico. El desglose se presenta en la Tabla 5.6.

Tabla 5.6: Estimación de Costos Directos del Subsistema de Niebla Activa

Ítem de Inversión	Factor	Costo Estimado (CLP)
Carcasa	-	\$ 10.000.000
Ventilador	-	\$ 1.890.455
Subtotal Equipamiento Base	100%	\$ 11.890.455
Instalación Eléctrica y Control	10%	\$ 1.189.045
Logística y Montaje	21%	\$ 2.496.995
Total Inversión (CAPEX Niebla)	131%	\$ 15.576.496

Por otra parte, el subsistema de condensación de rocío se valorizó cuantificando individualmente los componentes principales de su ciclo frigorífico: un compresor, dos intercambiadores de calor

(asumiendo costos equivalentes para las unidades condensadora y evaporadora), dos ventiladores axiales y la carga de gas refrigerante.

A la suma de estos equipos principales (100%), se le adicionó la estructura en donde se almacenarán los componentes, basándose en precios de un gabinete eléctrico IP55 (Vitel Energía, 2026). Finalmente, se aplicaron los factores de integración eléctrica y montaje utilizados en los costos de inversión inicial. Los costos asociados se detallan en la Tabla 5.7.

Tabla 5.7: Estimación de Costos Directos del Subsistema de Condensación de Rocío

Ítem de Inversión	Factor	Costo Estimado (CLP)
Compresor	-	\$ 600.000
Intercambiadores de Calor (Evap. y Cond.)	-	\$ 535.146
Ventiladores Axiales (2 unidades)	-	\$ 200.000
Gas Refrigerante	-	\$ 200.000
Estructura	-	\$ 720.176
Subtotal Equipamiento Base	100%	\$ 2.255.322
Instalación Eléctrica y Control	10%	\$ 225.532
Logística y Montaje	21%	\$ 473.618
Total Inversión (CAPEX Rocío)	131%	\$ 2.954.472

Para validar el costo total de inversión (CAPEX) estimado, se realizó un benchmarking referencial con equipos deshumidificadores comerciales de capacidad frigorífica y volumétrica equivalente (rango de 90 a 120 L/día nominales). La revisión de mercado de unidades comerciales sitúa el valor de estos equipos en un rango de \$3.600.000 a \$3.900.000 CLP (Magnotek, 2026; H2otek, 2026). El costo estimado para el subsistema del prototipo representa una reducción aproximada del 20% al 25% frente a los valores comerciales. Esta diferencia se justifica técnicamente al tratarse de un diseño de ingeniería ensamblado a partir de componentes primarios, excluyendo los márgenes de comercialización. Cabe destacar que, si bien los coeficientes de instalación seleccionados se fundamentan en los rangos teóricos recomendados por la literatura de ingeniería económica para plantas de procesamiento sólido-fluido (Peters et al., 2003), la fijación numérica exacta de cada factor responde a criterios de ingeniería en terreno y a la experiencia logística de montaje. En particular, los porcentajes fueron ajustados considerando la accesibilidad vial del emplazamiento en El Sarco, la topografía irregular de la cima costera, los costos reales de maniobra en sitio y la complejidad intrínseca del despliegue de infraestructura en la zona aislada.

5.2.2 Costos Operacionales (OPEX)

Los costos operacionales y de mantenimiento (OPEX) se estimaron como un porcentaje fijo de la inversión inicial (CAPEX) para cada subsistema, considerando un horizonte de evaluación del proyecto de 20 años. Para el sistema de generación eólica, se consideró un costo anual de operación

y mantenimiento equivalente al 2,5% de su CAPEX, un valor estándar para la evaluación de viabilidad económica en turbinas eólicas de pequeña escala en sistemas aislados (Jurasz et al., 2025). Adicionalmente, considerando la vida útil operativa y el desgaste cíclico de los sistemas de almacenamiento, el modelo financiero incorpora un recambio total del banco de baterías en el año 10 de operación del aerogenerador.

Por otro lado, para el sistema integrado de recolección de agua atmosférica (que comprende tanto la captación de niebla como la condensación de rocío), se aplicó un factor conservador del 4% anual sobre el costo total instalado. Este porcentaje se basa en las recomendaciones metodológicas de Peters y Timmerhaus para el mantenimiento de plantas de procesos y equipos mecánicos (Peters et al., 2003).

El desglose de los costos operacionales anuales para ambos subsistemas se resume en la Tabla 5.8.

Tabla 5.8: Estimación de Costos Operacionales y de Mantenimiento (OPEX) Anuales

Subsistema	Tasa	Costo Anual Estimado (CLP/año)
Generación Eólica	2,5%	\$ 426.030
Recolección de Agua Atmosférica	4,0%	\$ 741.239
OPEX Total del Sistema	-	\$ 1.167.269

5.2.3 Costo Nivelado del Agua (LCOW)

Para evaluar la viabilidad económica del sistema de captación atmosférica, se determinó el Costo Nivelado del Agua (LCOW). Este indicador consolida la totalidad de los costos de capital (CAPEX) y de operación y mantenimiento (OPEX) de ambos subsistemas (generación eléctrica y recolección hídrica), relacionando el desembolso económico total con la producción anual del sistema.

Para este cálculo se empleó la Ecuación 5.1:

$$LCOW = \frac{TI \cdot CRF + AOM}{AWY} \quad (5.1)$$

donde TI representa la Inversión Total inicial conjunta del aerogenerador y los equipos de recolección hídrica (niebla y rocío); AOM corresponde a los costos anuales de operación y mantenimiento rutinario del sistema integrado; y AWY es el volumen de agua promedio producido anualmente.

El recambio del banco de baterías, programado para el año 10 de operación, se internalizó calculando su Valor Presente e incorporándolo dentro del término de Inversión Total (TI) antes de su anualización. El Factor de Recuperación de Capital (CRF), el cual equivale a un factor de amortización utilizado en el análisis financiero para reflejar el valor del dinero en el tiempo, se

calcula como:

$$CRF = \frac{r(1+r)^n}{(1+r)^n - 1} \quad (5.2)$$

donde r corresponde a la tasa de descuento (6%) y n representa la vida útil del proyecto, fijada en 20 años.

Aplicando esta metodología, se obtuvo un LCOW de **\$119 CLP/L**. Este valor representa el costo real nivelado de producción hídrica del sistema integrado, definiendo el precio mínimo por litro requerido para amortizar el capital invertido y sostener los gastos operativos de manera uniforme durante los años de vida útil del proyecto.

5.2.4 Análisis de Sensibilidad Económica: Sistemas Aislados

Para la evaluación económica de los escenarios de operación independiente, se aplicó la misma metodología del Costo Nivelado del Agua (LCOW). Se ajustaron los consumos energéticos, la proyección de agua producida y los costos de inversión específicos de los módulos de captación de niebla y condensación de rocío por separado.

En el escenario operado exclusivamente mediante el subsistema de niebla, se mantuvo la capacidad de generación eólica de 3 kW y el banco de almacenamiento original (5 unidades). Aunque el balance energético de este subsistema aislado no presenta un déficit neto diario, la incertidumbre de los eventos de niebla impide predecir con exactitud la periodicidad del consumo del ventilador. Por consiguiente, se adoptó un criterio conservador, manteniendo la capacidad de almacenamiento para garantizar la producción y mitigar el riesgo de desabastecimiento. Bajo este esquema, el exceso de capital inmovilizado con baja tasa de utilización eleva el LCOW a **\$136 CLP/L**.

Por otro lado, para el escenario operativo basado únicamente en la condensación de rocío, se dimensionó un aerogenerador de menor escala (1,2 kW), siendo esta potencia suficiente para cubrir los requerimientos del ciclo frigorífico. El sistema de almacenamiento se ajustó en función de la energía total demandada por el equipo durante su ventana operativa nocturna de 8 horas, correspondiente a 10 kWh/noche. Este requerimiento determinó la necesidad de 3 unidades de batería. Evaluando este escenario, se obtuvo un LCOW de **\$198 CLP/L**.

Para consolidar los resultados obtenidos en el análisis de sensibilidad y la evaluación del sistema híbrido, la Tabla 5.9 presenta un resumen de los indicadores clave, contrastando los Costos de Inversión y Operación frente al Costo Nivelado del Agua (LCOW).

Tabla 5.9: Análisis comparativo de indicadores económicos, almacenamiento y capacidad productiva anualizada según configuración operativa.

Configuración	CAPEX Aerogenerador [CLP]	N° Baterías	CAPEX Gen. Atmosférica [CLP]	Producción Hídrica [L/año]	LCOW [CLP/L]
Módulo Aislado Niebla	16.043.820 (3 kW)	5	15.576.496	29.216	136
Módulo Aislado Rocío	8.318.720 (1,2 kW)	3	2.954.472	7.202	198
Sistema Híbrido	16.043.820 (3 kW)	5	18.530.967	36.418	119

En el caso del subsistema de niebla operado de forma aislada, el costo unitario está fuertemente penalizado por la incertidumbre climática, la necesidad de asegurar el funcionamiento energético frente a eventos aleatorios obliga a sostener un banco de baterías que encarece la inversión inicial, el cual permanece subutilizado la mayor parte del tiempo debido a los bajos requerimientos energéticos del equipo. Por su parte, el límite económico del subsistema de rocío aislado se debe por la alta intensidad energética de su ciclo frigorífico y la limitada producción hídrica, lo que exige una infraestructura eléctrica dedicada y constante para su operación continua nocturna, elevando su costo de producción. En consecuencia, la configuración integrada (\$119 CLP/L) logra reducir los costos globales al equilibrar ambas restricciones, mitigando la variabilidad e incertidumbre de la niebla y maximizando la utilización de la infraestructura de almacenamiento compartida.

5.2.5 Análisis Competitivo del Costo Hídrico

Previo a dimensionar el impacto del Costo Nivelado del Agua (LCOW) de 119 CLP/L obtenido por el sistema híbrido, es pertinente señalar que en un escenario de aplicación para consumo humano, este costo unitario experimentaría un incremento. Lo anterior responde a que el recurso recolectado requeriría de una etapa posterior de tratamiento y potabilización, cuyo dimensionamiento y evaluación económica escapan a los alcances de la presente investigación.

Por consiguiente, para evaluar la competitividad del costo de generación hídrica bruta obtenido, es necesario delimitar su nicho tecnológico y de mercado. Este valor resulta económicamente superior a las tarifas del servicio de agua potable por red y Agua Potable Rural (APR), cuyo costo a nivel nacional oscila típicamente entre 1 y 2 CLP/L bajo las estructuras tarifarias reguladas (Superintendencia de Servicios Sanitarios, 2025). En consecuencia, el prototipo no tiene como objetivo competir con infraestructuras centralizadas consolidadas ni con el mercado de consumo directo, sino operar como una solución autónoma para escenarios de aislamiento topográfico y escasez hídrica crítica.

En este contexto, la competitividad del equipo debe evaluarse frente a las alternativas logísticas de abastecimiento remoto y de emergencia, siendo la principal en el territorio nacional la distribución mediante camiones aljibe. La Tabla 5.10 presenta un resumen de los costos unitarios asociados a estas fuentes de suministro.

Tabla 5.10: Análisis comparativo de costos unitarios de suministro hídrico.

Fuente de Abastecimiento	Costo Estimado [CLP/L]
Agua Potable de Red (APR)	1 - 2
Camiones Aljibe	2,5 - 30
Sistema Pasivo de Niebla LFC (Fessehayé et al., 2017)	1,29 - 16,15
Sistema Activo de Condensación AWG (Gayoso et al., 2024)	19 - 380
Sistema Híbrido	119

Como se observa en la comparativa, el costo del suministro mediante camiones aljibe resulta numéricamente inferior al LCOW del sistema propuesto (Fragkou et al., 2022; Vitalina, 2026). Sin embargo, esta alternativa constituye un mecanismo de emergencia que implica un alto y constante desgaste logístico y operacional. Por su parte, los sistemas pasivos de niebla también presentan costos significativamente menores (Fessehayé et al., 2017), sin embargo, su recolección está limitada a la velocidad del viento, estos sistemas sufren de una alta incertidumbre volumétrica ante días de calma y requieren grandes áreas de instalación para escalar su producción. En cuanto a la condensación activa AWG (Gayoso et al., 2024), el tipo de ambiente influye considerablemente en su rendimiento energético y productivo, siendo un factor crucial para evaluar su factibilidad real.

Aunque el sistema híbrido presenta un LCOW de 119 CLP/L, representa una inversión en infraestructura tecnológica que otorga independencia hídrica in situ. Al generar el recurso en el mismo punto de consumo, este diseño logra evadir tanto la intermitencia del reparto logístico como la dependencia extrema de un solo fenómeno climático, consolidándose como una alternativa robusta para garantizar la seguridad hídrica a largo plazo en comunidades de difícil acceso.

5.2.6 Costo Nivelado de la Energía (LCOE)

Para complementar la evaluación económica del prototipo de captación hídrica, se determinó el Costo Nivelado de la Energía (LCOE) asociado de manera exclusiva al subsistema de generación eólica y almacenamiento. Aunque el LCOW constituye la métrica concluyente respecto a la viabilidad del proyecto, el cálculo del LCOE permite evaluar la eficiencia financiera de la infraestructura eléctrica y provee una base estandarizada para comparar el costo de la energía con otras fuentes de generación.

En el modelado tecno-económico de sistemas no interconectados a la red (*off-grid*), la cuantificación del LCOE presenta una divergencia metodológica crítica respecto a los sistemas interconectados. La evaluación estándar para plantas conectadas a la red utiliza la energía total generada como denominador, asumiendo una capacidad de inyección y comercialización ilimitada. La Ecuación 5.3 presenta la expresión matemática de LCOE utilizada para este propósito (Jurasz et al., 2025):

$$LCOE = \frac{CAPEX + \sum_{t=0}^n \frac{OPEX_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{E_t}{(1+r)^t}} \quad (5.3)$$

No obstante, en configuraciones aisladas, la generación eléctrica está limitada por la demanda de la carga y la capacidad finita del banco de baterías. Cuando el almacenamiento alcanza su estado de carga máximo (100 %) y la generación supera el consumo, el sistema debe disipar el excedente, produciendo un recorte de energía o *curtailment*.

Por consiguiente, la estimación del LCOE en escenarios *off-grid* requiere utilizar en el denominador estrictamente la energía útil, entendiéndose esta como la energía efectivamente suministrada y consumida por la carga, excluyendo por completo la fracción de energía desperdiciada (Ueckerdt et al., 2013). Para evidenciar el impacto de esta restricción operativa, se evaluó el LCOE bajo ambos enfoques (energía generada versus energía consumida) para distintas capacidades nominales de aerogeneradores en el sitio de estudio. Los resultados se exponen en la Tabla 5.11.

Tabla 5.11: Comparativa del Costo Nivelado de la Energía (LCOE) según capacidad del aerogenerador evaluado con energía generada y consumida.

Capacidad Nominal [kW]	LCOE - Energía Generada [CLP/kWh]	LCOE - Energía Consumida [CLP/kWh]
1,2	\$ 310	\$ 470
3,0	\$ 133	\$ 374
5,0	\$ 123	\$ 458
10,0	\$ 68	\$ 650

El análisis de los resultados revela una distorsión financiera al evaluar sistemas *off-grid*. Si se considera la energía generada, el equipo de 10 kW aparenta ser el óptimo por economías de escala. Sin embargo, al utilizar la energía efectivamente consumida, su LCOE se dispara a \$650 CLP/kWh debido al alto índice de *curtailment* (energía disipada por falta de almacenamiento). La configuración de 3 kW demuestra ser el diseño técnico-económico óptimo, al registrar el menor costo real, maximizando el acoplamiento entre la generación eólica y el consumo del prototipo.

Capítulo 6

Conclusiones y Recomendaciones

6.1 Conclusiones

El desarrollo de esta investigación permitió diseñar, simular y evaluar un prototipo híbrido de captación de agua atmosférica. Primero, se modelaron teóricamente la captación activa de niebla (impacto inercial) y la condensación de rocío (compresión de vapor). La captura de niebla destacó por su bajo Consumo Específico de Energía (0,10 kWh/L), mientras que la condensación de rocío (0,35 kWh/L) operó como respaldo constante en periodos despejados. Sobre esta base, la simulación dinámica con datos meteorológicos reales de El Sarco optimizó el dimensionamiento. Se determinó que el diseño óptimo (flujo de 4 m/s, áreas de 10,8 m² en malla y 0,25 m² en evaporador) logra superar la estacionalidad climática, produciendo 99,8 L/día (22.645 L/año) y cumpliendo satisfactoriamente la demanda proyectada.

Para garantizar la operatividad autónoma, la generación eólica resultó ser la alternativa más viable. Un aerogenerador de 3 kW acoplado a 5 baterías (48V, 100Ah) se alinea con la ocurrencia nocturna de los eventos meteorológicos, mitigando el *curtailment* y evitando el sobredimensionamiento de un arreglo fotovoltaico de 15 kWp. Finalmente, la evaluación económica arrojó un Costo Nivelado del Agua (LCOW) de 119 CLP/L para el equipo integrado, superando la rentabilidad de su operación aislada (136 y 198 CLP/L). Al contrastarlo con el mercado actual, este valor resulta superior a las alternativas de abastecimiento convencionales y pasivas. Por consiguiente, el prototipo se posiciona estrictamente como una solución tecnológica *in situ* para escenarios con nula disponibilidad hídrica, alta dependencia logística de camiones aljibe, o en situaciones de catástrofe y emergencia.

6.2 Recomendaciones

Para consolidar este diseño conceptual en investigaciones futuras, se proponen las siguientes recomendaciones:

- **Escalamiento y validación en terreno:** El paso fundamental es llevar este diseño a un prototipo experimental físico, lo que permitirá contrastar los rendimientos aerodinámicos simulados frente a las condiciones climáticas reales y el desgaste de materiales.
- **Evaluación de conexión On-Grid:** Debido a la alta demanda energética del sistema de condensación, se recomienda evaluar configuraciones conectadas a la red eléctrica tradicional en aquellas comunidades con acceso parcial a esta, lo que reduciría drásticamente el CAPEX asociado a baterías.
- **Economía de escala e instrumentación:** Conviene desarrollar estudios de escalamiento para evaluar el comportamiento del equipo en capacidades superiores a los 100 L/día. Asimismo, para afinar futuros modelos, será prioritario mejorar la medición empírica del Contenido de Agua Líquida (LWC) con sensores ópticos in situ.
- **Calidad y potabilización:** Si bien las aguas atmosféricas poseen una alta pureza inicial que suele cumplir con la norma de riego (NCh 1333), destinarlas al consumo humano requerirá incorporar e internalizar los costos de una etapa de remineralización y desinfección bajo la normativa sanitaria vigente (Carvajal and Cabezas, 2017).

Financiamiento

El desarrollo de la presente investigación y el acceso a los datos de base técnica contaron con el respaldo de la Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo (ANID) de Chile, a través de las siguientes adjudicaciones:

- **Proyecto FONDECYT de Iniciación N.º 11140863:** “Experimental Assessment and Predictive Modeling of Rooftop Dew Collection for Water Supply in Chile” (Periodo 2014–2017, Investigador Responsable: Dr. Danilo Carvajal Araneda), del cual se obtuvieron los registros y series temporales de las variables atmosféricas de humedad relativa y temperatura ambiente utilizadas en las simulaciones del subsistema de rocío.
- **Proyecto FONDECYT Regular N.º 1241565:** “Experimental and Computational Fluid Dynamic Study of Fog Water Collection Efficiency” (Periodo 2024–2028), marco en el cual se facilitaron las mediciones experimentales y perfiles verticales de velocidad del viento requeridos.

Referencias

- ASHRAE (2020). *ASHRAE Handbook: HVAC Systems and Equipment*. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Atlanta, GA.
- Beithou, N., Khalid, M. B., As'ad, S., Alsaqoor, S., Borowski, G., Alshabatat, N., and Andruszkiewicz, A. (2024). Atmospheric water harvesting technology: Review and future prospects. *Journal of Ecological Engineering*, 25(3):291–302.
- Bekam (2026). Batería litio 48v 100ah lifepo4. <https://bekam.cl/litio/550-bateria-litio-48v-100ah-lifepo4.html>. [Accedido: 25-junio-2026].
- Bergman, T. L., Lavine, A. S., Incropera, F. P., and DeWitt, D. P. (2011). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. John Wiley & Sons, Hoboken, NJ, 7th edition.
- Beysens, D. (2016). Estimating dew yield worldwide from a few meteo data. *Atmospheric Research*, 167:146–155.
- Bornay (2020). *Catálogo Wind+*. Bornay, Castalla (Alicante), España. Revisión Marzo 2020.
- Carvajal, D. and Cabezas, D. (2017). Estudio de influencia de agua de rocío y niebla en el sistema acuífero del valle bajo de Copiapó. Technical report, Universidad de Atacama / Proyecto FONDECYT de Iniciación 11140863, Copiapó, Chile. Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo (ANID), Gobierno de Chile.
- Carvajal, D., Minonzio, J.-G., Casanga, E., Muñoz, J., Aracena, A., Montecinos, S., and Beysens, D. (2018). Roof-integrated dew water harvesting in combarbalá, Chile. *Journal of Water Supply: Research and Technology-AQUA*, 67(4):357–374.
- Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR2) (2023). Seguridad hídrica en Chile: Caracterización y perspectivas de futuro. Technical report, Universidad de Chile, ANID/FONDAP/1522A0001, Santiago, Chile.
- Davidson, C. I. and Friedlander, S. K. (1978). A filtration model for aerosol dry deposition: application to trace metal deposition from the atmosphere. *J. Geophys. Res.*, 83:2343–2352.

- Demoz, B., Collett Jr, J., and Daube Jr, B. (1996). On the caltech active strand cloudwater collectors. *Atmospheric Research*, 41(1):47–62.
- Du, P., Nie, X., Liu, H., Hou, Z., Pan, X., Liu, H., Liu, X., Wang, X., Sun, X., and Wang, Y. (2023). Design and evaluation of acfc—an automatic cloud/fog collector. *Atmosphere*, 14(3).
- Fernandez, D. M., Torregrosa, A., Weiss-Penzias, P. S., Zhang, B. J., Sorensen, D., Cohen, R. E., McKinley, G. H., Kleingartner, J., and Oliphant, A. (2018). Fog water collection effectiveness: Mesh intercomparisons in the coastal fog zone. *Aerosol and Air Quality Research*, 18(1):270–283.
- Fessehaye, M., Abdul-Wahab, S. A., Savage, M. J., Kohler, T., Gherezghiher, T., and Hurni, H. (2017). Assessment of fog-water collection on the eastern escarpment of eritrea. *Water International*, 42(8):1022–1036.
- Fragkou, M.-C., Monsalve-Tapia, T., Pereira-Roa, V., and Bolados-Arratia, M. (2022). Abastecimiento de agua potable por camiones aljibe durante la megasequía. un análisis hidrosocial de la provincia de petorca, chile. *EURE (Santiago)*, 48(145):1–22.
- Fundación Chile (2018). Radiografía del agua: Brecha y riesgo hídrico en chile. Technical report, Iniciativa Escenarios Hídricos 2030, Santiago, Chile.
- Gaddis, E. D. (2010). Pressure drop of tube bundles in cross flow. In *VDI Heat Atlas*, pages 1095–1128. Springer-Verlag, Berlin, second edition. 1586 pp.
- Gayoso, N., Moylan, E., Noha, W., Wang, J., and Mulchandani, A. (2024). Techno-economic analysis of atmospheric water harvesting across climates. *ACS ES&T Engineering*, 4:1769–1780.
- H2otek (2026). Equipo control de humedad - dual deshumidificación y humidificación portátil. <https://h2otek.com/tienda/producto/equipo-control-de-humedad-dual-deshumidificacion-y-humidificacion-portatil>. Consultado el 26 de junio de 2026.
- Idel’chik, I. E. (1966). *Handbook of hydraulic resistance*. AEC-TR 6630.
- Insumin Chile (2026). Insumin chile. <https://insuminchile.cl/>. [Accedido: 26-junio-2026].
- Jurasz, J., Bochenek, B., Kies, A., Figurski, M., Wiczorek, J., and Jaczewski, A. (2025). Energy potential and economic viability of small-scale wind turbines. *Energy*, 322:135608.
- Khalil, B., Adamowski, J., Shabbir, A., Jang, C., Rojas, M., Reilly, K., and Ozga-Zielinski, B. (2016). A review: dew water collection from radiative passive collectors to recent developments of active collectors. *Sustainable Water Resources Management*, 2(1):71–86.

- Lekouch, I., Muselli, M., Kabbachi, B., Ouazzani, J., Melnytchouk-Milimouk, I., and Beysens, D. (2011). Dew, fog, and rain as supplementary sources of water in south-western morocco. *Energy*, 36(4):2257–2265.
- Magnotek (2026). Deshumidificador industrial dh 60. <https://magnotek.cl/deshumidificador-industrial-dh-60>. Consultado el 26 de junio de 2026.
- Magnus, G. (1844). Versuche über die spannkraft des wasserdampfes. *Annalen der Physik*, 137(2).
- Masihy, E. (2026). Aerodynamic collection efficiency of fog catchers. Presentación de Avance de Tesis.
- Montecinos, S. and Carvajal, D. (2023). *Recursos Hídricos No Convencionales en Zonas Áridas y Semiáridas*. Editorial Universidad de La Serena.
- Montecinos, S., Carvajal, D., Cereceda, P., and Concha, M. (2018). Collection efficiency of fog events. *Atmospheric Research*, 209:163–169.
- NASA Langley Research Center (2024). POWER (Prediction of Worldwide Energy Resources). <https://power.larc.nasa.gov/>. Base de datos de meteorología y energía solar, Proyecto financiado por el Programa de Ciencias Aplicadas de la Dirección de Ciencias de la Tierra de la NASA.
- Peters, M. S., Timmerhaus, K. D., and West, R. E. (2003). *Plant Design and Economics for Chemical Engineers*. McGraw-Hill Education, New York, 5th edition.
- Power Inverter Chile (2026). Aerogenerador - turbina eólica alto rendimiento 5.000w. Accedido: 15 de junio de 2026.
- Regalado, C. M. and Ritter, A. (2016). The design of an optimal fog water collector: A theoretical analysis. *Atmospheric Research*, 178:45–54.
- Schemenauer, R. S. and Cereceda, P. (1994). A proposed standard fog collector for use in high-elevation regions. *Journal of Applied Meteorology*, 33(11):1313–1322.
- Schemenauer, R. S., Cereceda, P., and Carvajal, N. (1987). Measurements of fog water deposition and their relationships to terrain features. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 26(9):1285–1291.
- Schemenauer, R. S. and Joe, P. I. (1989). The collection efficiency of a massive fog collector. *Atmospheric Research*, 24(1-4):53–69.
- Sharan, G., Roy, A. K., Royon, L., Mongruel, A., and Beysens, D. (2017). Dew plant for bottling water. *Journal of Cleaner Production*, 155:83–92.

- Superintendencia de Servicios Sanitarios (2025). Manual de fiscalización: Facturación servicios sanitarios rurales de los segmentos mayor y mediano. Manual técnico, Gobierno de Chile, Santiago, Chile.
- Tu, Y., Wang, R., Zhang, Y., and Wang, J. (2018). Progress and expectation of atmospheric water harvesting. *Joule*, 2(8):1452–1475.
- Ueckerdt, F., Hirth, L., Luderer, G., and Edenhofer, O. (2013). System lcoe: What are the costs of variable renewables? *Energy*, 63:61–75.
- Vitalina (2026). Agua potable a granel. Accedido: 26 de junio de 2026.
- Vitel Energía (2026). Gabinete armado metálico autosoportado 2000x600x400mm ip55 ral7035. <https://vitelenergia.com/es/gabinete-armado-metalico-autosoportado-2000x600x400mm-ip55-ral7035.html>. Catálogo de productos en línea. Accedido el 19 de junio de 2026.
- Wang, C.-C., Chi, K.-Y., and Chang, C.-J. (2000). Heat transfer and friction characteristics of plain fin-and-tube heat exchangers, part ii: Correlation. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 43:2693–2700.
- Yan, X.-j. and Jiang, Y. (2021). Numerical evaluation of the fog collection potential of electrostatically enhanced fog collector. *Atmospheric Research*, 248:105251.
- Çengel, Y. A., Boles, M. A., and Kanoğlu, M. (2019). *Thermodynamics: An Engineering Approach*. McGraw-Hill Education, New York, NY, 9th edition.
- Çengel, Y. A. and Cimbala, J. M. (2018). *Fluid Mechanics: Fundamentals and Applications*. McGraw-Hill Education, New York, NY, 4th edition.

Apéndice A

Código Fuente de los Modelos Matemáticos y Simulación

En este apéndice se presentan las subrutinas principales desarrolladas en lenguaje Python para la simulación del prototipo híbrido. Se han omitido las líneas de código correspondientes a la interfaz gráfica y exportación de datos, conservando estrictamente los algoritmos de cálculo aerodinámico, termodinámico y el lazo de resolución numérica.

A.1 Módulo Aerodinámico y Pérdidas de Carga

Algoritmo utilizado para determinar el número de Stokes, la eficiencia de impacto y la caída de presión en el banco de filamentos mediante el modelo de Gaddis.

```
import numpy as np

# Constantes Termofísicas
RHO_AIRE = 1.225      # [kg/m3]
MU_AIRE = 1.81e-5     # [Pa*s]
RHO_AGUA = 1000.0     # [kg/m3]

def calcular_stokes(v_aire, d_filamento, d_gota):
    r_obstaculo = d_filamento / 2.0
    return (RHO_AGUA * (d_gota**2) * v_aire) / (18 * MU_AIRE * r_obstaculo)

def eficiencia_impacto(stk):
    if stk <= 0: return 0.0
```

```

term = stk**3 + 0.753 * (stk**2) + 2.796 * stk - 0.202
return min((stk**3) / term, 1.0) if term > 0 else 0.0

def coeficiente_presion_gaddis(re_w, n_capas, a, b):
    # Componente Laminar
    num_lam = 280 * np.pi * ((b**0.5 - 0.6)**2 + 0.75)
    den_lam = re_w * (4*a*b - np.pi) * (a**1.6)
    zeta_lam = num_lam / den_lam if den_lam != 0 else 0

    # Componente Turbulenta
    f_turb = (2.5 + (1.2 / ((a - 0.85)**1.08)) +
              0.4 * ((b/a - 1)**3) - 0.01 * ((a/b - 1)**3))
    zeta_turb = (f_turb / (re_w**0.25)) * n_capas

    w = 1 - np.exp(-(re_w + 200) / 1000)
    return zeta_lam + (zeta_turb * w)

```

A.2 Módulo de Transferencia de Calor y Masa (Wang, 2000)

Rutina que implementa el método de Efectividad-NUT para un banco de tubos y aletas, calculando simultáneamente la demanda de calor sensible y latente.

```

def calcular_tasa_condensacion_awg(T_amb, HR, T_placa, v_aire, A_frontal):
    # Propiedades dinámicas de película
    T_f = (T_amb + T_placa) / 2.0
    rho_aire_f = 1.293 * (273.15 / (273.15 + T_f))
    mu_aire_f = 1.72e-5 + (4.8e-8 * T_f)
    k_aire_f = 0.0241 + (7.2e-5 * T_f)

    # Adimensionales y Reynolds (D_c = diámetro collar)
    Pr = (1006.0 * mu_aire_f) / k_aire_f
    Sc = mu_aire_f / (rho_aire_f * 2.42e-5)
    Re_Dc = max((rho_aire_f * (v_aire*1.5) * 0.00982) / mu_aire_f, 2.0)

    # Correlación empírica de Wang et al. (Factor j)
    P3 = -0.361 - (0.126 / np.log(Re_Dc)) + 0.158 * np.log(3 * (0.002/0.00982)**0.41)
    P4 = -1.224 - (0.076 * (0.022/0.002)**1.42 / np.log(Re_Dc))

```

```

P5 = -0.083 + (0.174 / np.log(Re_Dc))
P6 = -5.735 + 1.21 * np.log(Re_Dc / 3)
j = 0.086 * (Re_Dc**P3) * (3**P4) * ((0.002/0.00982)**P5) * \
    ((0.002/0.002)**P6) * ((0.002/0.0254)**-0.93)

h_c = (j * Re_Dc * (Pr**(1/3)) * k_aire_f) / 0.00982
h_m = (j * Re_Dc * (Sc**(1/3)) * 2.42e-5) / 0.00982

# Método NTU y Cálculo de Cargas
m_dot_aire = v_aire * A_frontal * rho_aire_f
efectividad_t = 1.0 - np.exp(-(h_c * A_total) / (m_dot_aire * 1006.0))
q_conv_W = max(m_dot_aire * 1006.0 * (T_amb - T_placa) * efectividad_t, 0.0)

T_rocio = calcular_punto_rocio(T_amb, HR)
if T_placa >= T_rocio:
    return 0.0, q_conv_W, 0.0, q_conv_W # Sin condensación

delta_rho_max = calcular_rho_vapor(T_amb, HR) - calcular_rho_vapor(T_placa, 100.0)
efectividad_m = 1.0 - np.exp(-(h_m * A_total) / (v_aire * A_frontal))

tasa_kg_s = max((v_aire * A_frontal) * delta_rho_max * efectividad_m, 0.0)
q_lat_W = tasa_kg_s * 2500000.0

return tasa_kg_s, q_conv_W, q_lat_W, (q_conv_W + q_lat_W)

```

A.3 Lazo Numérico de Simulación y Balance Energético

Script principal que itera sobre la serie de tiempo meteorológica. Implementa el método numérico de bisección para hallar la temperatura de estabilización de la placa evaporadora sujeta a la capacidad límite del compresor.

```

def simulacion_dinamica_hibrida(df_clima, config_equipo):
    q_disp_max = config_equipo['pot_compresor'] * config_equipo['cop']
    pot_ventilador = calcular_potencia_aerodinamica(config_equipo)

    for idx, fila in df_clima.iterrows():
        # 1. SUBSISTEMA DE NIEBLA (Fuente Principal)

```

```

if fila['LWC'] > 0.01:
    eta_t = calcular_eficiencia_niebla(config_equipo)
    agua_niebla = fila['LWC'] * config_equipo['caudal'] * eta_t * fila['tiempo']
    energia_vent = pot_ventilador * fila['tiempo']

# 2. SUBSISTEMA DE CONDENSACIÓN (Respaldo Térmico)
if fila['HR'] >= 75.0:
    T_MIN_SEGURIDAD = 2.0
    _, _, _, q_req_min = calcular_tasa_condensacion_awg(
        fila['Temp'], fila['HR'], T_MIN_SEGURIDAD, config_equipo['v_aire']
    )

# Evaluación de capacidad y método de bisección
if q_req_min <= q_disp_max:
    t_placa_eq = T_MIN_SEGURIDAD
else:
    low_T, high_T = T_MIN_SEGURIDAD, fila['Temp']
    for _ in range(12): # Convergencia numérica
        mid_T = (low_T + high_T) / 2.0
        _, _, _, q_mid = calcular_tasa_condensacion_awg(
            fila['Temp'], fila['HR'], mid_T, config_equipo['v_aire']
        )
        if q_mid > q_disp_max: low_T = mid_T
        else: high_T = mid_T
    t_placa_eq = (low_T + high_T) / 2.0

# Cálculo final en el punto de equilibrio
tasa_c, _, _, q_total = calcular_tasa_condensacion_awg(
    fila['Temp'], fila['HR'], t_placa_eq, config_equipo['v_aire']
)
agua_cond = tasa_c * fila['tiempo'] if t_placa_eq < fila['T_rocio'] else 0.0
energia_comp = (q_total / config_equipo['cop']) * fila['tiempo']

# Almacenamiento de resultados por paso de tiempo
guardar_resultados(agua_niebla, agua_cond, energia_vent, energia_comp, t_placa_eq)

```

Apéndice B

Especificaciones Técnicas de Equipos Comerciales

En este apéndice se compilan los parámetros nominales de diseño, capacidades y dimensiones mecánicas de los componentes comerciales seleccionados, los cuales sirven como base para la simulación dinámica y la evaluación de prefactibilidad tecno-económica del prototipo híbrido.

B.1 Subsistema Frigorífico de Condensación

Para el ciclo de compresión de vapor se seleccionó un motocompresor alternativo tipo Inverter, cuyas características termodinámicas y eléctricas definen el límite de capacidad de remoción de calor sensible y latente del sistema.

Tabla B.1: Especificaciones técnicas del motocompresor Danfoss VTZ038.

Parámetro	Especificación
Marca y Modelo	Danfoss VTZ038-G (Compresor Alternativo)
Tecnología de Control	Inverter (Velocidad variable)
Refrigerantes Compatibles	R134a, R404A, R407C
Alimentación Eléctrica	380-480 V / 3 Fases / 50-60 Hz
Frecuencia de Operación	35 - 90 Hz
Volumen de Desplazamiento	38,12 cm ³
Presión Máxima (Alta / Baja)	29,4 bar / 22,6 bar
Límites de Temperatura (TS Lado Baja)	-35 °C a 50 °C
Volumen Interno (Lado Alta / Baja)	0,3 L / 7,5 L
Carga y Tipo de Aceite	0,95 L (Referencia 160PZ)
Protección del Motor e Índice IP	IP54 (Protección por convertidor de frecuencia)
Peso Neto	26 kg

B.2 Subsistema de Generación y Almacenamiento Eléctrico

El abastecimiento energético en formato *off-grid* está garantizado por un aerogenerador de eje horizontal y un banco de baterías de litio-ferrofosfato, dimensionados para operar de forma continua bajo el perfil de carga de los equipos.

Tabla B.2: Especificaciones técnicas del aerogenerador Bornay Wind+.

Parámetro	Especificación
Modelo y Tecnología	Bornay Wind+ 25.2+
Potencia Nominal	3.000 W
Voltaje Nominal	220 Vac (Salida del alternador)
Diámetro del Rotor	4,05 m (2 hélices de fibra de vidrio/carbono)
Velocidad de Viento para Arranque	3 m/s
Velocidad de Viento (Potencia Nominal)	12 m/s
Velocidad de Frenado Automático	14 m/s
Sistemas de Control	Regulador MPPT Wind+ y Pasivo por inclinación
Peso Físico (Aerogenerador / Regulador)	93 kg / 33 kg
Garantía del Fabricante	3 años

Tabla B.3: Especificaciones técnicas del banco de almacenamiento LiFePO₄.

Parámetro	Especificación
Tecnología Química	Fosfato de Hierro y Litio ($LiFePO_4$)
Voltaje Nominal	51,2 V
Capacidad Nominal y Energía Total	100 Ah / 5.120 Wh (Por módulo)
Vida Útil Estimada	4.000 a 5.000 ciclos (>80% capacidad a 3.000 ciclos)
Sistema de Gestión	BMS Inteligente integrado
Protecciones Automáticas	Sobrecarga, descarga profunda, cortocircuito y temperatura
Escalabilidad	Expansión en paralelo soportada
Protocolos de Comunicación	RS485 y CAN
Formato Estructural	Carcasa metálica rackeable

B.3 Estructura y Alojamiento de Equipos

Para proteger la instrumentación electrónica de control, tableros de transferencia y equipos auxiliares frente a las condiciones climáticas y la humedad característica de los eventos de niebla en la zona de El Sarco, se integró un gabinete autosoportado con alto grado de hermeticidad.

Tabla B.4: Especificaciones técnicas del gabinete autosoportado TIBOX.

Parámetro	Especificación
Marca y Modelo	TIBOX AR9 206/4K
Material de Fabricación	Acero laminado en frío
Dimensiones (Alto x Ancho x Prof.)	2.000 x 600 x 400 mm
Índice de Protección frente a sólidos/líquidos	IP 55 (Apto para polvo y humedad)
Índice de Protección Mecánica	IK 10
Espesor Estructural	Gabinete: 1,5 mm / Puerta Principal: 2,0 mm
Placa de Montaje Interna	Incorporada (1.900 x 500 x 2,5 mm)
Peso Total	80 kg
Color de Acabado	Gris (RAL 7035)
Normativa de Cumplimiento	IEC, CE, RoHS

Apéndice C

Datos Meteorológicos y Parámetros de Simulación

En este apéndice se compilan los datos climáticos y las condiciones de borde utilizados como entradas (inputs) para los modelos de simulación del prototipo híbrido. Para la zona de estudio (El Sarco, Región de Coquimbo), se incluyen los registros de irradiancia solar satelital y la serie temporal depurada de variables termodinámicas y aerodinámicas.

C.1 Irradiancia Solar Incidente

Los datos de recurso solar fueron obtenidos de la base de datos satelital POWER (Prediction of Worldwide Energy Resources) de la NASA, evaluando un periodo histórico desde junio de 2001 hasta diciembre de 2020 para las coordenadas geográficas de la zona de emplazamiento (Latitud: -29,5166, Longitud: -71,2811).

Tabla C.1: Promedio mensual de irradiancia solar incidente (NASA POWER, 2001-2020) para El Sarco.

Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
HSP [h]	6,52	6,54	5,94	5,12	4,11	4,11	4,42	4,95	5,58	6,18	6,20	6,38	5,50

C.2 Serie Temporal de Datos Meteorológicos

La siguiente tabla presenta la serie de tiempo continua con los parámetros ingresados al software de simulación. Con fines de formato y optimización de espacio, los valores han sido truncados y redondeados a sus cifras significativas más representativas.

Tabla C.2: Base de datos meteorológica horaria utilizada en la simulación dinámica.

Fecha	Duración [min]	LWC [g/m ³]	T _{amb} [°C]	HR [%]	V _{viento} [m/s]	P _{atm} [hPa]
16-04-2016	640	0,42	13,8	99,0	3,6	1014,1
17-04-2016	1050	0,31	14,1	99,0	2,7	1016,2
18-04-2016	1220	0,25	11,9	97,6	2,7	1018,5
19-04-2016	871	0,13	10,9	98,5	3,4	1018,0
20-04-2016	820	0,10	10,9	98,4	2,6	1018,1
21-04-2016	150	0,17	11,8	94,7	2,2	1015,2
22-04-2016	1020	0,19	10,2	99,0	3,2	1016,9
23-04-2016	10	0,01	11,2	98,1	2,0	1017,7
24-04-2016	0	0,00	13,2	79,7	4,6	1018,3
25-04-2016	0	0,00	8,9	87,5	5,1	1017,9
26-04-2016	0	0,00	9,2	68,8	2,3	1016,2
27-04-2016	0	0,00	13,1	49,0	2,9	1015,5
28-04-2016	10	0,08	13,4	61,2	2,9	1017,1
29-04-2016	0	0,00	14,3	61,3	2,7	1017,1
30-04-2016	200	0,16	19,1	35,4	2,3	1012,5
01-05-2016	500	0,07	10,5	99,0	3,2	1016,9
02-05-2016	0	0,00	13,2	83,4	2,8	1017,8
03-05-2016	130	0,27	18,2	49,9	2,1	1016,5
04-05-2016	1260	0,19	11,1	98,3	2,4	1016,7
05-05-2016	830	0,10	11,4	98,0	2,2	1017,9
06-05-2016	184	0,10	10,9	98,2	2,5	1017,0
07-05-2016	780	0,11	10,7	98,0	2,3	1017,0
08-05-2016	90	0,04	10,1	98,8	2,5	1016,7
09-05-2016	0	0,00	10,4	96,0	2,0	1017,1
10-05-2016	0	0,00	10,9	95,3	2,4	1016,6
11-05-2016	0	0,00	12,3	85,9	2,8	1019,4
12-05-2016	0	0,00	14,2	62,0	2,0	1018,3
13-05-2016	0	0,00	16,2	52,5	1,5	1015,0
14-05-2016	51	0,02	13,5	54,9	2,0	1015,2
15-05-2016	0	0,00	12,0	85,5	2,3	1013,2
16-05-2016	345	0,06	13,9	67,3	2,6	1011,4
17-05-2016	1050	0,14	10,4	98,9	3,2	1011,6
18-05-2016	495	0,13	10,0	99,0	2,3	1011,8
19-05-2016	0	0,00	9,6	98,0	2,3	1012,1
20-05-2016	90	0,02	9,6	98,9	2,8	1012,9
21-05-2016	0	0,00	10,9	81,8	2,6	1014,2
22-05-2016	0	0,00	11,6	73,6	1,5	1011,4
23-05-2016	15	0,22	16,5	27,1	2,4	1010,7
Continúa en la siguiente página...						

Tabla C.2 – Continuación de la página anterior

Fecha	Duración [min]	LWC [g/m ³]	T _{amb} [°C]	HR [%]	V _{viento} [m/s]	P _{atm} [hPa]
24-05-2016	60	0,12	13,0	63,0	2,8	1013,0
25-05-2016	45	0,03	13,0	58,7	2,5	1014,6
26-05-2016	195	0,02	11,7	71,1	2,8	1012,7
27-05-2016	360	0,12	10,9	87,0	2,9	1010,8
28-05-2016	916	0,15	9,1	99,0	2,7	1013,7
29-05-2016	300	0,07	11,2	84,2	2,5	1014,3
30-05-2016	30	0,02	11,8	87,1	2,6	1013,6
31-05-2016	225	0,06	10,9	89,6	2,0	1011,3
01-06-2016	210	0,08	9,8	96,0	2,5	1013,6
02-06-2016	45	0,01	12,4	70,8	1,5	1011,4
03-06-2016	195	0,03	15,0	37,1	2,6	1010,2
04-06-2016	375	0,12	9,6	94,6	2,5	1012,7
05-06-2016	678	0,12	9,5	99,0	2,1	1013,0
06-06-2016	15	0,02	8,4	94,3	2,1	1016,2
07-06-2016	0	0,00	12,3	40,0	1,9	1014,3
08-06-2016	90	0,09	11,7	56,3	2,5	1014,1
09-06-2016	15	0,00	13,6	37,1	1,9	1013,3
10-06-2016	0	0,00	14,7	21,2	2,6	1014,8
11-06-2016	0	0,00	13,8	29,5	2,1	1014,3
12-06-2016	15	0,00	22,2	17,5	3,0	1013,5
13-06-2016	285	0,07	12,5	87,5	2,7	1014,5
14-06-2016	0	0,00	15,1	67,5	2,3	1014,4
15-06-2016	0	0,00	17,5	49,0	2,5	1014,9
16-06-2016	0	0,00	17,4	38,4	1,7	1011,9
17-06-2016	15	0,00	9,3	88,2	2,6	1012,2
18-06-2016	45	0,19	7,2	97,7	2,4	1012,1
19-06-2016	870	0,22	6,9	97,5	2,6	1013,5
20-06-2016	510	0,05	5,9	98,4	2,8	1014,9
21-06-2016	30	0,04	9,6	69,8	1,8	1012,9
22-06-2016	0	0,00	14,4	28,0	1,7	1012,3
23-06-2016	0	0,00	13,3	41,3	2,2	111,6
24-06-2016	345	0,07	6,8	97,8	1,9	1012,4
25-06-2016	0	0,00	7,8	87,7	2,4	1014,1
26-06-2016	0	0,00	8,8	77,9	2,4	1015,4
27-06-2016	0	0,00	11,9	52,9	2,1	1012,6
28-06-2016	360	0,21	17,0	17,3	2,0	1010,6
29-06-2016	390	0,13	9,0	76,0	2,7	1011,4
30-06-2016	30	0,07	14,4	37,3	2,3	1010,1
01-07-2016	555	0,12	11,3	57,8	2,4	1010,2
Continúa en la siguiente página...						

Tabla C.2 – *Continuación de la página anterior*

Fecha	Duración [min]	LWC [g/m ³]	T _{amb} [°C]	HR [%]	V _{viento} [m/s]	P _{atm} [hPa]
02-07-2016	766	0,09	7,7	97,1	2,0	1012,1
03-07-2016	390	0,10	8,3	98,7	2,0	1013,3
04-07-2016	0	0,00	8,1	93,9	3,0	1015,1
05-07-2016	120	0,08	9,2	79,3	2,6	1019,0
06-07-2016	0	0,00	12,3	51,1	2,1	1013,0
07-07-2016	330	0,09	13,0	35,5	2,3	1011,1
08-07-2016	390	0,06	7,5	97,0	3,1	1013,7
09-07-2016	3	0,53	12,8	49,2	1,8	1011,2
10-07-2016	210	0,08	10,9	56,6	2,0	1012,5
11-07-2016	15	0,00	11,1	36,8	2,8	1014,8
12-07-2016	0	0,00	9,9	96,2	2,4	1011,5
13-07-2016	345	0,20	10,3	53,1	2,3	1013,6
14-07-2016	180	0,08	9,1	98,1	2,4	1015,0
15-07-2016	720	0,38	7,2	97,1	2,7	1015,3
16-07-2016	0	0,00	12,6	50,1	2,6	1011,9
17-07-2016	315	0,16	8,8	62,7	2,3	1014,9
18-07-2016	90	0,00	6,5	93,2	2,4	1012,9
19-07-2016	165	0,12	12,0	46,3	2,5	1012,7
20-07-2016	0	0,00	9,7	78,9	2,7	1014,4
21-07-2016	0	0,00	16,8	35,9	2,5	1013,1
22-07-2016	0	0,00	15,6	27,1	3,0	1012,6
23-07-2016	240	0,27	14,3	45,5	2,4	1011,9
24-07-2016	45	0,03	11,1	64,7	2,4	1011,9
25-07-2016	825	0,22	10,3	98,1	2,0	1016,9
26-07-2016	0	0,00	11,4	79,5	2,3	1010,9
27-07-2016	450	0,19	15,8	40,6	2,4	1009,8
28-07-2016	435	0,27	8,8	96,9	2,8	1011,3
29-07-2016	0	0,00	14,0	57,5	3,3	1010,6
30-07-2016	510	0,15	11,0	77,6	2,3	1010,7
31-07-2016	285	0,08	7,7	90,2	3,3	1014,4
01-08-2016	0	0,00	14,1	45,3	2,4	1011,3
02-08-2016	270	0,12	14,9	30,4	2,4	1011,6
03-08-2016	90	0,15	10,5	64,7	2,3	1012,2
04-08-2016	45	0,35	15,3	26,6	2,6	1010,6
05-08-2016	930	0,24	7,2	97,3	3,2	1013,4
06-08-2016	165	0,06	9,0	87,0	2,5	1013,9
07-08-2016	451	0,18	10,2	78,1	3,0	1013,3
08-08-2016	255	0,07	9,2	89,1	2,0	1012,8
09-08-2016	0	0,00	14,0	54,8	2,2	1010,8
<i>Continúa en la siguiente página...</i>						

Tabla C.2 – Continuación de la página anterior

Fecha	Duración [min]	LWC [g/m ³]	T _{amb} [°C]	HR [%]	V _{viento} [m/s]	P _{atm} [hPa]
10-08-2016	1140	0,25	7,3	94,7	3,8	1012,4
11-08-2016	615	0,18	7,5	97,2	3,4	1013,1
12-08-2016	495	0,18	12,4	62,1	2,6	1011,2
13-08-2016	465	0,22	7,6	97,7	3,0	1012,4
12-12-2016	420	0,00	12,6	97,0	4,8	1009,7
13-12-2016	15	0,00	14,5	86,4	3,5	1009,4
14-12-2016	15	0,01	16,6	71,8	3,4	1009,5
15-12-2016	300	0,05	13,3	95,1	3,7	1010,5
16-12-2016	452	0,07	12,7	97,5	3,8	1011,9
17-12-2016	975	0,06	12,5	97,0	3,9	1011,7
18-12-2016	795	0,19	12,3	97,0	4,1	1009,6
19-12-2016	660	0,13	12,8	97,3	3,6	1008,9
20-12-2016	300	0,06	13,2	97,9	3,4	1010,4
21-12-2016	60	0,03	13,1	95,7	3,9	1009,0
22-12-2016	330	0,15	12,4	96,4	4,6	1009,8
23-12-2016	300	0,09	11,8	93,5	4,3	1011,7
24-12-2016	90	0,03	12,0	92,0	4,2	1010,2
25-12-2016	495	0,08	11,3	98,0	2,8	1011,4
26-12-2016	0	0,00	12,2	88,6	6,4	1010,8
27-12-2016	0	0,00	13,5	64,9	3,8	1009,2
28-12-2016	375	0,14	12,1	94,7	3,9	1009,2
29-12-2016	60	0,03	11,6	94,5	4,0	1010,1
30-12-2016	60	0,00	11,5	96,8	4,5	1010,3
31-12-2016	120	0,03	12,3	96,8	5,1	1011,4
01-01-2017	240	0,08	12,4	94,9	4,3	1011,0
02-01-2017	405	0,09	13,0	97,7	5,3	1010,3
03-01-2017	0	0,00	13,7	91,9	4,3	1008,7
04-01-2017	0	0,00	14,6	82,0	4,1	1006,5
05-01-2017	75	0,03	12,8	84,3	4,4	1008,1
06-01-2017	0	0,00	14,1	83,3	4,2	1010,7
07-01-2017	0	0,00	15,3	79,7	4,1	1011,8
08-01-2017	0	0,00	14,7	83,7	3,8	1010,5
09-01-2017	435	0,20	13,6	90,1	4,4	1010,5
10-01-2017	480	0,13	14,3	88,1	4,2	1010,5
11-01-2017	225	0,28	12,6	94,8	3,9	1009,8
12-01-2017	270	0,13	13,5	87,7	3,8	1009,3
13-01-2017	60	0,04	15,3	77,8	4,2	1009,7
14-01-2017	450	0,18	14,3	94,6	4,2	1008,1
15-01-2017	285	0,10	14,2	94,1	4,2	1009,2
Continúa en la siguiente página...						

Tabla C.2 – Continuación de la página anterior

Fecha	Duración [min]	LWC [g/m ³]	T _{amb} [°C]	HR [%]	V _{viento} [m/s]	P _{atm} [hPa]
16-01-2017	0	0,00	15,6	82,3	4,3	1010,9
17-01-2017	0	0,00	16,2	79,5	3,0	1009,6
18-01-2017	75	0,12	16,6	74,2	3,7	1009,3
19-01-2017	60	0,01	18,4	65,6	3,9	1010,4
20-01-2017	0	0,00	17,5	73,4	3,4	1009,9
21-01-2017	0	0,00	18,4	73,7	3,9	1010,9
22-01-2017	0	0,00	17,9	78,2	3,0	1012,5
23-01-2017	135	0,05	18,4	77,8	3,5	1012,9
24-01-2017	45	0,04	16,6	87,6	3,5	1010,7
25-01-2017	15	0,02	17,5	82,2	3,8	1009,3
26-01-2017	435	0,13	16,5	95,1	3,5	1011,4
27-01-2017	0	0,00	17,6	86,3	4,1	1011,8
28-01-2017	0	0,00	18,0	81,5	3,9	1010,1
29-01-2017	542	0,07	17,5	86,5	3,6	1009,1
30-01-2017	1095	0,10	16,4	98,0	3,0	1010,6
31-01-2017	735	0,20	16,1	98,2	2,7	1010,5
01-02-2017	795	0,10	15,3	99,0	3,3	1009,8
02-02-2017	915	0,22	14,3	99,0	2,8	1009,6
03-02-2017	345	0,10	14,6	92,7	2,2	1010,0
04-02-2017	135	0,02	13,5	94,9	3,9	1011,4
05-02-2017	75	0,07	16,4	71,0	3,8	1008,9
06-02-2017	450	0,15	14,4	90,6	4,0	1008,4
07-02-2017	720	0,10	13,0	97,9	3,9	1008,9
08-02-2017	90	0,00	13,1	95,9	3,7	1010,0
09-02-2017	0	0,00	15,8	57,4	4,0	1010,3
10-02-2017	135	0,25	14,1	70,9	4,0	1010,3
11-02-2017	390	0,07	13,4	88,7	3,9	1011,7
12-02-2017	225	0,20	12,3	93,7	3,8	1010,1
13-02-2017	210	0,05	13,2	90,7	3,6	1009,4
14-02-2017	315	0,14	12,7	93,3	3,3	1011,1
15-02-2017	135	0,09	14,0	89,2	3,6	1013,7
16-02-2017	0	0,00	13,6	87,8	4,1	1013,3
17-02-2017	315	0,17	14,2	91,0	3,7	1012,6
18-02-2017	0	0,00	15,2	76,9	3,7	1013,3
19-02-2017	0	0,00	17,3	61,0	3,7	1011,9
20-02-2017	105	0,13	16,7	70,0	3,3	1011,4
21-02-2017	345	0,10	14,4	96,8	3,7	1011,3
22-02-2017	270	0,11	15,0	94,4	3,7	1009,4
23-02-2017	0	0,00	16,1	86,6	3,3	1009,9
Continúa en la siguiente página...						

Tabla C.2 – *Continuación de la página anterior*

Fecha	Duración [min]	LWC [g/m ³]	T _{amb} [°C]	HR [%]	V _{viento} [m/s]	P _{atm} [hPa]
24-02-2017	0	0,00	16,8	78,3	3,7	1010,5
25-02-2017	0	0,00	17,0	82,2	3,5	1010,2
26-02-2017	0	0,00	17,0	79,6	3,7	1010,9
27-02-2017	0	0,00	17,5	76,4	3,3	1012,5
28-02-2017	0	0,00	18,2	76,5	4,5	1011,6
01-03-2017	180	0,07	15,9	89,1	4,2	1008,8
02-03-2017	224	0,13	15,4	99,0	4,6	1010,4
03-03-2017	615	0,21	15,7	96,8	4,3	1012,3
04-03-2017	450	0,10	13,6	98,8	3,9	1011,5
05-03-2017	0	0,00	14,0	87,9	3,4	1010,6
06-03-2017	0	0,00	15,1	79,5	3,1	1010,7
07-03-2017	45	0,03	15,8	76,2	3,1	1010,5
08-03-2017	405	0,24	13,0	94,3	4,0	1011,6
09-03-2017	0	0,00	14,4	66,1	3,8	1012,8
10-03-2017	0	0,00	17,6	52,7	3,2	1012,0
11-03-2017	0	0,00	15,9	63,3	3,1	1012,5
12-03-2017	0	0,00	19,2	35,6	2,1	1010,7
13-03-2017	120	0,06	13,0	83,5	3,8	1010,7
14-03-2017	615	0,08	11,3	98,1	3,1	1012,8
15-03-2017	0	0,00	12,0	85,8	3,2	1013,7
16-03-2017	0	0,00	13,6	81,7	3,2	1014,0
17-03-2017	0	0,00	14,0	85,2	2,8	1014,4
18-03-2017	360	0,09	14,6	85,0	3,0	1012,9
19-03-2017	1020	0,13	11,8	97,7	2,9	1014,4
20-03-2017	540	0,10	12,3	97,1	4,0	1014,1
21-03-2017	1260	0,16	11,9	96,7	3,3	1013,4
22-03-2017	720	0,25	11,2	98,2	3,0	1013,2
23-03-2017	705	0,18	11,9	94,7	2,3	1013,8
24-03-2017	0	0,00	13,1	93,1	3,5	1013,8
25-03-2017	0	0,00	11,9	81,4	3,0	1013,6
26-03-2017	15	0,01	12,5	90,9	3,4	1013,5
27-03-2017	0	0,00	15,1	73,0	2,7	1013,1
28-03-2017	15	0,30	13,2	85,1	3,2	1013,5