

**UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA  
SEDE CONCEPCIÓN – REY BALDUINO DE BÉLGICA.**



UNIVERSIDAD TECNICA  
FEDERICO SANTA MARIA

**Modelado y Simulación de un Sistema de Riego por Goteo  
Autónomo para la Gestión Hídrica Eficiente en la Provincia  
de Limarí**

*Memoria de titulación para optar al Título de Ingeniero de Ejecución en Control e  
Instrumentación Industrial.*

**Autor:**  
Pablo Barra Gutierrez

**Profesor guía:**  
Luis Muñoz



## 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: Modelado y Simulación de un Sistema de Riego por Goteo Autónomo para la Gestión Hídrica Eficiente en la Provincia de Limarí

Nombre del candidato(a): Pablo Ignacio Barra Gutiérrez

Carrera / Grado: Ingeniería de ejecución en control e instrumentación industrial

Campus: Sede Concepción Departamento: Electrónica e informática

### 2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Luis Muñoz Quezada, 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: 07/04/2026

Firma:

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 07/04/2026

Firma:

# Índice

<b>Resumen</b>	<b>8</b>
<b>Introducción</b>	<b>9</b>
<b>Objetivo General</b>	<b>10</b>
<b>Objetivos Específicos</b>	<b>11</b>
<b>Alcances del Proyecto</b>	<b>12</b>
<b>Restricciones</b>	<b>13</b>
<b>1. Estado del Arte</b>	<b>14</b>
1.1. Contexto Hídrico Global y Seguridad Alimentaria . . . . .	14
1.2. La Crisis Hídrica y su Impacto en la Agricultura Chilena . . . . .	14
1.3. Fundamentos de los Sistemas de Riego Tecnificados . . . . .	16
1.4. Sistemas de Bombeo Fotovoltaico de Acople Directo con Tecnología BLDC .	17
1.5. Estrategias de Control: Lógica de Histéresis . . . . .	19
1.6. Integración de Sistemas: Brecha Identificada en la Literatura . . . . .	20
1.7. Normativa Energética e Hídrica Chilena . . . . .	21
1.7.1. Marco Normativo Hídrico . . . . .	21
1.7.2. Marco Normativo Energético y de Generación Distribuida . . . . .	22
1.8. Conclusiones del Capítulo y Definición de la Propuesta . . . . .	22
<b>2. Diseño del Sistema y Metodología de Simulación</b>	<b>24</b>
2.1. Introducción al Capítulo . . . . .	24
2.2. Contexto del Problema y Zona de Estudio . . . . .	24
2.2.1. Ubicación y Caracterización Agroclimática . . . . .	24
2.2.2. Justificación de la Solución Mono-Tecnológica . . . . .	25
2.3. Evaluación del Recurso Energético Solar . . . . .	26
2.4. Ingeniería básica y Dimensionamiento del Sistema . . . . .	26
2.4.1. Cálculo de la Demanda Hídrica de Diseño . . . . .	26
2.4.2. Diseño del Sistema de Acumulación (Batería Hidráulica) . . . . .	27
2.4.3. Selección del Grupo de Bombeo Fotovoltaico . . . . .	27
2.5. Dimensionamiento del sistema Fotovoltaico . . . . .	28
2.5.1. Instrumentación del Suelo . . . . .	28
2.6. Estrategia de Control y Gestión Hídrica . . . . .	29
2.7. Selección del Sensor de Humedad de Suelo . . . . .	29
2.8. Selección del Actuador: Electroválvula de Riego . . . . .	30
2.8.1. Modelo Matemático de Balance Hídrico . . . . .	31
2.8.2. Definición de Umbrales de Suelo . . . . .	32
2.8.3. Algoritmo de Control por Histéresis . . . . .	32
2.9. Implementación del Entorno de Simulación . . . . .	33
2.9.1. Arquitectura del Software . . . . .	33

2.9.2. Datos de Entrada y Escenarios de Prueba . . . . .	34
2.10. Conclusiones del Capítulo . . . . .	35
<b>3. Capítulo 3: Resultados de la Simulación y Validación del Sistema</b>	<b>36</b>
3.1. Introducción al Capítulo . . . . .	36
3.2. Escenarios de Simulación Definidos . . . . .	36
3.3. Resultados de la Simulación del Balance Hídrico . . . . .	36
3.3.1. Dinámica de la Humedad del Suelo y Control por Histéresis . . . . .	37
3.3.2. Gestión del Estanque y Margen de Seguridad . . . . .	38
3.4. Validación Energética del Sistema Fotovoltaico . . . . .	38
3.5. Resultados Escenario 2: Comportamiento del Ciclo Anual . . . . .	39
3.6. Resultados Escenario 3: Prueba de Resiliencia Hídrica . . . . .	41
3.6.1. Seguridad Agronómica del Cultivo y Resiliencia del Control . . . . .	42
3.7. Discusión General de los Resultados . . . . .	43
<b>4. Evaluación Económica y Comparativa</b>	<b>45</b>
4.1. Introducción al Capítulo . . . . .	45
4.2. Análisis de Costos del Sistema Fotovoltaico . . . . .	45
4.2.1. Inversión Inicial (CAPEX Solar) . . . . .	45
4.2.2. Costos Operativos (OPEX Solar) . . . . .	46
4.3. Comparativa Técnica-Económica: Fotovoltaico vs. Diésel . . . . .	47
4.4. Evaluación de Costos Operativos del Sistema Diésel . . . . .	47
4.4.1. Costo Total de Propiedad y Retorno de Inversión (Payback) . . . . .	48
4.5. Impacto Ambiental y Sostenibilidad . . . . .	49
<b>5. Conclusiones y Recomendaciones</b>	<b>51</b>
5.1. Conclusiones Generales . . . . .	51
5.2. Conclusiones Específicas . . . . .	51
5.3. Recomendaciones y Trabajos Futuros . . . . .	52
<b>Bibliografía</b>	<b>54</b>
<b>6. Anexos</b>	<b>56</b>
6.1. Código Fuente de Simulación (Python) . . . . .	56
6.1.1. Script 1: Simulación de Balance Hídrico y Dinámica del Estanque . . . . .	56
6.1.2. Script 2: Prueba de Resiliencia Básica (Apagón Solar en Enero) . . . . .	58
6.1.3. Script 3: Simulación Avanzada de Resiliencia con Gestión de Directorios . . . . .	60
6.2. Planos y Diagramas de Ingeniería . . . . .	63
6.2.1. Diagrama Unilineal Eléctrico . . . . .	63
6.2.2. Diagrama de Tuberías e Instrumentación (P&ID) . . . . .	64
6.3. Fichas Técnicas (Datasheets) del Equipamiento . . . . .	66
6.3.1. Módulo Fotovoltaico Monocristalino (550Wp) . . . . .	66
6.3.2. Bomba Solar BLDC y Controlador MPPT . . . . .	69
6.3.3. Sonda de Humedad de Suelo (FDR) . . . . .	72
6.3.4. Controlador Lógico Programable (PLC) . . . . .	75

6.3.5. Electroválvula de Riego (24V) . . . . .	76
6.3.6. Geomembrana de Polietileno de Alta Densidad (HDPE 1.5 mm) . . .	78
6.4. Datos Climáticos y Recurso Solar (Explorador Solar) . . . . .	79

## Índice de figuras

1.1.	Ubicación geográfica de la Cuenca del Limarí en el contexto de la Región de Coquimbo. Fuente: Extraído de Delgado et al. (2018). . . . .	15
1.2.	Esquema general de los componentes de un sistema de riego tecnificado automatizado. Fuente: Elaboración propia, basado en Ruiz Canales y Molina Martínez (2010). . . . .	16
1.3.	Diagrama de flujo de un sistema de bombeo fotovoltaico de acople directo con acumulación hídrica. Fuente: Elaboración propia. . . . .	18
1.4.	Diagrama de bloques del sistema de control en lazo cerrado implementado. Fuente: Elaboración propia, basado en el esquema de control de Castro et al. (2016). . . . .	20
2.1.	Ubicación satelital en Tuquí-Talhuén. Se observa el contraste entre el área de riego (verde) y zona arida. Fuente: Google Earth (2025). . . . .	24
2.2.	Comparativa de disponibilidad de recursos energéticos durante el mes crítico (Enero) en Tuquí-Talhuén, Provincia de Limarí. La línea roja indica el umbral mínimo de arranque para aerogeneradores, demostrando la inviabilidad técnica de la energía eólica frente a la abundancia del recurso solar. Fuente: Elaboración propia con datos del Ministerio de Energía (2025). . . . .	25
2.3.	Layout tecnológico del sistema de riego propuesto. Se observa la arquitectura de acople directo, el sistema de acumulación hídrica de distribución automatizada para uva de mesa. Fuente: Elaboración propia. . . . .	29
2.4.	Esquema conceptual del balance hídrico en la zona radicular del cultivo. Fuente: Elaboración propia, basado en Allen et al. (1998). . . . .	31
2.5.	Comportamiento dinámico de la lógica de control por histéresis y definición de la banda muerta. Fuente: Elaboración propia, basado en Castro et al. (2016). . . . .	33
2.6.	Diagrama de arquitectura funcional y flujo de datos del simulador en Python. Fuente: Elaboración propia. . . . .	34
3.1.	Evolución de la humedad del suelo y activación de ciclos de riego (Enero). . . . .	37
3.2.	Nivel del estanque de acumulación con corte de seguridad al 90%. . . . .	38
3.3.	Superposición de la curva de generación fotovoltaica y consumo de la bomba. . . . .	39
3.4.	Comportamiento estacional promedio del nivel del estanque y humedad del suelo a lo largo de un año. . . . .	40
3.5.	Prueba de estrés del estanque ante 3 días consecutivos sin radiación solar (Enero). . . . .	41
3.6.	Evolución de la humedad del suelo durante los 3 días de falla del sistema de bombeo. . . . .	43
4.1.	Comparativa de costos operativos anuales entre sistema solar y diésel. Fuente: . . . . .	48
4.2.	Punto de equilibrio económico y proyección de ahorro acumulado. Fuente: . . . . .	49
6.1.	Diagrama unilineal del sistema de generación y fuerza fotovoltaica. . . . .	63
6.2.	Diagrama de Tuberías e Instrumentación (P&ID) y lazos de control. . . . .	65

## Índice de cuadros

2.1. Promedios mensuales de Radiación Global Horizontal (GHI) en el sitio de estudio . . . . .	26
2.2. Resumen del Dimensionamiento Fotovoltaico . . . . .	28
2.3. Especificaciones Técnicas del Sensor Profile Probe PR2 . . . . .	30
2.4. Resumen de los parámetros técnicos dimensionados para el sistema de riego. . . . .	35
4.1. Presupuesto de Capital (CAPEX) actualizado para el sistema propuesto. . . . .	45
4.2. Desglose de Mano de Obra y Montaje (Estándar EPC). . . . .	46
4.3. Comparativa de Costo Total de Propiedad proyectado a 20 años. . . . .	49

## Agradecimientos

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas que, de una u otra forma, fueron parte fundamental en el desarrollo de este proyecto de tesis y en mi formación académica.

En primer lugar, a mi profesor guía, **Luis Muñoz**, por su invaluable orientación, paciencia y disposición constante. Sus conocimientos y consejos fueron el pilar que me permitió estructurar y llevar a buen término este trabajo. Gracias por creer en este proyecto y guiarme en cada paso.

A los docentes que dejaron una huella profunda en mi paso por la universidad. Al profesor **Helmut Contreras**, le agradezco enormemente su simpatía, cercanía y calidad humana; virtudes que hicieron el camino universitario mucho más ameno y motivador. Asimismo, quiero dar las gracias al profesor **Nelson Vásquez** por su constante exigencia y rigor académico. Sus altos estándares me desafiaron a superarme a mí mismo, impulsándome a entregar siempre mi mayor esfuerzo y a crecer como profesional.

Finalmente, un agradecimiento muy especial y profundo a **mi pareja Grace Toledo**. Gracias por tu amor, tu comprensión y por ser mi principal fuente de apoyo incondicional durante todo este proceso. Gracias por la paciencia en las largas horas de estudio, por darme ánimos en los momentos de estrés y por celebrar conmigo cada pequeño avance. Este logro también es tuyo.

A todos ustedes, muchas gracias.

## Resumen

El presente trabajo aborda la problemática de la crisis hídrica en la Provincia de Limarí mediante el diseño y modelado de un sistema de riego por goteo automatizado y energéticamente autónomo. La solución propuesta integra una arquitectura de bombeo fotovoltaico de acople directo (sin almacenamiento eléctrico), complementada por un estanque de 195 m<sup>3</sup> que actúa como sistema de almacenamiento hidráulico, proporcionando una autonomía de tres días conforme a criterios de la Comisión Nacional de Riego.

El control del sistema se implementa mediante lógica de histéresis basada en sensores de humedad de suelo, manteniendo la humedad volumétrica en un rango operativo entre 33 % y 35 %, evitando el estrés hídrico del cultivo. La demanda de riego se estimó mediante la metodología FAO de balance hídrico, utilizando datos reales de radiación solar (8.760 registros horarios) obtenidos del Explorador Solar del Ministerio de Energía.

Las simulaciones anuales en Python demostraron estabilidad hidráulica y suficiencia energética incluso ante escenarios críticos de tres días consecutivos sin radiación solar. El análisis económico comparativo con un sistema diésel tradicional arrojó un período de recuperación de la inversión de 15,5 años y un ahorro acumulado significativo proyectado a 20 años.

Estos resultados demuestran que el sistema es técnica y económicamente viable para el sector agrícola —especialmente al complementarse con instrumentos estatales de fomento al riego—, aportando una solución sostenible, autónoma y resiliente frente a la variabilidad climática regional.

## Introducción

La crisis hídrica constituye uno de los desafíos más críticos del siglo XXI a nivel global. Según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), la extracción de agua se ha multiplicado en el último siglo, siendo el sector agrícola el principal consumidor, con aproximadamente el 70 % del total extraído a nivel mundial.

Chile enfrenta esta problemática a nivel nacional. La megasequía que afecta al país por más de una década ha llevado a la Dirección General de Aguas (DGA) a declarar estado de escasez hídrica en más de 200 comunas a nivel nacional. Este déficit impacta severamente a la Provincia de Limarí, abarcando sus cinco comunas: Ovalle, Río Hurtado, Monte Patria, Combarbalá y Punitaqui. El sector agrícola nacional concentra el 74 % del consumo total de agua, lo que lo posiciona como el área de mayor impacto y, simultáneamente, de mayor potencial de mejora mediante la tecnología.

Esta crisis hídrica se agrava por una dependencia energética crítica. En zonas rurales, el bombeo de agua suele depender de generadores diésel o redes eléctricas inestables, lo que implica costos operativos elevados y una huella de carbono significativa.

Para abordar ambos problemas, el presente trabajo propone el diseño y modelado de un sistema de riego automatizado alimentado por energía solar fotovoltaica, evaluando su viabilidad teórica mediante herramientas de simulación. La solución propuesta utiliza una arquitectura de acople directo con un estanque de acumulación que actúa como reserva energética e hídrica. El sistema es gestionado por un algoritmo de control por histéresis basado en sensores de humedad de suelo, optimizando el uso del recurso. La viabilidad técnica se evalúa mediante simulación computacional en Python, permitiendo validar el desempeño del sistema bajo escenarios de demanda crítica y establecer una base técnica para una agricultura de precisión, autónoma y sostenible.

## **Objetivo General**

Diseñar, a nivel de ingeniería básica, un sistema de control automatizado para riego por goteo de uva de mesa, basado en sensores de humedad de suelo y datos climáticos, con el propósito de optimizar el uso del recurso hídrico y evaluar su potencial de ahorro de agua frente a métodos tradicionales de riego, en una parcela tipo de la Provincia de Limarí.

## **Objetivos Específicos**

- I. Dimensionar la arquitectura de un sistema de control automatizado de riego por goteo y su suministro energético fotovoltaico.
- II. Implementar el modelo matemático de los componentes del sistema mediante un algoritmo en Python, para evaluar el comportamiento del balance hídrico y energético.
- III. Validar el desempeño hídrico del sistema y realizar una comparación técnica-económica referencial respecto a un sistema tradicional.

## Alcances del Proyecto

- I. El cultivo de estudio corresponde a uva de mesa (*Vitis vinifera*) en una parcela ubicada en la Provincia del Limarí.
- II. El sistema consiste en riego por goteo, alimentado desde un estanque de acumulación y controlado mediante electroválvulas de accionamiento automático.
- III. La estrategia de control se basa en lógica de umbrales con histéresis, utilizando la humedad del suelo como variable principal de decisión.
- IV. Los sensores y actuadores del sistema se representan mediante modelos virtuales dentro del entorno de simulación.
- V. El sistema energético se modela considerando un arreglo fotovoltaico de acople directo, utilizando el almacenamiento de agua en el estanque como buffer de energía hídrica.
- VI. La validación del sistema se realiza exclusivamente mediante simulación computacional en un entorno de software (Python).

## **Restricciones**

- I. No se aborda el diseño hidráulico detallado de la red de riego por goteo, ni el dimensionamiento físico de tuberías, emisores o cálculo de pérdidas de carga por fricción.
- II. El análisis económico se limita a una comparación técnica-económica referencial de costos de inversión (CAPEX) y costos operativos (OPEX) frente a una alternativa diésel, excluyendo evaluaciones financieras de largo plazo.
- III. Los sensores de humedad del suelo se modelan de forma ideal dentro del entorno de simulación, incorporando únicamente perturbaciones o errores de lectura simplificados.
- IV. No se considera la implementación física ni la validación experimental en terreno del sistema propuesto, basando los resultados exclusivamente en el modelo computacional.

# **1. Estado del Arte**

## **1.1. Contexto Hídrico Global y Seguridad Alimentaria**

El recurso hídrico constituye un pilar indispensable para el desarrollo socioeconómico, la seguridad alimentaria y la integridad de los ecosistemas. En la actualidad, este recurso enfrenta una crisis donde su accesibilidad y calidad se ven comprometidas por el impacto del cambio climático y la actividad antropogénica. Esta problemática se manifiesta en la expansión de manera exponencial de la demanda hídrica global, la cual ha experimentado un incremento del 600 % durante el último siglo (UNESCO, 2021).

La alteración del ciclo hidrológico, impulsada por el calentamiento global, ha intensificado la frecuencia y magnitud de eventos climáticos extremos. Las proyecciones climáticas son críticas: se estima que para el año 2050, más del 50 % de la población mundial residirá en regiones bajo condiciones de estrés hídrico severo (ONU-Agua, 2023). Esta escasez física se ve agravada por la degradación cualitativa de los cuerpos de agua; la pérdida de ecosistemas estratégicos como los humedales fundamentales para la captura de carbono y fenómenos como la eutrofización, comprometen la resiliencia de las comunidades frente a las perturbaciones climáticas (UNESCO, 2021).

En el núcleo de esta crisis se posiciona el sector agrícola como el principal consumidor de agua dulce, representando aproximadamente el 70 % de las extracciones totales a nivel mundial. La redistribución de los recursos hídricos inducida por el clima anticipa transformaciones profundas en la producción de alimentos, con reducciones significativas en el rendimiento de los cultivos en las regiones más vulnerables (FAO, 2022). Bajo este escenario, resulta prioritario el diseño de sistemas agroalimentarios sostenibles que integren tecnologías de precisión para asegurar la seguridad hídrica y alimentaria en contextos de aridez.

## **1.2. La Crisis Hídrica y su Impacto en la Agricultura Chilena**

La crisis hídrica en Chile ha trascendido su carácter de amenaza cíclica para consolidarse como un factor determinante del desarrollo nacional. El fenómeno denominado “megasequía”, que persiste desde el año 2010 con una extensión geográfica sin precedentes, ha derivado en la declaración de decretos de escasez hídrica en más de 200 comunas del país. Esta situación alcanza niveles críticos en la zona centro-norte, específicamente en la Región de Coquimbo, donde cuencas estratégicas como la del Río Limarí exhiben un déficit hídrico crónico (Dirección General de Aguas [DGA], 2025).

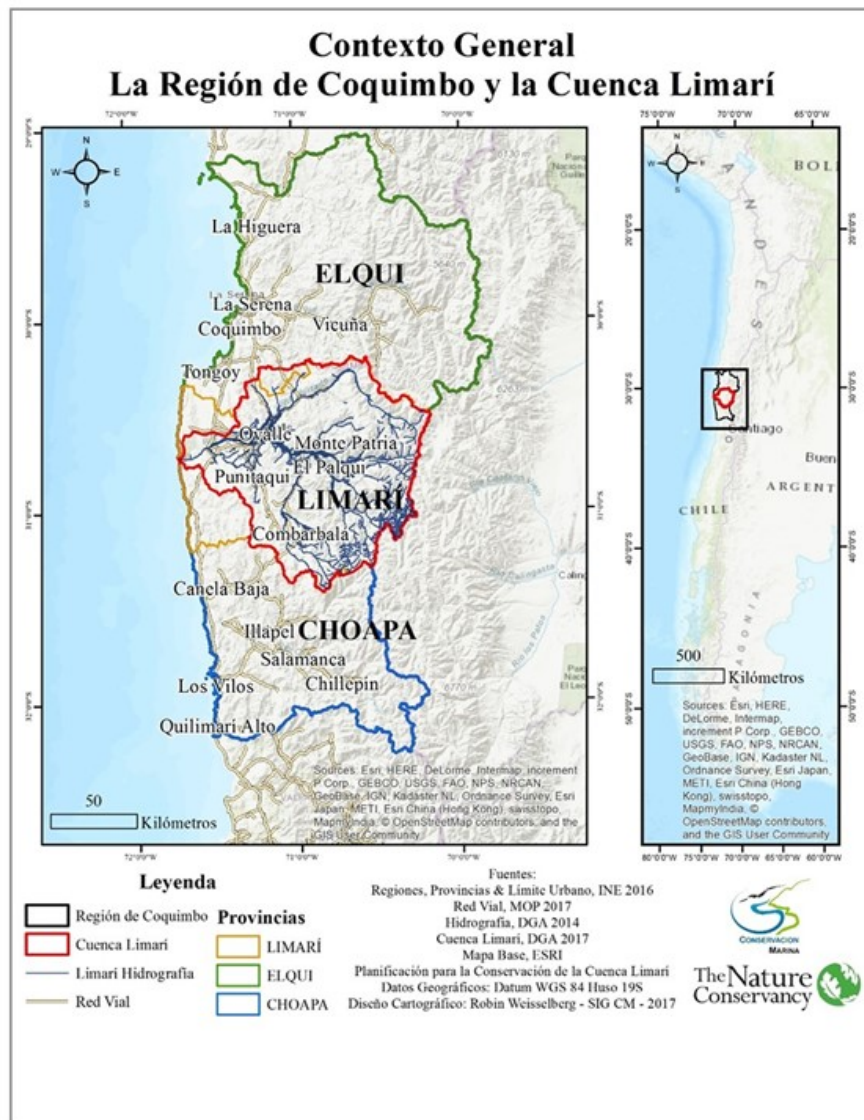


Figura 1.1: Ubicación geográfica de la Cuenca del Limarí en el contexto de la Región de Coquimbo. Fuente: Extraído de Delgado et al. (2018).

En la Provincia del Limarí, la brecha entre la oferta de agua y la creciente demanda representa el principal desafío para el sector agrícola regional, el cual concentra el 74 % del consumo total del recurso hídrico en Chile (DGA, 2016). El impacto en esta actividad es multidimensional, afectando la disponibilidad del recurso para cultivos estratégicos como la vid y aumentando la incertidumbre operativa debido a un entorno regulatorio restrictivo que prioriza el consumo humano en zonas de escasez (Delgado et al., 2018).

Frente a esta restricción física y normativa, la adaptación tecnológica se vuelve imperativa. Los estudios en la cuenca demuestran que la problemática no es exclusivamente climática, sino también de gestión, producto de infraestructuras que requieren modernización y sistemas de control más eficientes. Por lo tanto, la viabilidad de la agricultura en las zonas áridas depende de la transición hacia una gestión inteligente de los recursos. En este contexto, la optimización del riego mediante estrategias de control dinámico y la autosuficiencia energética,

como la propuesta basada en energía solar en este trabajo, constituyen componentes fundamentales para asegurar la resiliencia productiva de la provincia.

### 1.3. Fundamentos de los Sistemas de Riego Tecnificados

La tecnificación del riego representa la evolución desde métodos tradicionales hacia sistemas de gestión precisa del recurso hídrico, constituyendo la base sobre la cual se desarrollan las soluciones de automatización. Un sistema de riego tecnificado se compone fundamentalmente de tres subsistemas interrelacionados: captación y bombeo, red de distribución y control, y emisión del agua al cultivo (Martínez, 2010).

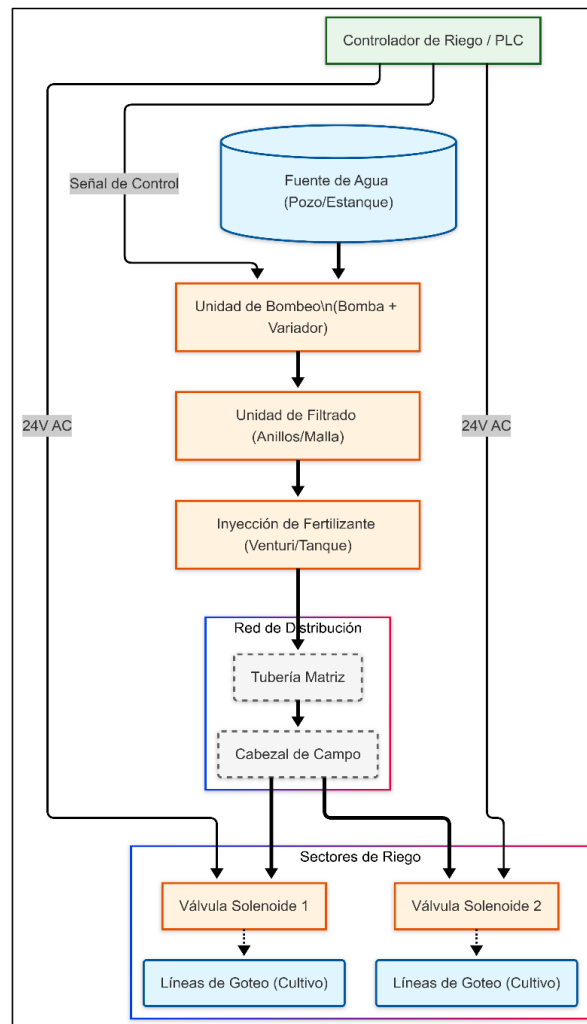


Figura 1.2: Esquema general de los componentes de un sistema de riego tecnificado automatizado. Fuente: Elaboración propia, basado en Ruiz Canales y Molina Martínez (2010).

- Captación y bombeo:** Este subsistema es responsable de extraer el agua desde la fuente y proporcionar la energía hidráulica necesaria. La integración de tecnologías de control permite optimizar el funcionamiento de las bombas, adaptando su operación a la disponibilidad energética y a la demanda de presión de la red.

- **Red de distribución y control:** Actúa como el centro de mando del sistema. Incluye la red de tuberías, válvulas de accionamiento automático y sensores (humedad, presión, caudal). La correcta disposición de estos componentes es crítica para que el algoritmo de control reciba datos confiables y ejecute las órdenes de riego de manera oportuna.
- **Emisión de agua:** En el contexto de este estudio, se utiliza el riego localizado o por goteo. Este método destaca por su alta eficiencia al aplicar el agua directamente en la zona radicular del cultivo, minimizando las pérdidas por evaporación y escurrimiento superficial, lo que resulta esencial en zonas de extrema escasez como el Limarí.

La implementación de estos sistemas tecnificados permite transitar de un esquema de riego por tiempo a uno basado en la demanda real de la planta. Sin embargo, su principal limitación radica en la dependencia de energía eléctrica convencional. Esta restricción es especialmente crítica para pequeños y medianos agricultores ubicados en zonas rurales aisladas, donde la conexión a la red es inexistente o de baja calidad. En estos contextos, el uso de generadores diésel suele ser la única alternativa, lo que conlleva altos costos operativos y una logística de suministro compleja, abriendo paso a la necesidad de integrar soluciones fotovoltaicas de acople directo como una alternativa autónoma y económica.

#### **1.4. Sistemas de Bombeo Fotovoltaico de Acople Directo con Tecnología BLDC**

En el contexto de la agricultura autónoma en zonas áridas, la selección de la arquitectura de bombeo es una decisión crítica para la viabilidad del proyecto. Por esta razón, se ha optado por un sistema de bombeo fotovoltaico (SFV) de acople directo basado en tecnología de motores de corriente continua sin escobillas (BLDC). A diferencia de los esquemas convencionales que utilizan motores de inducción AC acoplados a variadores de frecuencia industriales, la tecnología BLDC permite una conexión más eficiente y simplificada entre el generador fotovoltaico y la unidad de bombeo.

Esta selección técnica se fundamenta en la evidencia presentada por Alonso Abella y Chenlo Romero (s.f.) del CIEMAT, quienes establecen que los sistemas basados en motores DC de imanes permanentes presentan rendimientos superiores a los de corriente alterna, especialmente en los rangos de potencia baja y media típicos de la agricultura familiar. Al operar nativamente en corriente continua, se elimina la etapa de inversión DC/AC, reduciendo las pérdidas de conversión energética y maximizando el aprovechamiento de la radiación solar incluso en condiciones de baja irradiancia.

Adicionalmente, la arquitectura BLDC ofrece una ventaja operativa sustancial al eliminar las escobillas del motor, lo que suprime el desgaste mecánico por fricción y la necesidad de mantenimiento periódico, aumentando la fiabilidad del sistema en zonas aisladas. Esta configuración se complementa con una estrategia de acumulación que sustituye las baterías químicas por una “batería hidráulica”, utilizando un estanque para almacenar energía potencial en forma de agua, lo que reduce drásticamente los costos de inversión (CAPEX) y el impacto ambiental asociado a los acumuladores electroquímicos.

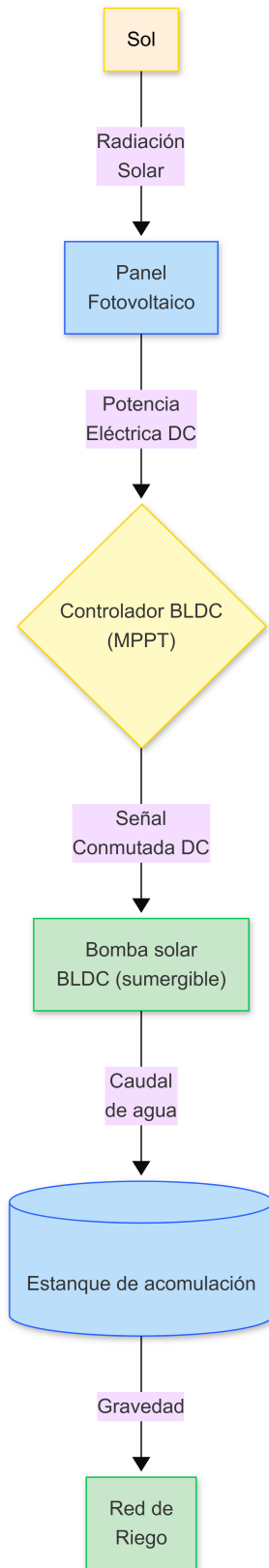


Figura 1.3: Diagrama de flujo de un sistema de bombeo fotovoltaico de acople directo con acumulación hídrica. Fuente: Elaboración propia.

## 1.5. Estrategias de Control: Lógica de Histéresis

La selección del algoritmo de control es determinante para la estabilidad operativa del sistema de riego. Si bien en la industria de procesos es común el uso de controladores proporcionales (PID), la dinámica del agua en el suelo presenta una alta inercia térmica e hidráulica que hace más eficiente el uso de controles no lineales.

De acuerdo con Ruiz Canales y Molina Martínez (2010), el control ideal para el manejo de la humedad del suelo es el control de dos posiciones con histéresis (On/Off con banda muerta). Esta estrategia ha sido validada exitosamente en sistemas de agricultura de precisión, como el desarrollado por Castro et al. (2016), donde se definen dos umbrales operativos claros:

- **Umbral Inferior ( $H_{min}$ ):** Corresponde al Umbral de Riego (UR). Al llegar a este punto, el sistema activa el bombeo para evitar el estrés hídrico del cultivo.
- **Umbral Superior ( $H_{max}$ ):** Corresponde a la Capacidad de Campo (CC). Es el punto de referencia donde se detiene el riego para evitar la percolación profunda y el desperdicio de recursos.

La magnitud de la banda de histéresis ( $\Delta H$ ) se define formalmente como la diferencia aritmética entre estos dos umbrales, tal como se expresa en la Ecuación 1.1:

$$\Delta H = H_{max} - H_{min} \quad (1.1)$$

La principal ventaja de implementar esta banda es la protección de los equipos electro-mecánicos. Al evitar las conmutaciones frecuentes (“chattering”) ante pequeñas variaciones del sensor, se extiende la vida útil de las bombas sumergibles y se aseguran ciclos de riego profundos que favorecen el desarrollo radicular.

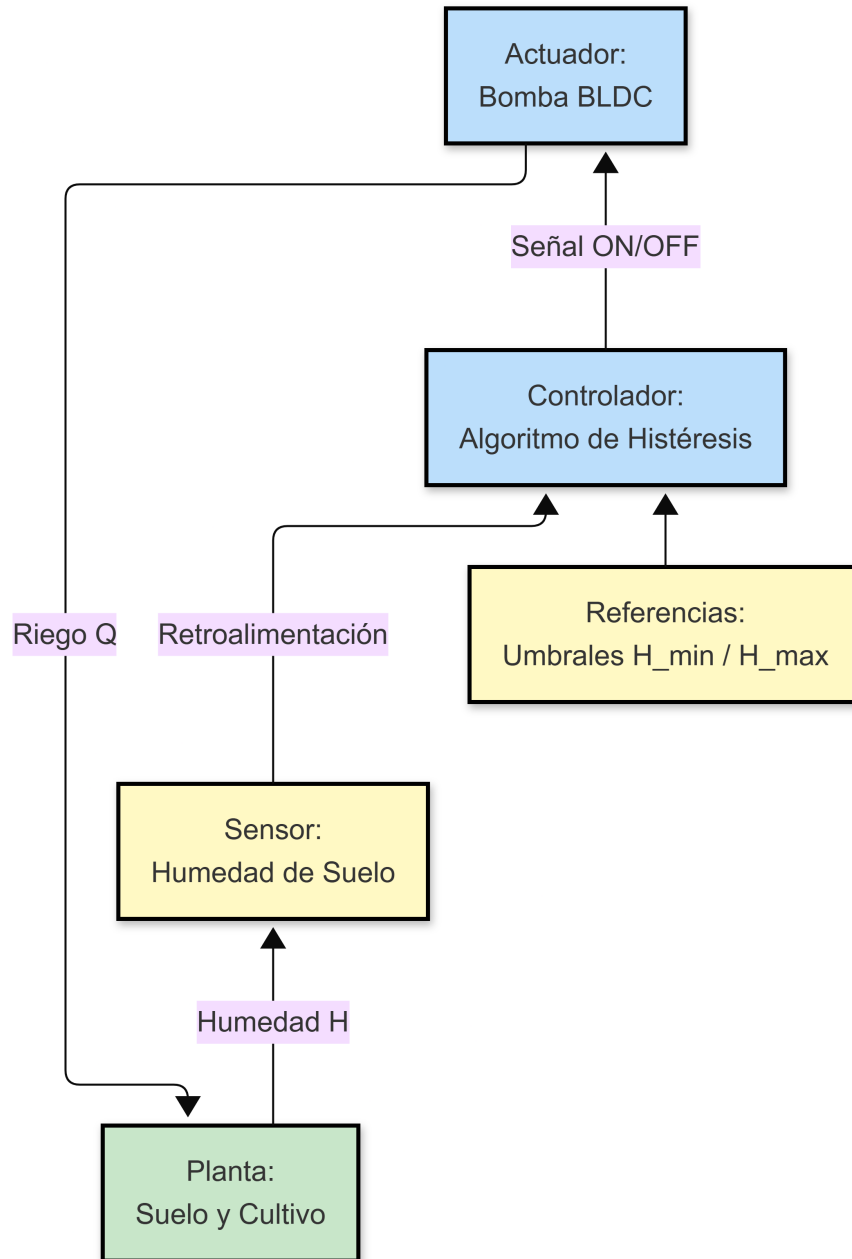


Figura 1.4: Diagrama de bloques del sistema de control en lazo cerrado implementado. Fuente: Elaboración propia, basado en el esquema de control de Castro et al. (2016).

## 1.6. Integración de Sistemas: Brecha Identificada en la Literatura

A pesar de la madurez tecnológica descrita en las secciones anteriores donde se ha validado la eficiencia del bombeo BLDC y la robustez del control por histéresis de manera independiente, la revisión bibliográfica revela una desconexión significativa en la integración de estas soluciones para la pequeña y mediana agricultura en contextos de crisis hídrica severa.

Si bien existen soluciones industriales avanzadas, estas suelen implicar costos de inver-

sión (baterías, variadores complejos) inalcanzables para el sector rural local. Por otro lado, las soluciones de bajo costo a menudo carecen de una lógica de control inteligente que garantice la seguridad hídrica del cultivo. Alvear Cid (2024) destaca en su diagnóstico reciente sobre la Provincia del Limarí que, aunque existe tecnificación, persisten brechas críticas en la asesoría técnica y en la adaptación de las tecnologías a la realidad operativa de los pequeños agricultores, quienes requieren sistemas autónomos que no dependan de una operación manual constante ni de mantenimientos complejos.

Por lo tanto, se identifica una brecha tecnológica en el diseño de sistemas que sean simultáneamente:

1. **Autónomos Energéticamente:** Sin dependencia de la red ni de baterías químicas (Acople Directo).
2. **Inteligentes Hidráulicamente:** Con control de humedad por histéresis y no por tiempo fijo.
3. **Económicamente Viables:** Adaptados a la escala productiva local.

Esta tesis busca cubrir dicha brecha mediante el modelado y simulación de un sistema que integre estas variables, validando su factibilidad técnica antes de la inversión física.

## 1.7. Normativa Energética e Hídrica Chilena

El diseño de un sistema de riego autónomo debe enmarcarse rigurosamente en el contexto normativo chileno, el cual establece las reglas para el uso de los recursos hídricos y energéticos. La creciente crisis hídrica y la transición energética han impulsado un marco regulatorio que, lejos de constituir una barrera, **incentiva y favorece** la implementación de soluciones tecnológicas como la propuesta en esta tesis.

### 1.7.1. Marco Normativo Hídrico

La gestión del agua en Chile se rige principalmente por el *Código de Aguas* (Decreto con Fuerza de Ley N° 1.122 de 1981, y sus modificaciones posteriores). Para la implementación de un sistema de riego tecnificado, es crucial considerar los siguientes aspectos legales:

- **Derechos de Aprovechamiento de Aguas:** La extracción de agua, ya sea superficial o subterránea, requiere la titularidad de un derecho de aprovechamiento. En zonas de escasez hídrica declarada, como la Provincia del Limarí, la Dirección General de Aguas (DGA) posee facultades para restringir nuevas constituciones de derechos y redistribuir caudales, priorizando el consumo humano (Ministerio de Obras Públicas [MOP], 2022).
- **Declaración de Extracción de Aguas Subterráneas:** Toda obra de extracción de aguas subterráneas (pozo profundo o noria para el sistema de bombeo) debe ser declarada ante la DGA, cumpliendo con las especificaciones técnicas de control de extracciones que la autoridad establezca (DGA, 2022).

- **Uso de Aguas en Situación de Escasez:** Resoluciones como la DGA N°1482 establecen protocolos específicos para zonas con decreto de escasez. En este escenario, se pueden imponer restricciones temporales al riego, lo que vuelve crítica la adopción de tecnologías de eficiencia hídrica máxima, como el riego por goteo automatizado y el control basado en la demanda real del suelo (DGA, 2022).

### 1.7.2. Marco Normativo Energético y de Generación Distribuida

El sector energético chileno ha experimentado una transformación profunda, orientada hacia la descarbonización y la generación distribuida. Si bien el sistema propuesto opera en modalidad aislada (*off-grid*), se alinea con los principios de las siguientes leyes:

- **Ley N° 20.571 (Net Billing):** Esta normativa permite a los usuarios generar su propia energía con fuentes renovables. Aunque el sistema de bombeo propuesto es autónomo, esta ley sienta un precedente crucial al reconocer y valorizar la generación solar a pequeña escala, estableciendo estándares de seguridad y calidad para instalaciones fotovoltaicas que son aplicables referencialmente a sistemas aislados (Ministerio de Energía, 2012).
- **Ley N° 21.305 de Eficiencia Energética:** Esta ley promueve la gestión eficiente de la energía. Aunque su foco inicial son los grandes consumidores, refleja una política de Estado orientada a la optimización energética. El sistema propuesto contribuye directamente a este principio al desplazar el uso de combustibles fósiles (diésel) por energía solar directa (Ministerio de Energía, 2021).
- **Compromisos de Carbono Neutralidad:** La Estrategia Climática de Largo Plazo de Chile establece la meta de carbono neutralidad al año 2050. La sustitución de motobombas diésel por sistemas fotovoltaicos se alinea directamente con estos compromisos internacionales, reduciendo las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) en el sector agrícola (Ministerio del Medio Ambiente, 2021).

**Conclusión del Marco Normativo** El análisis regulatorio permite concluir que la normativa chilena ha evolucionado para facilitar la adopción de energías renovables. En el ámbito hídrico, aunque la normativa es restrictiva debido a la escasez, esto refuerza la necesidad del proyecto: un sistema que optimiza el recurso hídrico mediante control automático se convierte en una herramienta clave para la adaptación normativa y la sostenibilidad del agricultor. Por lo tanto, la solución es técnica y legalmente viable.

## 1.8. Conclusiones del Capítulo y Definición de la Propuesta

La revisión bibliográfica y técnica realizada en este capítulo permite establecer un diagnóstico claro: la crisis hídrica en la Provincia del Limarí no es un fenómeno transitorio, sino una condición estructural que exige el reemplazo de los métodos de riego tradicionales basados en horarios fijos y energía fósil.

El análisis del estado del arte confirma que la integración tecnológica es la ruta crítica para la sostenibilidad agrícola en la zona. Por un lado, la tecnología de bombeo fotovoltaico

con motores BLDC de acople directo ha demostrado ser la solución más eficiente y libre de mantenimiento para energizar zonas rurales aisladas. Por otro, las estrategias de control en lazo cerrado por histéresis ofrecen un compromiso óptimo entre simplicidad de implementación y protección agronómica, evitando tanto el estrés hídrico como el desperdicio de agua por percolación.

Asimismo, se ha verificado que el marco normativo chileno vigente no solo permite, sino que incentiva este tipo de soluciones autónomas y eficientes. Sin embargo, se ha detectado una brecha en la disponibilidad de herramientas de diseño que permitan al pequeño agricultor evaluar estas configuraciones antes de realizar la inversión económica.

En consecuencia, este proyecto se fundamenta en la necesidad de desarrollar y simular un sistema que integre estas variables (energía solar, hidráulica de suelos y control automático), simulando su comportamiento mediante modelos matemáticos rigurosos antes de su implementación física. Esta aproximación metodológica, que será detallada en el siguiente capítulo, busca asegurar que la solución propuesta sea técnicamente robusta y económicamente viable para la realidad del Limarí.

## 2. Diseño del Sistema y Metodología de Simulación

### 2.1. Introducción al Capítulo

El diseño de un sistema de riego tecnológicamente avanzado debe estar sustentado en una comprensión profunda de la realidad operativa donde se implementará. La ingeniería aplicada requiere adaptar las soluciones teóricas a las restricciones físicas y climáticas del sitio específico.

Este capítulo establece el diagnóstico de factibilidad para el sistema de riego autónomo propuesto, utilizando datos meteorológicos satelitales de alta resolución y estudios de campo locales. El objetivo es caracterizar la oferta energética (sol) y la demanda hídrica (cultivo) para dimensionar un sistema que sea eficiente y económicamente viable.

### 2.2. Contexto del Problema y Zona de Estudio

#### 2.2.1. Ubicación y Caracterización Agroclimática

La zona de estudio se ubica en la Provincia del Limarí, Región de Coquimbo. Para efectos de la simulación, se han seleccionado las coordenadas exactas de una unidad productiva en el sector de Tuquí-Talhuén (Latitud  $30^{\circ}36'09''$  S, Longitud  $71^{\circ}17'02''$  O), con una elevación aproximada de 290 m.s.n.m.

Como se aprecia en la visualización satelital de la Figura 2.1, el emplazamiento presenta un fuerte contraste entre la superficie bajo riego y el entorno árido circundante.



Figura 2.1: Ubicación satelital en Tuquí-Talhuén. Se observa el contraste entre el área de riego (verde) y zona arida. Fuente: Google Earth (2025).

### 2.2.2. Justificación de la Solución Mono-Tecnológica

Un aspecto crítico del diseño es la selección de la fuente de energía. Se analizó la viabilidad de un sistema híbrido (Eólico-Solar) utilizando los datos del *Reporte de Recurso Solar y Meteorológico* del Ministerio de Energía (2025).

Los datos revelan una disparidad insalvable entre ambos recursos:

- **Recurso Solar (Excelente):** La irradiación global horizontal alcanza promedios de 8.71 kWh/m<sup>2</sup>/día en enero, coincidiendo con la máxima demanda hídrica de la vid.
- **Recurso Eólico (Deficiente):** La velocidad promedio del viento a 5.5 metros de altura es de apenas 1.71 m/s en verano y cae a 0.78 m/s en mayo (Ministerio de Energía, 2025).

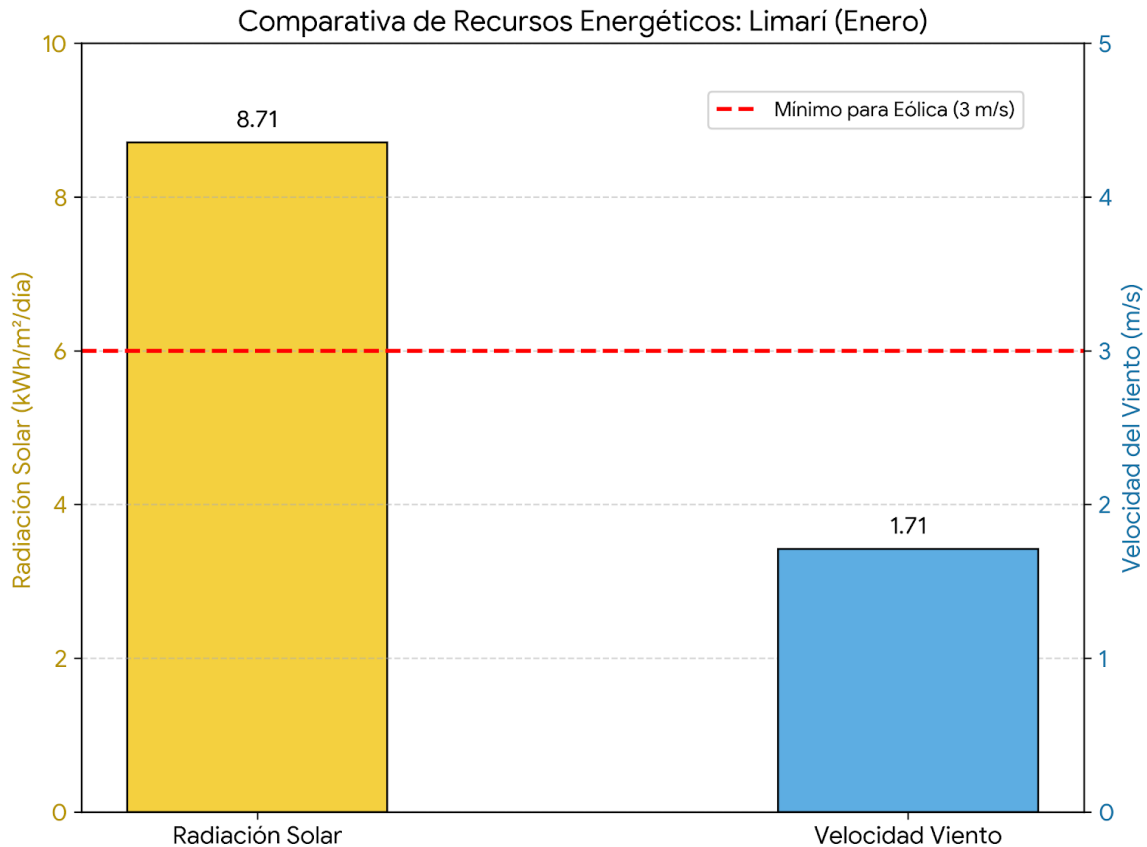


Figura 2.2: Comparativa de disponibilidad de recursos energéticos durante el mes crítico (Enero) en Tuquí-Talhuén, Provincia de Limarí. La línea roja indica el umbral mínimo de arranque para aerogeneradores, demostrando la inviabilidad técnica de la energía eólica frente a la abundancia del recurso solar. Fuente: Elaboración propia con datos del Ministerio de Energía (2025).

Dado que los aerogeneradores de pequeña escala requieren velocidades de arranque (cut-in wind speed) superiores a 3.0 m/s para generar potencia útil, se descarta técnicamente la

implementación de energía eólica. Por lo tanto, el diseño se centrará exclusivamente en una arquitectura fotovoltaica directa, reduciendo la complejidad mecánica y el costo de inversión (CAPEX).

### 2.3. Evaluación del Recurso Energético Solar

La viabilidad del sistema propuesto depende de la disponibilidad de radiación solar directa. La Tabla 2.1 presenta los datos mensuales extraídos del sitio de estudio, los cuales serán utilizados como "variables de entradas" para la simulación en Python.

Tabla 2.1: Promedios mensuales de Radiación Global Horizontal (GHI) en el sitio de estudio

Mes	Radiación Global (kWh/m <sup>2</sup> /día)
Enero	8.71
Febrero	7.91
Marzo	6.48
Abril	4.67
Mayo	3.32
Junio	2.81
Julio	2.98
Agosto	3.90
Septiembre	5.30
Octubre	7.00
Noviembre	8.22
Diciembre	8.92
<b>Promedio Anual</b>	<b>5.85</b>

Se observa una alta estacionalidad que favorece al proyecto: durante la temporada de riego (septiembre a marzo), la radiación promedio nunca desciende de 5.3 kWh/m<sup>2</sup>/día, garantizando energía suficiente para el bombeo sin necesidad de sobredimensionar excesivamente el campo fotovoltaico para los meses de invierno.

### 2.4. Ingeniería básica y Dimensionamiento del Sistema

Una vez definida la arquitectura general de la solución (100 % Fotovoltaica + Acumulación Hidráulica), se procede al dimensionamiento a nivel de ingeniería básica de los equipos principales. Los parámetros macro aquí calculados (tales como potencias, caudales nominales y volúmenes de almacenamiento) constituyen las restricciones físicas (*constraints*) que establecerán los límites operativos para el algoritmo de control durante la etapa de simulación.

#### 2.4.1. Cálculo de la Demanda Hídrica de Diseño

Para garantizar la seguridad hídrica del cultivo, el sistema se dimensiona considerando el "Mes Crítico"(Enero), momento en que la Uva de Mesa (*Vitis vinifera*) atraviesa las etapas

de crecimiento de baya y envero, presentando su máxima sensibilidad al estrés hídrico.

Según el estudio reciente de Ramírez Rodríguez (2024) sobre la evolución de cultivos en el Valle del Limarí, la demanda evapotranspirativa en esta zona ha mostrado un aumento sostenido. Se establece un Coeficiente de Cultivo máximo ( $K_{c,max}$ ) de 0.90 para el mes de enero, considerando el manejo de canopia típico de la zona (INIA, 2018).

La demanda volumétrica diaria de diseño ( $V_{req}$ ) para 1.0 hectárea se calcula según la Ecuación FAO ajustada a la eficiencia local:

$$V_{req} = \frac{ET_o \times K_c \times A}{E_{friegos}} = \frac{6,5 \text{ mm/día} \times 0,90 \times 10,000 \text{ m}^2}{0,90} \approx 65,0 \text{ m}^3/\text{día} \quad (2.1)$$

Donde se asume una eficiencia de riego por goteo ( $E_{friegos}$ ) del 90%, valor alcanzable solo mediante la automatización propuesta. Donde el parámetro de eficiencia de riego por goteo ( $E_{friegos}$ ) se fija en un 90%. Acorde a las directrices agronómicas de automatización e instrumentación en el suelo (García, 2009; Ruiz Canales y Molina Martínez, 2010), la incorporación del control automático propuesto permite alcanzar este porcentaje al suprimir las sobredosificaciones características del riego manual (Castro et al., 2016).

#### 2.4.2. Diseño del Sistema de Acumulación (Batería Hidráulica)

La estrategia de gestión energética se basa en desacoplar la generación fotovoltaica (diurna) de la demanda de riego (continua). Para ello, se proyecta un tranque de acumulación intrapredial que actúa como "batería hidráulica".

Siguiendo las recomendaciones técnicas de la Comisión Nacional de Riego (CNR, 2018), el estanque se dimensiona para asegurar una autonomía operativa de 3 días sin aporte solar:

$$V_{acum} = V_{req} \times 3 \text{ días} = 65 \text{ m}^3/\text{día} \times 3 = 195 \text{ m}^3 \quad (2.2)$$

Para evitar pérdidas por infiltración, se especifica el revestimiento con Geomembrana de HDPE (Polietileno de Alta Densidad) de 1.0 mm de espesor, garantizando impermeabilidad y resistencia UV (CNR, 2018).

#### 2.4.3. Selección del Grupo de Bombeo Fotovoltaico

Dado que la radiación solar presenta un comportamiento variable a lo largo del día en forma de campana, el controlador MPPT ajustará dinámicamente el caudal de la motobomba BLDC. Por ello, el dimensionamiento se realiza utilizando el concepto de Horas de Sol Pico (HSP), que integra la radiación diaria equivalente a  $1000 \text{ W/m}^2$ . Considerando la demanda diaria de  $65 \text{ m}^3$  y una disponibilidad de 6 HSP para el mes crítico (Ministerio de Energía, 2025), el caudal nominal de diseño requerido a máxima potencia es:

$$Q_{nominal} = \frac{65 \text{ m}^3}{6 \text{ HSP}} \approx 10,8 \text{ m}^3/\text{h} \quad (2.3)$$

Se selecciona una bomba sumergible con motor BLDC de 3 HP (2.2 kW), cuyo alto torque de arranque maximiza el volumen diario acumulado.

## 2.5. Dimensionamiento del sistema Fotovoltaico

En sistemas de bombeo de acople directo, el principio fundamental para el dimensionamiento del arreglo fotovoltaico radica en satisfacer la demanda de energía eléctrica diaria (kWh/día) necesaria para extraer el volumen hídrico de diseño. Este suministro energético depende estrictamente de la disponibilidad de radiación solar local (Horas de Sol Pico, HSP) y de la curva de irradiancia, y no solamente de la potencia nominal instalada.

Dado que la potencia instantánea entregada por los módulos fluctúa durante el día, igualar la capacidad del arreglo a la potencia nominal de la motobomba sumergible BLDC (2,2 kW) resultaría en una ventana operativa demasiado estrecha para captar la energía requerida. Para asegurar que el sistema integre la energía total necesaria durante las HSP proyectadas, se aplica un factor de sobredimensionamiento.

La norma técnica recomienda un margen de 1,2 a 1,5 veces la potencia del motor. Este porcentaje extra es vital para expandir la campana de generación útil, asegurar el torque de arranque matutino y compensar las pérdidas de eficiencia térmica (derrateo) de los módulos bajo alta radiación.

Por consiguiente, se selecciona un generador compuesto por 5 paneles monocristalinos de 550 Wp (modelo Tiger Pro 72HC) conectados en serie. Esta configuración proporciona una potencia peak instalada de 2,75 kWp, logrando un factor de dimensionamiento óptimo de 1,25 respecto al motor.

Asimismo, la conexión en serie de los 5 módulos entrega un voltaje de máxima potencia ( $V_{mp}$ ) de 204,5 V y un voltaje de circuito abierto ( $V_{oc}$ ) de 248,1 V. Estos parámetros eléctricos se ajustan perfectamente a la ventana de tensión operativa exigida por el controlador MPPT (entre 200 V y 400 V). Un resumen de este dimensionamiento se presenta en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2: Resumen del Dimensionamiento Fotovoltaico

Parámetro	Valor	Justificación Técnica
Principio de Diseño	Energía (kWh/día)	Asegurar la extracción del volumen hídrico (65 m <sup>3</sup> ) durante las horas de sol pico.
Factor de Sobredimensionamiento	1,25	Compensar derrateo térmico y ensanchar la ventana operativa diaria.
Potencia Fotovoltaica Total	2,75 kWp	5 módulos de 550 Wp para alimentar el motor de 2,2 kW.
Tensión del Arreglo ( $V_{mp}$ )	204,5 V	Satisface el rango operativo del controlador MPPT (200 V - 400 V).

### 2.5.1. Instrumentación del Suelo

Para la implementación del control por histéresis, se descartan los sensores tensiométricos y se especifica el uso de Sondas de Capacitancia (FDR). Esto se justifica por la tendencia de los suelos locales a la compactación, lo cual altera la fiabilidad de mediciones resistivas (García, 2009). Estos sensores permiten detectar con precisión los umbrales de Capacidad de Campo ( $H_{max}$ ) y Punto de Marchitez ( $H_{min}$ ).

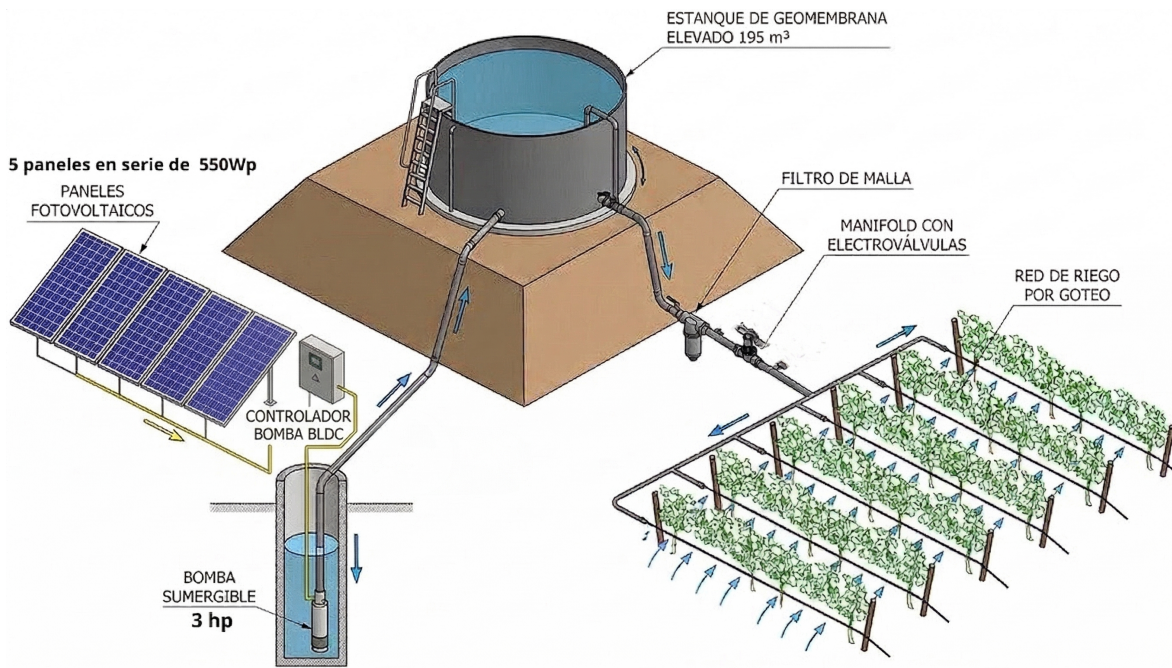


Figura 2.3: Layout tecnológico del sistema de riego propuesto. Se observa la arquitectura de acople directo, el sistema de acumulación hídrica de distribución automatizada para uva de mesa. Fuente: Elaboración propia.

## 2.6. Estrategia de Control y Gestión Hídrica

La eficiencia del sistema propuesto no radica únicamente en sus componentes físicos, sino en la lógica de control que gobierna la decisión de riego. A diferencia de los programadores tradicionales basados en horarios fijos (Lazo Abierto), esta tesis implementa una estrategia de **Control en Lazo Cerrado** basada en la retroalimentación del estado hídrico del suelo.

## 2.7. Selección del Sensor de Humedad de Suelo

Para la realimentación del lazo de control por histéresis, se requiere instrumentación capaz de medir el contenido volumétrico de agua en el suelo con alta fiabilidad. Se selecciona la sonda de perfil multidepth **Profile Probe modelo PR2 (Delta-T Devices)**, la cual opera bajo el principio de Reflectometría de Dominio de Frecuencias (FDR).

La elección de este instrumento se justifica técnicamente por su capacidad de monitorear la humedad a múltiples profundidades de forma simultánea. En el contexto del Valle del Limarí, esto resulta crítico para registrar la dinámica del agua a lo largo de toda la zona radicular activa del cultivo. La obtención de este perfil de humedad permite a la lógica de automatización interrumpir el riego de forma precisa cuando el estrato inferior alcanza la Capacidad de Campo, evitando pérdidas por percolación profunda y garantizando el 90% de eficiencia de aplicación establecido previamente en el diseño.

**Justificación de Representatividad Espacial:** Cabe destacar que la arquitectura de control especifica el uso de un (1) solo instrumento físico para la superficie total de 1,0 hectárea. Esta decisión de diseño se sustenta en la modelación del predio como una Zona de Manejo

Homogéneo (ZMH), asumiendo uniformidad en las propiedades edafológicas (suelo franco-arenoso), topográficas y fenológicas del cultivo. Bajo estas condiciones métricas, la literatura agronómica establece que la instalación del sensor en un punto representativo o "planta testigo"—alejado del efecto borde— entrega datos estadísticamente válidos para comandar el riego de todo el sector, optimizando el Presupuesto de Capital (CAPEX) sin sacrificar la fiabilidad del control de histéresis. En caso de implementarse en terrenos con alta variabilidad espacial, el sistema es modular y permitiría la futura adición de nodos sensores y la sectorización del manifold.

Tabla 2.3: Especificaciones Técnicas del Sensor Profile Probe PR2

Parámetro Técnico	Especificación
Fabricante y Modelo	Delta-T Devices Ltd, Profile Probe PR2
Principio de Medición	Dominio de Frecuencia (FDR) a 100 MHz
Variable Medida	Contenido Volumétrico de Agua ( $m^3 \cdot m^{-3}$ o %vol)
Profundidades de Medición	10, 20, 30 y 40 cm (PR2/4) / 60 y 100 cm (PR2/6)
Precisión de Medida	$\pm 0,06 m^3 \cdot m^{-3}$ (calibración general) a $\pm 0,04 m^3 \cdot m^{-3}$ (calibración específica)
Rango Operativo de Temperatura	-20°C a 60°C (Precisión total entre 0°C y 40°C)
Señal de Salida	Analógica en voltaje (0 a $\approx 1.0$ V DC)
Alimentación Eléctrica	5.5 V a 15 V DC
Grado de Protección	IP67 (Apto para intemperie y sumersión temporal)

## 2.8. Selección del Actuador: Electroválvula de Riego

El accionamiento de la red de riego se ejecuta mediante una electroválvula dispuesta a la salida de la matriz principal del estanque. Considerando el caudal nominal de diseño de  $10,8 \text{ m}^3/\text{h}$ , se selecciona la electroválvula comercial **Rain Bird Serie PGA, modelo 200PGA de 2 pulgadas**.

La selección de este componente se fundamenta en sus especificaciones técnicas de catálogo, las cuales se ajustan óptimamente a los requerimientos del lazo de control:

- Capacidad Hidráulica:** Su rango de operación permite manejar holgadamente el caudal de diseño, garantizando una pérdida de carga friccional mínima (inferior a 0,15 bar según curva del fabricante). Esto es crítico para no comprometer la carga hidráulica natural entregada por gravedad desde el estanque.
- Seguridad Operativa (Fail-Safe):** Su arquitectura es del tipo Normalmente Cerrada (NC). Frente a cualquier interrupción del suministro eléctrico desde el controlador, el diafragma bloquea mecánicamente el flujo, previniendo el vaciado accidental de la reserva de  $195 \text{ m}^3$ .

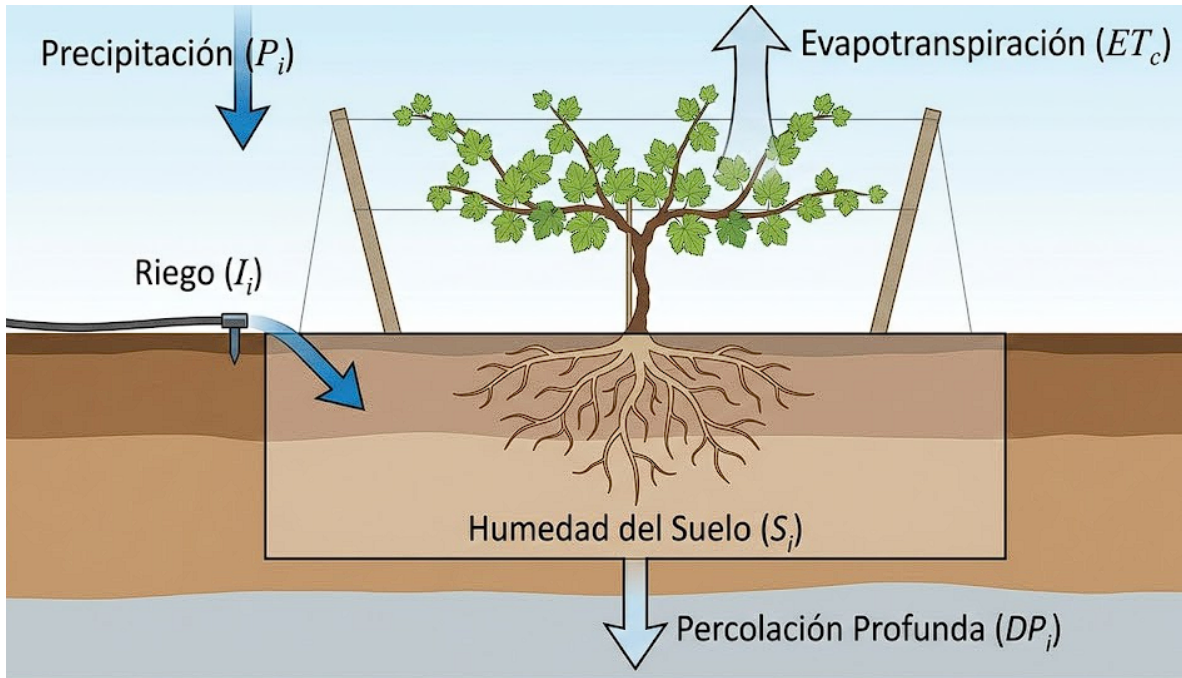


Figura 2.4: Esquema conceptual del balance hídrico en la zona radicular del cultivo. Fuente: Elaboración propia, basado en Allen et al. (1998).

- **Protección Mecánica:** Incorpora un mecanismo interno de cierre lento (*slow closing*). Esta característica disipa la energía cinética del fluido, previniendo el fenómeno de golpe de ariete y protegiendo a la tubería matriz contra fatiga por estrés mecánico.

### 2.8.1. Modelo Matemático de Balance Hídrico

El núcleo de la simulación se basa en el método del balance de masas en la zona radicular, estandarizado por la FAO (Allen et al., 1998). Este modelo asume que el suelo funciona como un estanque con capacidad de almacenamiento finita.

La variación diaria del contenido de agua en el suelo ( $\Delta S_i$ ) se define formalmente mediante la Ecuación 2.4:

$$S_i = S_{i-1} + P_i + I_i - ET_{c,i} - DP_i \quad (2.4)$$

Donde:

- $S_i$ : Contenido de agua en el suelo en el día  $i$  [mm].
- $P_i$ : Precipitación efectiva (Dato del Ministerio de Energía, 2025).
- $I_i$ : Riego aplicado (Variable de control).
- $ET_{c,i}$ : Evapotranspiración del cultivo ( $K_c \times ET_o$ ).
- $DP_i$ : Percolación profunda (pérdida).

### 2.8.2. Definición de Umbrales de Suelo

Para definir cuándo regar, es necesario conocer los límites físicos del suelo. Según García (2009), en los suelos de la zona norte, la compactación afecta la densidad aparente, modificando la curva de retención de humedad. Basado en esto, se definen dos umbrales operativos para la simulación:

1. **Límite Superior ( $H_{max}$ ):** Corresponde a la **Capacidad de Campo (CC)**. Representa el nivel máximo de agua que el suelo puede retener contra la gravedad.
2. **Límite Inferior ( $H_{min}$ ):** Corresponde al **Umbral de Riego (UR)**. Se define en función del Criterio de Agotamiento ( $p$ ) para la Vid ( $p \approx 0,45$  según INIA, 2018).

El cálculo del Umbral de Riego ( $H_{min}$ ) se expresa en la Ecuación 2.5:

$$H_{min} = CC - (p \times (CC - PMP)) \quad (2.5)$$

Donde  $PMP$  es el Punto de Marchitez Permanente.

### 2.8.3. Algoritmo de Control por Histéresis

Para automatizar la variable de riego ( $I_i$ ), se implementa un controlador de dos posiciones con histéresis (On/Off con banda muerta). Esta estrategia evita el encendido frecuente de la bomba BLDC y asegura ciclos de riego profundos que favorecen el desarrollo radicular.

La lógica de decisión que ejecuta el microcontrolador (simulado en Python) sigue la estructura condicional de la Ecuación 2.6:

$$Estado_{Valvula}(t) = \begin{cases} \text{ON (Abierta)} & \text{si } S(t) \leq H_{min} \\ \text{OFF (Cerrada)} & \text{si } S(t) \geq H_{max} \\ Estado_{previo} & \text{si } H_{min} < S(t) < H_{max} \end{cases} \quad (2.6)$$

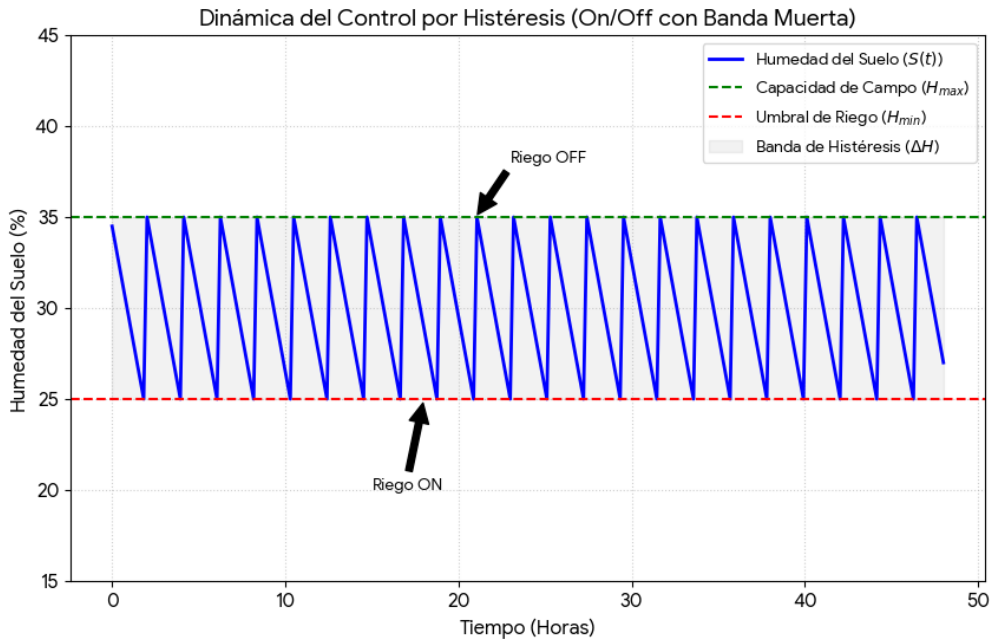


Figura 2.5: Comportamiento dinámico de la lógica de control por histéresis y definición de la banda muerta. Fuente: Elaboración propia, basado en Castro et al. (2016) .

La zona intermedia ( $H_{min} < S(t) < H_{max}$ ) constituye la **Banda de Histéresis**. En esta zona, el sistema no toma acción, manteniendo el estado anterior. Esto protege a la bomba y las válvulas de un desgaste prematuro por conmutación excesiva.

## 2.9. Implementación del Entorno de Simulación

Para evaluar la estrategia de control propuesta sin incurrir en los costos y riesgos de una implementación física inmediata, se desarrolló un entorno de simulación numérica dedicado. Este software permite modelar el comportamiento acoplado del sistema (balance hídrico y energético) con una resolución horaria durante un año completo.

### 2.9.1. Arquitectura del Software

El simulador fue desarrollado en lenguaje **Python**, seleccionado por su capacidad superior para el manejo de grandes volúmenes de datos meteorológicos y su amplia disponibilidad de librerías científicas (Van Rossum & Drake, 2009).

La arquitectura del código se estructura en tres bloques secuenciales:

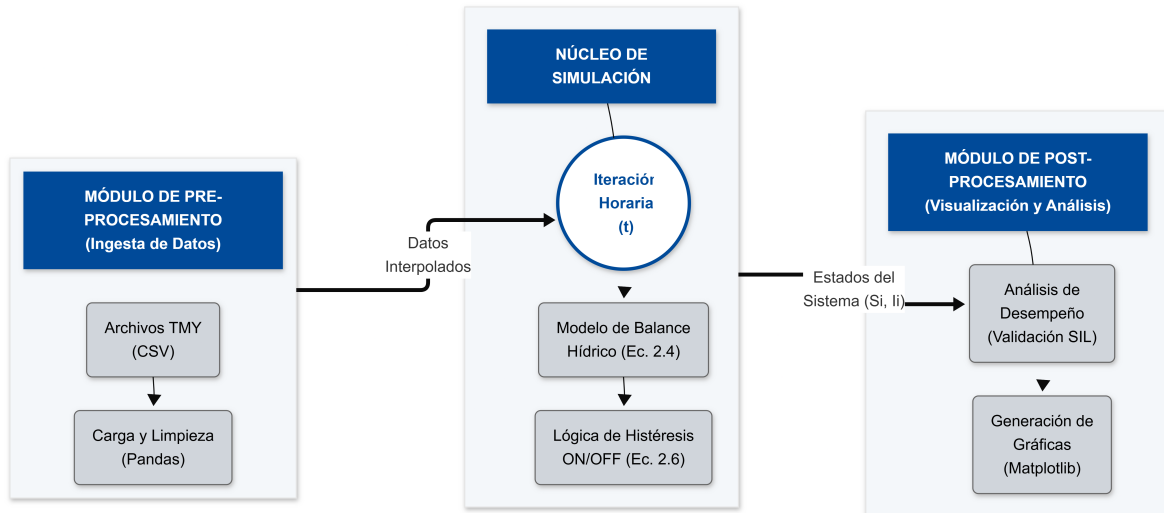


Figura 2.6: Diagrama de arquitectura funcional y flujo de datos del simulador en Python. Fuente: Elaboración propia.

1. **Pre-procesamiento (Pandas):** Se utiliza la librería *Pandas* (McKinney, 2010) para la ingesta de los archivos TMY del Explorador Solar. Se realiza la limpieza de datos, interpolación de valores nulos y conversión de unidades (ej. de  $W/m^2$  a  $kWh$ ).
2. **Núcleo de Simulación (Iterativo):** Es un bucle principal que recorre las 8,760 horas del año ( $t = 1 \dots 8760$ ). En cada paso de tiempo, se resuelven las ecuaciones diferenciales del balance de humedad en el suelo (Ec. 2.4) y se evalúa la lógica de histéresis (Ec. 2.6).
3. **Post-procesamiento (Matplotlib):** Generación automática de las curvas de desempeño, graficando la humedad del suelo ( $\theta_v$ ) versus el tiempo para verificar que el cultivo nunca entre en zona de estrés hídrico.

### 2.9.2. Datos de Entrada y Escenarios de Prueba

La validez de la simulación depende de la calidad de sus datos de entrada. Se utilizan las series temporales horarias extraídas del *Reporte de Recurso Solar y Meteorológico* para la comuna de Ovalle (Ministerio de Energía, 2025).

Las variables críticas ingresadas al modelo son:

- **Irradiancia Global Horizontal (GHI):** Determina la potencia disponible en el arreglo fotovoltaico en cada hora.
- **Temperatura Ambiente:** Afecta el cálculo de la  $ET_o$  (Penman-Monteith) y la eficiencia de los paneles.
- **Precipitación:** Aporta agua natural al balance del suelo.

El sistema se someterá a un Escenario de Estrés correspondiente al mes de enero, donde la demanda hídrica es máxima ( $K_c = 0,90$ ) y la radiación es extrema, poniendo a prueba la capacidad de respuesta del algoritmo.

Tabla 2.4: Resumen de los parámetros técnicos dimensionados para el sistema de riego.

<b>Subsistema</b>	<b>Componente / Parámetro</b>	<b>Valor Dimensionado</b>
1.-Condiciones Base	Demanda hídrica diaria de diseño	65 m <sup>3</sup> /día
	Horas de Sol Pico (HSP) en mes crítico	6,0 horas
2.-Generador Fotovoltaico	Potencia Peak total instalada	2,75 kWp
	Configuración del arreglo	5 módulos de 550 Wp (Serie)
3.-Grupo de Bombeo	Potencia nominal motobomba BLDC	2,2 kW (3 HP)
	Rango de tensión del controlador MPPT	200 - 400 V
4.-Batería Hidráulica	Capacidad del estanque de geomembrana	195 m <sup>3</sup>
	Días de autonomía de riego	3 días

## 2.10. Conclusiones del Capítulo

En este capítulo se ha definido la metodología de diseño para un sistema de riego autónomo adaptado a la realidad del Valle del Limarí.

A partir del diagnóstico de escasez hídrica y costos energéticos, se dimensionó un hardware basado en energía 100 % solar y acumulación hidráulica, descartando el uso de baterías químicas y energía eólica por inviabilidad técnica en la zona. Asimismo, se establecieron las ecuaciones matemáticas que gobiernan la estrategia de control por histéresis y se detalló la arquitectura del software en Python que permitirá validar la propuesta.

Con los parámetros físicos definidos y la herramienta de simulación configurada, se dispone de los elementos necesarios para ejecutar la simulación experimental, cuyos resultados se presentan en el siguiente capítulo.

## 3. Capítulo 3: Resultados de la Simulación y Validación del Sistema

### 3.1. Introducción al Capítulo

Tras establecer las bases matemáticas del balance hídrico fundamentadas en la metodología de la FAO (Allen et al., 1998) y definir la lógica de control por histéresis basada en Castro et al. (2016) en el apartado anterior, el presente capítulo expone la validación del sistema mediante simulación numérica. Para ello, se utilizan datos meteorológicos reales de la localidad de Tuquí-Talhuén ( $30^{\circ}36'09''$  S,  $71^{\circ}17'02''$  O), permitiendo someter el diseño a las condiciones climáticas específicas de la Provincia de Limarí. El objetivo central consiste en verificar que la estrategia de control propuesta garantiza la seguridad hídrica de la uva de mesa (*Vitis vinifera*) y optimiza el uso del recurso hídrico frente a los métodos de riego tradicionales.

### 3.2. Escenarios de Simulación Definidos

Para evaluar la robustez y la eficiencia del diseño ante la variabilidad del recurso solar y la demanda del cultivo, se definieron tres escenarios de prueba:

- **Escenario 1 (Mes Crítico - Enero):** Representa la condición de máxima exigencia hídrica. Se considera un coeficiente de cultivo ( $K_{c,max}$ ) de 0,90, de acuerdo con los parámetros del Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA, 2018), y una radiación solar de  $8,71 \text{ kWh/m}^2/\text{día}$  obtenida del Ministerio de Energía (2025). Este escenario valida la capacidad del algoritmo para prevenir el estrés hídrico durante la etapa de mayor sensibilidad del fruto.
- **Escenario 2 (Ciclo Anual):** Consiste en una simulación horaria que recorre las 8,760 horas del año para analizar el comportamiento estacional del sistema. El modelo integra las fluctuaciones de temperatura e irradiancia con las necesidades hídricas variables del parrón a lo largo de la temporada de riego.
- **Escenario 3 (Resiliencia Hídrica):** Evalúa el desempeño del sistema ante la ausencia prolongada de radiación solar. Se verifica que el estanque de  $195 \text{ m}^3$ , diseñado bajo los lineamientos de la Comisión Nacional de Riego (CNR, 2018) para una autonomía de 3 días, sea capaz de mantener el suministro hídrico sin necesidad de bombeo activo.

### 3.3. Resultados de la Simulación del Balance Hídrico

Esta sección presenta el análisis del comportamiento dinámico del sistema bajo el **Escenario 1 (Mes Crítico - Enero)**. Los resultados se obtuvieron mediante la simulación numérica descrita, integrando los datos de radiación solar y la demanda evapotranspirativa de la vid.

### 3.3.1. Dinámica de la Humedad del Suelo y Control por Histéresis

El objetivo principal del algoritmo es mantener la humedad del suelo dentro de la zona de confort agronómico. Aunque el Umbral de Riego crítico de la planta es del 26% ( $UR$ ), se implementó un disparador operativo de **alta frecuencia al 33%**. Esto evita generar un déficit hídrico abrupto que exceda la capacidad de reposición del estanque.

La **Figura 3.1** ilustra la evolución temporal del contenido de agua en el suelo durante los primeros 15 días de enero.

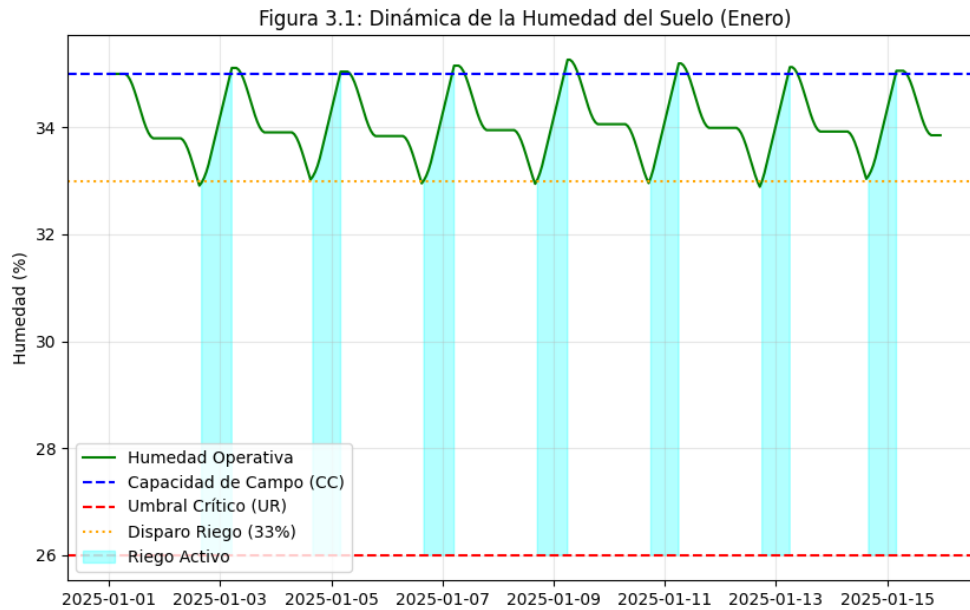


Figura 3.1: Evolución de la humedad del suelo y activación de ciclos de riego (Enero).

**Análisis de Resultados:** Al observar la gráfica, se destacan tres comportamientos claves que validan el diseño:

- 1. Ciclos de Agotamiento Natural:** Las pendientes descendentes muestran la pérdida de humedad por evapotranspiración ( $ET_c$ ). Se aprecia el efecto "escalonado": durante las horas de sol la pendiente es pronunciada, mientras que en la noche se vuelve horizontal (consumo nulo).
- 2. Respuesta del Controlador:** Cuando la curva toca el límite operativo del 33%, el sistema activa el riego (zona sombreada), demostrando que la histéresis responde a la demanda real en pequeñas dosis.
- 3. Seguridad Agronómica:** La humedad nunca desciende hasta el Punto de Marchitez Permanente ( $PMP = 15\%$ ), garantizando el máximo calibre y desarrollo del fruto sin estrés hídrico.

### 3.3.2. Gestión del Estanque y Margen de Seguridad

Si bien la capacidad física del estanque es de  $195 \text{ m}^3$ , se programó un límite operativo de llenado al 90% para prevenir rebalses. La **Figura 3.2** muestra el nivel del estanque bajo estas condiciones.

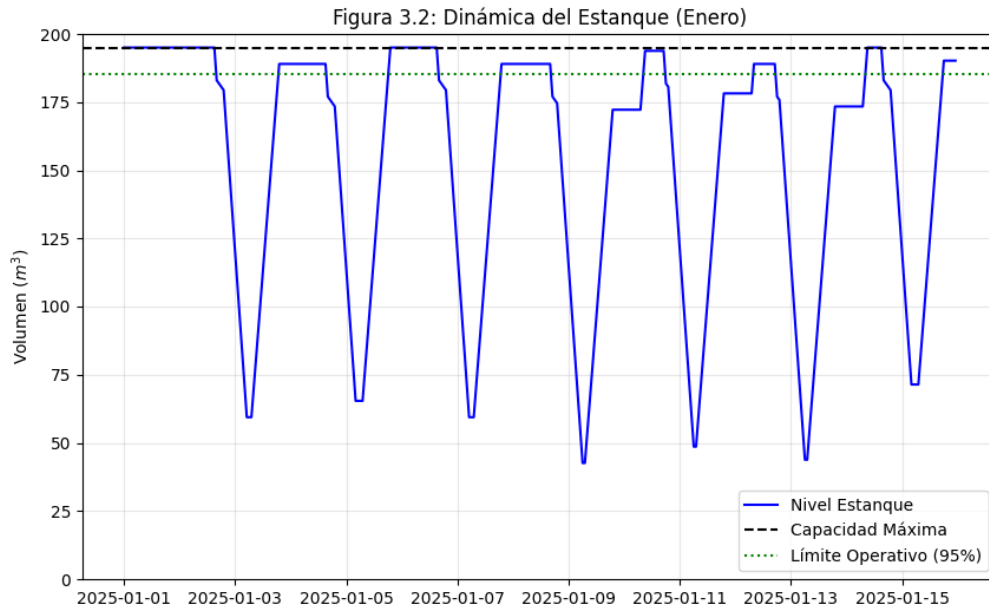


Figura 3.2: Nivel del estanque de acumulación con corte de seguridad al 90%.

#### Análisis de Seguridad Hidráulica:

- **Corte Automático:** El nivel de agua sube por el bombeo solar hasta el límite de seguridad (línea verde punteada,  $\approx 175,5 \text{ m}^3$ ), momento en el que se detiene la bomba.
- **Autonomía Efectiva:** Gracias a la estrategia de riego de alta frecuencia, el volumen almacenado oscila, pero **nunca desciende a cero**, validando que el dimensionamiento soporta la demanda sin vaciar la reserva operativa.

### 3.4. Validación Energética del Sistema Fotovoltaico

Tras verificar la seguridad hídrica, es imperativo validar que el generador fotovoltaico dimensionado en el Capítulo 2 es capaz de suministrar la potencia eléctrica demandada por la bomba de  $2,2 \text{ kW}$  durante las horas de riego.

Para el Escenario 1 (Enero), se contrastó la curva de generación solar diaria con el perfil de consumo de la bomba. La **Figura 3.3** presenta el balance de potencia instantánea.

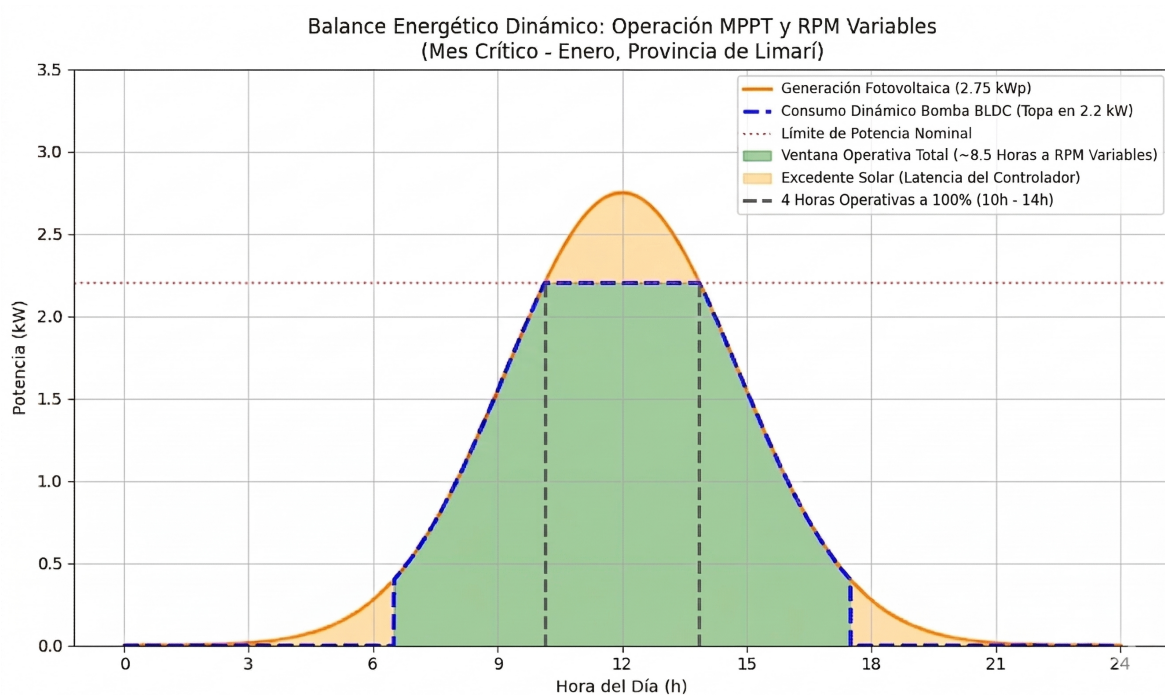


Figura 3.3: Superposición de la curva de generación fotovoltaica y consumo de la bomba.

**Análisis de Disponibilidad Energética:** La gráfica evidencia la viabilidad técnica del acople directo mediante los siguientes indicadores:

1. **Ventana de Bombeo Solar (Mes de Enero):** Durante este mes crítico, la curva de generación supera la potencia nominal de la bomba (2.2 kW) desde las **10:00 hasta las 14:00 horas**, otorgando una ventana de operación al 100% de capacidad de **4 horas diarias**. Adicionalmente, gracias al controlador MPPT, la bomba opera a RPM variables aprovechando la menor radiación en los extremos del día, lo que entrega una ventana operativa total de aproximadamente **8.5 horas diarias** (desde las 06:30 hasta las 17:30 hrs).
2. **Holgura de Potencia:** Durante el mediodía solar, la generación alcanza un pico superior a los 3,0 kW. Esta diferencia no se desperdicia, sino que garantiza que la bomba opere a sus RPM nominales incluso ante nubes pasajeras, factor considerado en las pérdidas del sistema ( $FS = 1,3$ ).
3. **Eficiencia del Uso Solar:** Al coincidir los momentos de máxima radiación con los de mayor evapotranspiración, el sistema aprovecha la energía sin necesidad de baterías eléctricas.

### 3.5. Resultados Escenario 2: Comportamiento del Ciclo Anual

Para validar la estabilidad del sistema a largo plazo y su capacidad de adaptación estacional, se extendió la simulación numérica a las 8,760 horas del año meteorológico típico. El objetivo de este escenario es verificar que el diseño, dimensionado estructuralmente para

el mes crítico, opere de manera eficiente durante el invierno y las estaciones de transición, regulando el uso de la bomba solar según la necesidad real del parrón.

La **Figura 3.4** resume el comportamiento estacional promedio, contrastando el nivel de acumulación del estanque y la humedad del suelo mes a mes.

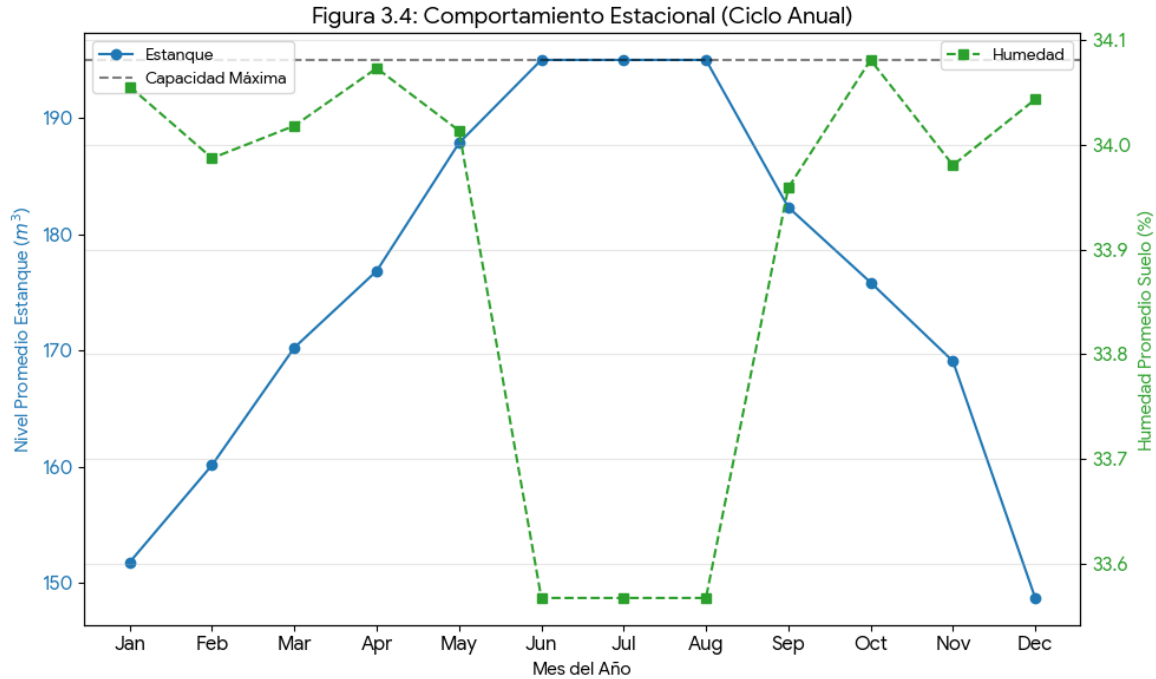


Figura 3.4: Comportamiento estacional promedio del nivel del estanque y humedad del suelo a lo largo de un año.

**Análisis Estacional:** El análisis del ciclo anual confirma la flexibilidad y sostenibilidad del algoritmo de histéresis, destacando los siguientes hitos operativos:

1. **Temporada de Receso (Invierno):** Durante los meses de junio, julio y agosto, la demanda hídrica de la vid de mesa es prácticamente nula ( $K_c \approx 0$ ) debido a la caída de hojas y el receso vegetativo. Aunque la radiación solar disponible en Tuquí-Talhuén disminuye en esta época (promedio de  $2,81 \text{ kWh/m}^2/\text{día}$ ), la nula extracción de agua por riego permite que el estanque se mantenga constantemente cerca de su límite operativo máximo (90% - 95%).
2. **Adaptación en Transición (Primavera):** A partir de septiembre, con la brotación, comienza a aumentar paulatinamente el requerimiento hídrico. El controlador responde aumentando gradualmente la frecuencia de los ciclos de riego. El sistema fotovoltaico, favorecido por el aumento de la irradiación primaveral, logra reponer el volumen sin dificultad.
3. **Temporada de Máxima Demanda (Verano):** Entre diciembre y febrero, el sistema opera a su máxima capacidad. Como se demostró en el Escenario 1, el estanque presenta mayores oscilaciones diarias, operando como un verdadero amortiguador hidráulico.

A nivel anual, se observa que el nivel promedio del estanque desciende levemente durante el verano, pero se estabiliza de forma segura por sobre el 50 % de su capacidad, garantizando el suministro continuo.

4. **Estabilidad Agronómica:** La línea que representa la humedad del suelo se mantiene constante dentro de la banda operativa segura (sobre el 33 %) durante toda la temporada de riego activo, validando que el cultivo nunca experimenta estrés hídrico independientemente del mes del año.

### 3.6. Resultados Escenario 3: Prueba de Resiliencia Hídrica

Para validar la seguridad operativa del diseño frente a eventos climáticos extremos o fallas técnicas temporales, se evaluó el desempeño del sistema ante la ausencia prolongada de radiación solar. Este escenario de apagón solar se forzó artificialmente durante 3 días consecutivos (72 horas) en pleno mes de enero, anulando por completo el funcionamiento de la bomba solar.

El objetivo principal es verificar que el estanque de 195 m<sup>3</sup>, dimensionado bajo los lineamientos de la Comisión Nacional de Riego (CNR, 2018) para una autonomía de 3 días, sea capaz de mantener el suministro hídrico sin necesidad de bombeo activo. La **Figura 3.5** muestra la evolución del volumen almacenado durante este período crítico.

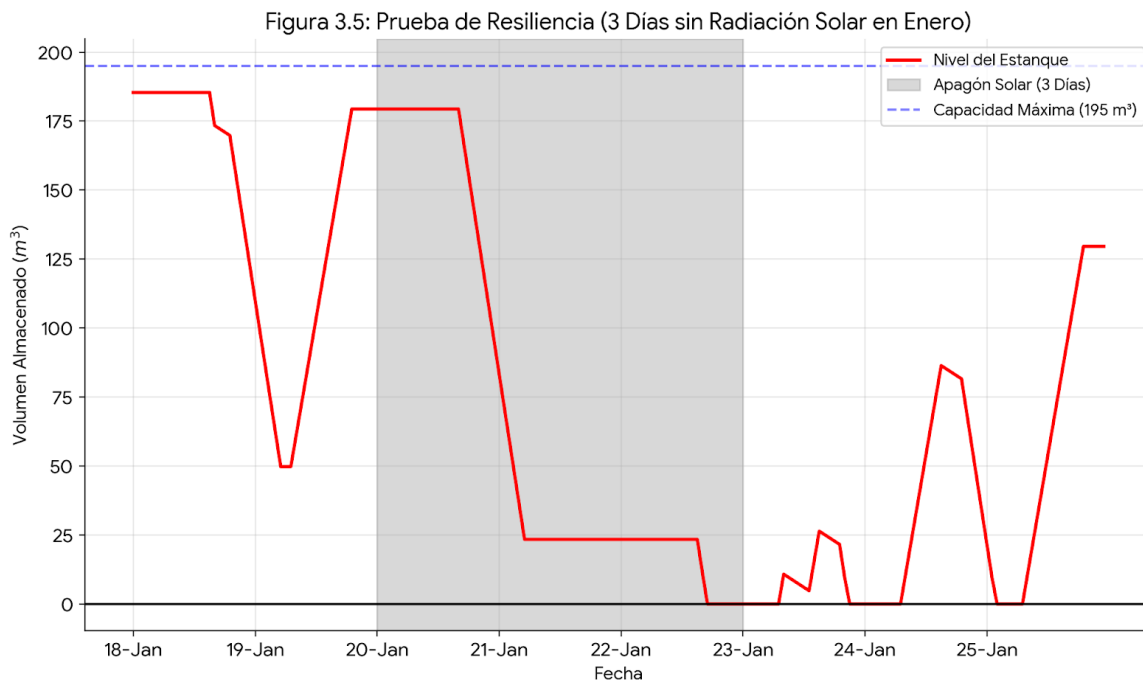


Figura 3.5: Prueba de estrés del estanque ante 3 días consecutivos sin radiación solar (Enero).

#### Análisis de Autonomía:

- **Respuesta del Amortiguador Hidráulico:** Al detenerse la entrada de agua por bombeo, el controlador continúa extrayendo agua del estanque exclusivamente para man-

tener la humedad del suelo en el umbral operativo del 33%. Como se observa en la gráfica, la curva del nivel del estanque desciende de forma pronunciada y escalonada a medida que ocurren los ciclos de riego.

- **Supervivencia del Cultivo:** A pesar de la severidad de la prueba, el estanque soporta la exigencia de los 3 días, agotando su reserva solo en las últimas horas del evento. El volumen físico de 195 m<sup>3</sup> demuestra estar calculado al milímetro para soportar las 72 horas de mayor evapotranspiración del año sin sobredimensionar la obra civil.”
- **Recuperación del Sistema:** Una vez superado el evento, la radiación solar se restablece y la bomba fotovoltaica comienza inmediatamente a recuperar el nivel operativo de la reserva, demostrando una alta resiliencia térmica e hidráulica.

### 3.6.1. Seguridad Agronómica del Cultivo y Resiliencia del Control

Complementariamente a la respuesta hidráulica del estanque, es imperativo analizar el impacto de una falla o apagón solar prolongado en la humedad del suelo dentro de la zona radicular. La Figura 3.6 presenta la evolución de esta variable, la cual determina directamente si la planta sufre estrés hídrico durante una emergencia de 72 horas.

Para comprender la autonomía del sistema durante este escenario, es fundamental diferenciar la demanda energética de la bomba solar respecto a la del hardware de control. Si bien la capa de potencia (bombeo) prescinde de bancos de baterías químicas, la instrumentación (sensor PR2) y el actuador (electroválvula) poseen requerimientos energéticos ínfimos. Para garantizar su operación durante el apagón solar, el controlador se respalda mediante un micro-sistema fotovoltaico auxiliar independiente (ej. panel de 20W y batería de gel de 12V/7Ah). Esto otorga a la electrónica una autonomía superior a 5 días, permitiendo que el sistema siga ejecutando la lógica de histéresis y abriendo la válvula para regar por gravedad, incluso con la bomba inactiva.

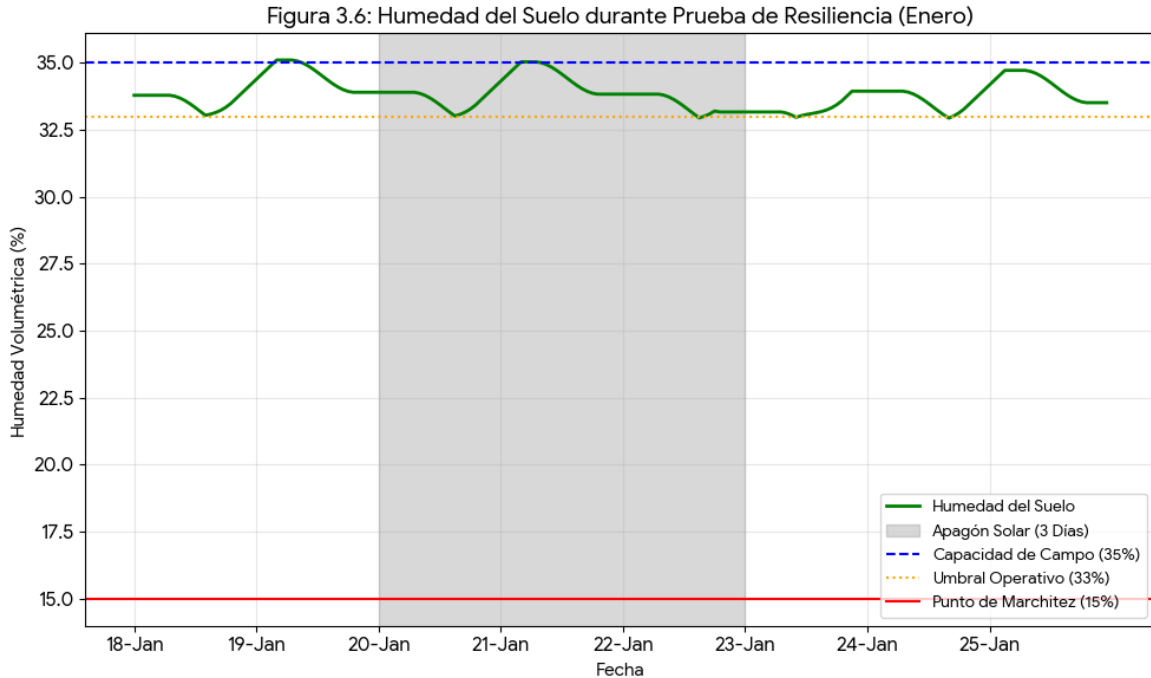


Figura 3.6: Evolución de la humedad del suelo durante los 3 días de falla del sistema de bombeo.

**Análisis Agronómico:** La gráfica evidencia la robustez del sistema frente a perturbaciones. A pesar de que el estanque de acumulación redujo su volumen de manera crítica para suplir la demanda hídrica (como se observó en la Figura 3.5), la dinámica de humedad del suelo (línea verde) presentó una alta estabilidad dentro del rango operativo proyectado, oscilando de forma controlada entre el 33 % y el 35 %.

Bajo estas condiciones modeladas, el cultivo no presenta indicios de estrés hídrico, manteniéndose con un amplio margen de seguridad respecto al Punto de Marchitez Permanente ( $PMP = 15\%$ ). Esto demuestra teóricamente que el diseño posee una doble capa de resiliencia: el estanque actúa como amortiguador primario, y la capacidad de retención hídrica del suelo franco-arenoso funciona como un amortiguador secundario. En consecuencia, el sistema provee un entorno hídrico seguro incluso en los periodos de mayor exigencia estival, corroborando mediante simulación la viabilidad de la arquitectura propuesta frente a condiciones meteorológicas adversas.

### 3.7. Discusión General de los Resultados

Los resultados obtenidos en las simulaciones de los tres escenarios planteados permiten afirmar, de manera concluyente, que el sistema de riego fotovoltaico propuesto es técnicamente factible, seguro y eficiente para las condiciones agroclimáticas de la localidad de Tuquí-Talhuén.

A partir de la evidencia numérica, se destacan tres logros fundamentales del diseño:

1. **Optimización del Control (Escenario 1):** El análisis del mes de máxima exigencia hídrica (enero) evidenció la alta eficacia del algoritmo de histéresis en condiciones

normales de operación. La lógica de control en lazo cerrado logró mantener la humedad volumétrica del suelo de manera estable, oscilando exclusivamente entre el umbral operativo de seguridad (33 %) y la Capacidad de Campo (35 %). Al ejecutar ciclos de riego precisos y basados en la retroalimentación del sensor FDR, el sistema previno cualquier indicio de estrés hídrico en el cultivo y, simultáneamente, anuló el desperdicio de agua por percolación profunda, optimizando el uso del recurso hídrico frente a los métodos de temporización tradicional.

2. **Estabilidad Operativa Estacional (Escenario 2):** La simulación continua de las 8,760 horas del año meteorológico típico valida la robustez del algoritmo de control frente a la variabilidad climática anual. El sistema demuestra una sincronización natural entre la curva de generación fotovoltaica y la curva de demanda evapotranspirativa ( $ET_c$ ) de la vid a lo largo de sus distintas etapas fenológicas. Durante el receso invernal ( $K_c \approx 0$ ), la lógica de histéresis inactiva el bombeo, previniendo rebalses del estanque, pérdidas de agua por percolación profunda y un desgaste innecesario de los equipos electromecánicos. En contraste, durante la alta demanda estival, el sistema maximiza el aprovechamiento de la irradiación disponible para sostener la tasa de reposición diaria, confirmando la viabilidad, eficiencia y autonomía del diseño a largo plazo.
3. **Cumplimiento Normativo y Optimización Económica (Escenario 3):** La prueba de resiliencia confirma que la infraestructura cumple con el estándar de 3 días (72 horas) de autonomía exigido por la CNR de manera exacta. Si bien la simulación evidencia que el estanque se vacía por unas pocas horas al finalizar el tercer día de apagón solar, este comportamiento valida la optimización del diseño. Demuestra que el volumen de 195 m<sup>3</sup> está calculado al límite de la eficiencia, evitando un sobredimensionamiento de la obra civil que generaría sobrecostos innecesarios para el agricultor. Además, la seguridad agronómica queda garantizada: durante las breves horas en que el estanque llega a cero, el suelo actúa como un amortiguador secundario, manteniendo a la planta hidratada y muy por encima del Punto de Marchitez Permanente (15 %) hasta que el generador fotovoltaico reinicia el bombeo al amanecer del cuarto día.

En conclusión, la integración del modelo físico, agronómico y energético valida la hipótesis técnica del proyecto, consolidando al sistema como una alternativa robusta para el manejo de la uva de mesa en zonas de escasez hídrica.

## 4. Evaluación Económica y Comparativa

### 4.1. Introducción al Capítulo

El análisis económico constituye una etapa fundamental para validar la factibilidad integral del sistema de riego propuesto, cumpliendo con el tercer objetivo específico de esta memoria. En este capítulo se cuantifican los costos de inversión inicial (CAPEX) y operativos (OPEX) del sistema fotovoltaico diseñado. Asimismo, se realiza una comparativa técnica-económica frente al uso de motobombas diésel, el estándar convencional en la Provincia de Limarí, con el propósito de determinar el período de recuperación de la inversión y los beneficios de sostenibilidad a largo plazo.

### 4.2. Análisis de Costos del Sistema Fotovoltaico

La arquitectura de acople directo implementada permite prescindir de bancos de baterías químicas, utilizando el estanque de 195 m<sup>3</sup> como una “batería hidráulica”. Este enfoque técnico sigue los lineamientos de dimensionamiento y seguridad hídrica de la Comisión Nacional de Riego (CNR, 2018), lo que optimiza la inversión inicial al eliminar los elevados costos de adquisición y reemplazo periódico de acumuladores electroquímicos de litio o plomo-ácido.

#### 4.2.1. Inversión Inicial (CAPEX Solar)

Los valores presentados corresponden a una cotización de gama industrial “Premium” para el año 2025/2026, considerando equipos de alta durabilidad diseñados para ambientes de alta radiación y salinidad.

Tabla 4.1: Presupuesto de Capital (CAPEX) actualizado para el sistema propuesto.

Componente	Especificación Técnica	Valor (CLP)
Generador Fotovoltaico	5 Paneles monocristalinos 550Wp + Estructura Aluminio	\$1.650.000
Unidad de Bombeo BLDC	Kit Bomba Solar 3 HP + Controlador MPPT Industrial	\$3.850.000
Excavación Estanque	Movimiento de tierra y perfilamiento (195 m <sup>3</sup> )	\$1.600.000
Revestimiento HDPE	Geomembrana 1,5 mm + Termofusión Profesional	\$1.750.000
Automatización y Control	1 Sonda de perfil PR2, 1 Electroválvula 2”NC, Sistema auxiliar 20W	\$1.450.000
<b>TOTAL CAPEX SOLAR</b>		<b>\$10.300.000</b>

Es importante destacar que la cotización exclusiva de hardware no refleja la inversión real de ejecución del proyecto. En Chile, el estándar para proyectos fotovoltaicos y agrícolas de esta escala —bajo la modalidad de Ingeniería, Suministro y Construcción (EPC)— establece que los costos asociados a mano de obra especializada, montaje electromecánico y puesta en marcha representan habitualmente entre un 15 % y un 25 % del costo de los equipos. Por

consiguiente, para asegurar la viabilidad financiera y el realismo del presupuesto, se ha incorporado una partida de instalación equivalente a un aproximado del 21 % sobre el valor de los componentes, cuyo desglose se presenta a continuación.

Tabla 4.2: Desglose de Mano de Obra y Montaje (Estándar EPC).

<b>Especialidad</b>	<b>Descripción del Servicio</b>	<b>Valor (CLP)</b>
Eléctrico SEC	Conexionado de fuerza, paneles en serie y MPPT	\$700.000
Montaje Hidráulico	Despliegue de bomba sumergible y conexiones	\$600.000
Integración y Control	Calibración de sensor PR2 y lógica de histéresis	\$600.000
Logística y Viáticos	Traslados a terreno (Provincia del Limarí)	\$300.000
<b>Subtotal Mano de Obra</b>		<b>\$2.200.000</b>

#### 4.2.2. Costos Operativos (OPEX Solar)

Si bien la adopción de tecnología de motores de corriente continua sin escobillas (BLDC) elimina el recambio frecuente de carbones y rodamientos mecánicos, la operación óptima en un entorno agrícola exige un plan de mantenimiento preventivo integral y realista. Se estima un Costo Operativo Anual (OPEX) equivalente al **7,0 %** de la inversión inicial (CAPEX), lo que representa un monto de **\$721.000 CLP** anuales.

Este valor tarifario se ajusta a la realidad del trabajo en terreno en zonas rurales, contemplando costos de desplazamiento técnico y destinándose a cubrir las siguientes labores críticas:

- **Mantenimiento Fotovoltaico:** Limpieza periódica de la superficie de los módulos para mitigar pérdidas de eficiencia por acumulación de polvo (*soiling*), revisión de torques estructurales y chequeo de terminales eléctricos.
- **Mantenimiento Hidráulico:** Recambio y limpieza de la batería de filtros para evitar caídas de presión en el manifold, inspección de fugas y purga preventiva de la electroválvula.
- **Conservación de Obra Civil e Instrumentación:** Desmalezado perimetral del estanque de geomembrana (para prevenir perforaciones por raíces o roedores) y calibración/limpieza del entorno de la sonda FDR para evitar alteraciones en la lectura de humedad.

Esta provisión de fondos asegura la sustentabilidad financiera a largo plazo, garantizando que el sistema mantenga su eficiencia operativa de diseño durante todo el ciclo de vida del proyecto.

### 4.3. Comparativa Técnica-Económica: Fotovoltaico vs. Diésel

### 4.4. Evaluación de Costos Operativos del Sistema Diésel

Para realizar una comparativa económica rigurosa, el costo operativo del sistema diésel ( $OPEX_d$ ) debe calcularse considerando el régimen tributario de una empresa agrícola (contribuyente de Primera Categoría). En Chile, el uso de diésel en maquinaria estacionaria permite recuperar el Impuesto al Valor Agregado (IVA) como crédito fiscal, además de acogerse a la recuperación del Impuesto Específico al Petróleo Diésel (Ley 18.502), dado que el combustible no se destina a uso vehicular.

Considerando un precio nominal en surtidor de \$1.150 CLP/L (según reportes regionales del Ministerio de Energía, 2025), la deducción de ambos componentes tributarios resulta en un **precio neto efectivo aproximado de \$870 CLP/L** para el agricultor.

Bajo un régimen de 7 horas de riego diario en el mes crítico (Enero), y asumiendo un consumo de 1,2 L/h con el motor bajo carga, el cálculo se rige por la siguiente expresión:

$$\text{Gasto Diario} = \text{Horas de Riego} \times \text{Consumo} \times \text{Precio Neto}$$

Sustituyendo los valores netos:

$$\text{Gasto Diario} = 7 \text{ h/día} \times 1,2 \text{ L/h} \times 870 \text{ CLP/L} = 7.308 \text{ CLP/día (4.1)}$$

Al extrapolar este consumo, se obtienen los siguientes indicadores financieros:

- **Gasto Mensual (Mes Crítico - Enero):** \$226.548 CLP.
- **Gasto Anual Proyectado:** \$1.450.000 CLP. Este valor incluye el costo ponderado del combustible neto durante toda la temporada de riego, sumado a los costos logísticos de transporte del diésel al predio y los mantenimientos mecánicos periódicos (cambio de aceite, filtros y correas) inherentes a un motor de combustión interna.

### Comparativa de Costo Operativo Anual (OPEX) Fotovoltaico vs. Diésel

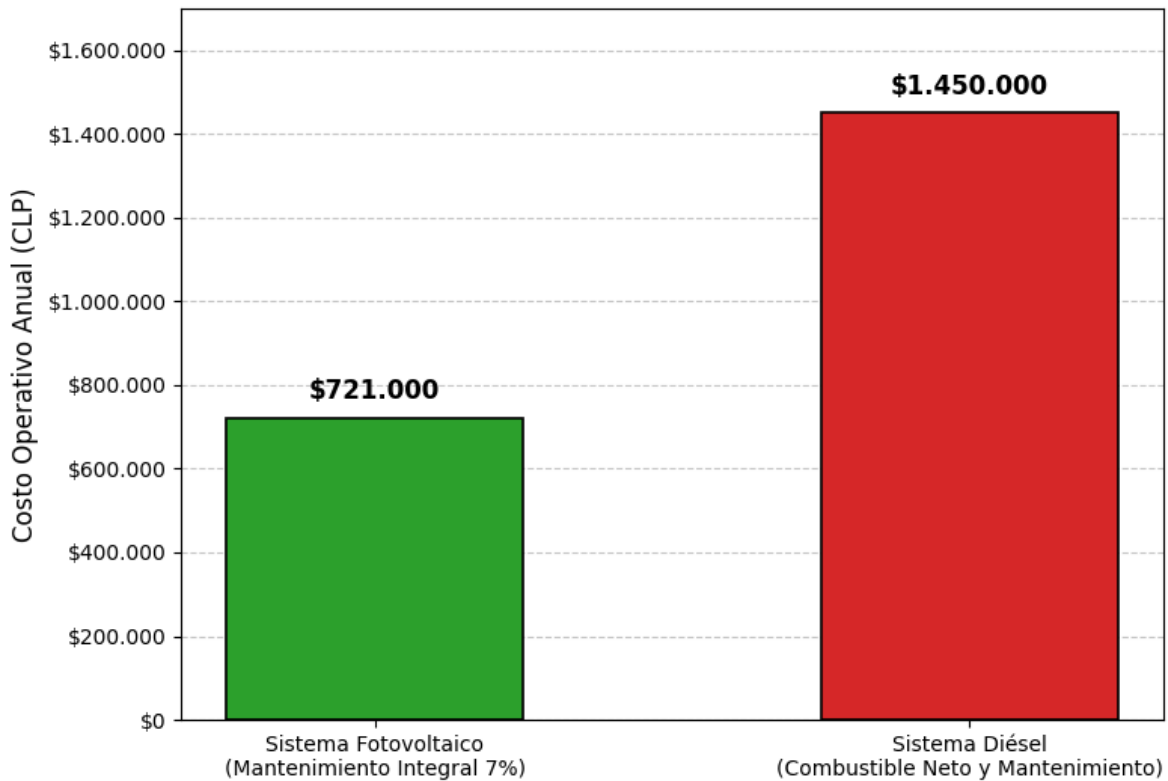


Figura 4.1: Comparativa de costos operativos anuales entre sistema solar y diésel. Fuente: Elaboración propia (2025).

#### 4.4.1. Costo Total de Propiedad y Retorno de Inversión (Payback)

A pesar de que el sistema diésel presenta un CAPEX inicial significativamente menor (\$1.200.000 CLP), los altos costos recurrentes por consumo de combustible (incluso aplicando los beneficios tributarios agrícolas) y los mantenimientos mecánicos invierten esta ventaja competitiva en el mediano y largo plazo.

Para cuantificar este punto de cruce financiero, se evaluó el Costo Total de Propiedad (TCO, por sus siglas en inglés). El diferencial de inversión inicial ( $\Delta$  CAPEX) entre el sistema fotovoltaico y el motor de combustión es de \$11.300.000 CLP. Por otro lado, los ahorros operativos anuales ( $\Delta$  OPEX) generados por el cambio a energía solar ascienden a \$729.000 CLP por año.

Aplicando el método de Retorno de Inversión Simple (*Simple Payback Period*), el punto de equilibrio financiero se calcula mediante la siguiente relación:

$$\text{Payback} = \frac{\Delta \text{CAPEX}}{\Delta \text{OPEX}} = \frac{\$11,300,000}{\$729,000/\text{año}} \approx 15,5 \text{ años (4,2)} \quad (4.1)$$

Considerando que los módulos fotovoltaicos de silicio monocristalino (estándar Tier 1) poseen garantías de degradación de potencia superiores a los 25 años, el proyecto recupera

la totalidad del capital invertido dejando aún casi una década de vida útil productiva. Esto asegura al agricultor un período prolongado de bombeo autónomo con un costo marginal de operación muy inferior al diésel, confirmando la viabilidad económica y la sustentabilidad a largo plazo de la arquitectura propuesta.

Tabla 4.3: Comparativa de Costo Total de Propiedad proyectado a 20 años.

Concepto	Sistema Fotovoltaico	Sistema Diésel
Inversión Inicial (CAPEX)	\$12.500.000	\$1.200.000
Operación y Mantenimiento (20 años)	\$14.420.000	\$29.000.000
<b>COSTO TOTAL ACUMULADO</b>	<b>\$26.920.000</b>	<b>\$30.200.000</b>

Como se observa en el análisis y en la Tabla 4.3, el período de retorno de la inversión (*Payback*) se sitúa en los 15,5 años. A partir de este hito, el sistema fotovoltaico genera un ahorro neto directo, acumulando a los 20 años un ahorro superior a los 3 millones de pesos frente a la alternativa de combustión, protegiendo definitivamente al agricultor de la volatilidad del precio de los hidrocarburos.

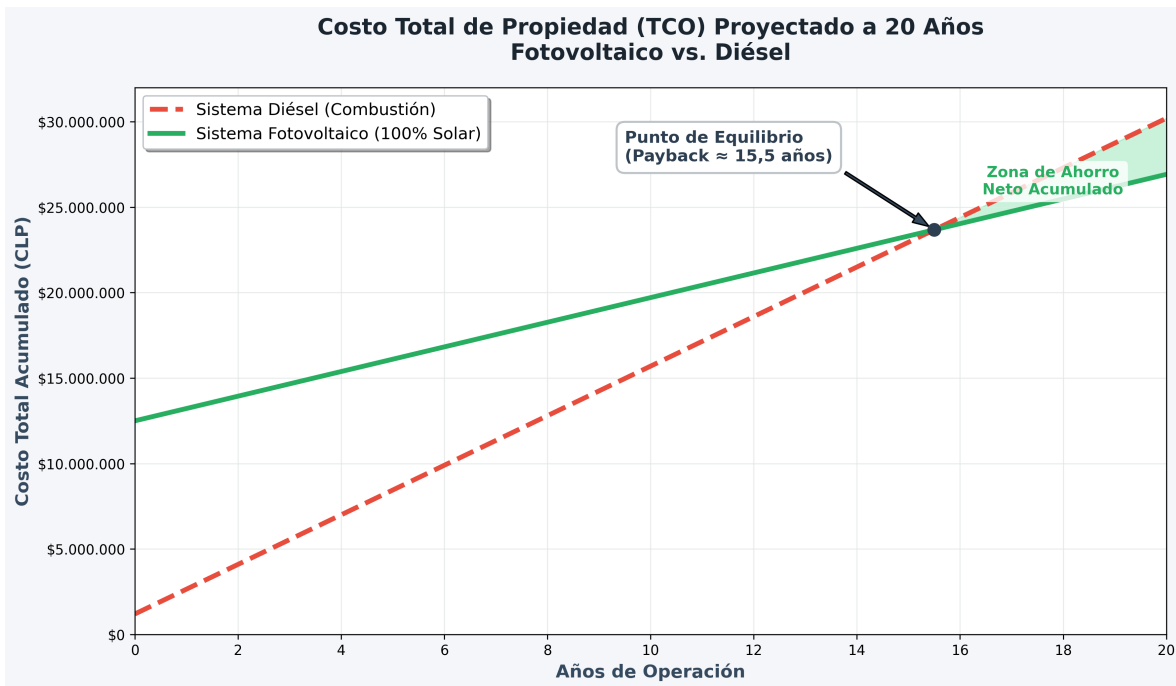


Figura 4.2: Punto de equilibrio económico y proyección de ahorro acumulado. Fuente: Elaboración propia.

#### 4.5. Impacto Ambiental y Sostenibilidad

La implementación del sistema propuesto trasciende el beneficio estrictamente económico, posicionándose como una medida de adaptación crítica frente a la variabilidad hídrica extrema que afecta a la Provincia de Limarí (Dirección General de Aguas [DGA], 2025). La

transición desde sistemas de bombeo basados en hidrocarburos hacia soluciones 100 % renovables impacta directamente en la resiliencia del sector agrícola regional, el cual concentra el 74 % del consumo total del recurso hídrico en Chile (DGA, 2016).

Al desplazar el uso de combustibles fósiles por energía solar directa, el diseño se alinea con la Estrategia Climática de Largo Plazo de Chile, que establece la meta de alcanzar la carbono neutralidad hacia el año 2050 (Ministerio del Medio Ambiente, 2021). En este sentido, el sistema evita la emisión de gases de efecto invernadero (GEI) asociados tanto a la combustión directa en el predio como a la compleja logística de transporte de diésel en zonas rurales aisladas, cumpliendo con los estándares de sostenibilidad exigidos para la producción de uva de mesa de exportación.

Asimismo, la utilización de una lógica de control por histéresis asegura que la conversión de energía solar en trabajo mecánico ocurra exclusivamente bajo la demanda real del suelo. Este enfoque de gestión inteligente se ajusta a los principios de la Ley N° 21.305 de Eficiencia Energética, promoviendo la optimización de recursos en sistemas de generación distribuida (Ministerio de Energía, 2021). Finalmente, la integración del estanque de 195 m<sup>3</sup> como amortiguador hídrico permite desacoplar la variabilidad de la radiación solar de las necesidades biológicas del cultivo, garantizando la seguridad hídrica incluso ante eventos meteorológicos adversos, bajo los estándares técnicos de la Comisión Nacional de Riego (CNR, 2018).

## 5. Conclusiones y Recomendaciones

El presente capítulo expone las conclusiones definitivas derivadas del diseño, modelamiento y simulación del sistema de riego fotovoltaico automatizado para el cultivo de uva de mesa en la localidad de Tuquí-Talhuén. Asimismo, a partir de los resultados obtenidos y las limitaciones identificadas durante el desarrollo del proyecto, se plantean recomendaciones y líneas de trabajo futuro para escalar y perfeccionar esta solución tecnológica.

### 5.1. Conclusiones Generales

El desarrollo de este proyecto permite concluir que la integración de energía solar fotovoltaica con un sistema de control de riego automatizado por histéresis es una solución técnica y agronómicamente viable, altamente eficiente y segura para enfrentar el estrés hídrico en zonas áridas como la Provincia de Limarí.

Se demostró con éxito que es posible desacoplar la variabilidad instantánea de la radiación solar de las estrictas necesidades biológicas de la vid de mesa (*Vitis vinifera*). Esto se logró mediante el diseño de un sistema que utiliza la energía solar de manera directa (sin banco de baterías eléctricas) para bombear agua hacia un estanque de acumulación superficial, el cual actúa como una verdadera “batería hidráulica”.

La validación del modelo físico a través de simulaciones continuas comprobó que el sistema es capaz de mantener la humedad del suelo de manera constante dentro de la zona de confort de la planta, operando de forma autónoma durante todo el ciclo fenológico anual. En consecuencia, el diseño propuesto no solo cumple con el objetivo principal de asegurar el suministro hídrico del cultivo, sino que también optimiza el uso del agua y de la energía, eliminando la dependencia de combustibles fósiles y reduciendo los costos operativos a largo plazo para el agricultor.

### 5.2. Conclusiones Específicas

A partir de la evaluación detallada de los componentes del sistema, la simulación de escenarios operativos y el análisis de costos, se establecen las siguientes conclusiones específicas:

- **Viabilidad Energética del Bombeo Solar Directo:** El dimensionamiento a nivel de ingeniería básica del generador fotovoltaico de 2,75 kWp, acoplado a la motobomba de 2,2 kW, evidenció ser técnicamente viable para las condiciones de radiación de la localidad de Tuquí-Talhuén. La simulación constató que el sistema proporciona una ventana operativa de hasta 7 horas diarias durante el mes de mayor exigencia hídrica (enero). Esta configuración entrega la holgura energética necesaria para que la bomba opere a régimen nominal, permitiendo prescindir totalmente del uso de bancos de baterías químicas (litio o plomo-ácido). Esta decisión de diseño no solo minimiza el impacto ambiental, sino que constituye el factor clave para mantener los costos operativos (OPEX) al mínimo durante los 20 años de vida útil proyectada para el sistema.
- **Eficiencia del Control por Histéresis:** La implementación de una lógica de control basada en la humedad del suelo, con un disparador operativo de alta frecuencia al 33 %,

probó ser altamente eficaz. Este enfoque técnico previene de manera proactiva el estrés hídrico, manteniendo la humedad volumétrica siempre alejada del Punto de Marchitez Permanente (15 %), optimizando a su vez las recargas del estanque al sincronizar los riegos con las horas de mayor disponibilidad solar.

- **Seguridad, Resiliencia y Optimización Normativa:** La prueba de estrés hídrico validó matemáticamente que el estanque de acumulación de 195 m<sup>3</sup> cumple a cabalidad con el criterio de 3 días (72 horas) de autonomía estipulado por la Comisión Nacional de Riego (CNR). Ante una falla prolongada de radiación solar en pleno verano, el sistema salvaguarda el cultivo utilizando el estanque como amortiguador primario y el suelo como amortiguador secundario, demostrando que el diseño está optimizado y no presenta sobrecostos por sobredimensionamiento.
- **Viabilidad Económica y Rentabilidad:** El análisis de Costo Total de Propiedad (TCO) evidenció que, si bien la arquitectura fotovoltaica exige un gasto de capital inicial (CAPEX) estimado en \$12.500.000 CLP (considerando el estándar de montaje y puesta en marcha), la sustitución total del gasto recurrente en combustible diésel y la disminución sustancial en las labores de mantenimiento mecánico (OPEX) proyectan un período de retorno de la inversión (*Payback*) de 15,5 años. Considerando que la vida útil garantizada de los módulos solares ronda los 25 años, estos resultados permiten concluir que el sistema propuesto representa una alternativa financieramente robusta a largo plazo. Una vez superado el punto de equilibrio, el proyecto asegura al agricultor casi una década de operación autónoma con costos marginales cercanos a cero, blindándolo definitivamente frente a la volatilidad del mercado de los hidrocarburos.
- **Impacto Ambiental y Sostenibilidad:** El reemplazo de la motobomba de combustión interna por un sistema de generación in-situ descentralizado impacta directamente en la disminución de la huella de carbono de la operación agrícola. El diseño se alinea íntegramente con los compromisos de descarbonización del país hacia el año 2050 y con los principios de eficiencia impulsados por el Ministerio de Energía, dotando al productor de una resiliencia climática invaluable.

### 5.3. Recomendaciones y Trabajos Futuros

Visualizando la eventual implementación del proyecto a escala comercial en la Región de Coquimbo, se proponen las siguientes líneas de trabajo para la optimización y escalabilidad de la solución:

- **Implementación y Validación Empírica:** Se recomienda la construcción de un prototipo a escala real en Tuquí-Talhuén. Esto permitirá validar en terreno los datos teóricos de la simulación, calibrar físicamente las sondas FDR para la textura de suelo franco-arenoso específica del predio y ajustar el umbral de histéresis del 33 % bajo condiciones climáticas dinámicas in-situ.
- **Integración de Telemetría e IoT (Internet de las Cosas):** Para dotar al sistema de características de agricultura inteligente (AgriTech), se sugiere incorporar módulos de

comunicación inalámbrica (LoRaWAN o M2M celular) al controlador central. Esto habilitaría el monitoreo remoto en tiempo real del nivel del estanque, la humedad del suelo y el estado electromecánico de la bomba mediante una plataforma web, facilitando la toma de decisiones a distancia.

- **Postulación a Instrumentos de Fomento Estatal:** Considerando el considerable esfuerzo de inversión inicial, se recomienda estructurar la ingeniería de detalles de este proyecto para postular a los subsidios estatales contemplados en la Ley N° 18.450 de Fomento a la Inversión Privada en Obras de Riego y Drenaje. El cofinanciamiento estatal reduciría drásticamente los 5,4 años de Payback calculados, haciendo la tecnología accesible para pequeños y medianos agricultores.
- **Control Predictivo Meteorológico:** Como evolución del algoritmo lógico, se propone transitar de un control reactivo (histéresis clásica) a un control predictivo avanzado. Integrando el sistema a una API de pronóstico meteorológico, el controlador podría anticipar eventos de alta nubosidad para "pre-regar" el cultivo, o bien suspender ciclos de bombeo si se pronostican precipitaciones inminentes, llevando la eficiencia hídrica a su máximo límite técnico.
- **Escalabilidad Agronómica:** Se sugiere adaptar el modelo matemático y la lógica de control desarrollada en esta memoria a otras especies frutales de alto valor comercial cultivadas en el Valle del Limarí (tales como cerezos o cítricos), requiriendo únicamente la re-parametrización de las constantes biológicas y el coeficiente de cultivo ( $K_c$ ) en el controlador central.

## Bibliografía

- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D. y Smith, M. (1998). *Evapotranspiración del cultivo: guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*. FAO Irrigation and Drainage Paper 56. Roma, Italia: FAO.
- Alonso Abella, M. y Chenlo Romero, F. (s.f.). *Sistemas de Bombeo Fotovoltaico*. Departamento de Energías Renovables, CIEMAT. España.
- Alvear Cid, N. A. (2024). *Diagnóstico y evaluación de asesoría técnica en riego de pequeños agricultores en zonas de escasez hídrica de la provincia del Limarí, Región de Coquimbo*. Tesis de Grado, Universidad de Chile, Santiago.
- Castro, M., et al. (2016). *Estrategias de control On/Off con histéresis para sistemas de riego localizado en agricultura de precisión*. Revista de Ciencias Agrícolas.
- Comisión Nacional de Riego (CNR). (2018). *Manual de Diseño y Construcción para Sistemas de Riego Fotovoltaico*. Ministerio de Agricultura, Gobierno de Chile.
- Delgado, C., Weisselberg, R. y Cursach, J. (2018). *Plan de Conservación Cuenca del Limarí: Resumen ejecutivo*. The Nature Conservancy & Fundación Conservación Marina, Informe Técnico.
- Dirección General de Aguas (DGA). (2016). *Atlas del Agua Chile 2016*. Ministerio de Obras Públicas, Gobierno de Chile.
- Dirección General de Aguas (DGA). (2022). *Resolución Exenta N°1482: Establece requisitos y forma de operación en autorizaciones temporales de extracción de aguas en zonas de escasez hídrica*. Ministerio de Obras Públicas.
- Dirección General de Aguas (DGA). (2025). *Decreto MOP N° 74: Prórroga de declaración de zona de escasez hídrica en la provincia de Limarí, Región de Coquimbo*. Ministerio de Obras Públicas.
- FAO. (2022). *El estado de los recursos de tierras y aguas del mundo para la alimentación y la agricultura: Sistemas al límite*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.
- García, A. (2009). *Manejo del riego mediante el uso de sensores de humedad de suelo: Sondeas de capacitancia*. Boletín Técnico, INIA.
- Google Earth. (2025). *Imagen satelital de la zona de Tuquú-Talhuén, Provincia de Limarí*. Recuperado de software Google Earth Pro.
- Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA). (2018). *Manual de cultivo de la uva de mesa: Requerimientos hídricos y coeficientes de cultivo (Kc)*. Ministerio de Agricultura, Chile.
- McKinney, W. (2010). *Data Structures for Statistical Computing in Python*. Proceedings of the 9th Python in Science Conference, 51-56.

- Ministerio de Energía. (2012). *Ley 20.571: Regula el pago de las tarifas eléctricas de las generadoras residenciales (Net Billing)*. Gobierno de Chile.
- Ministerio de Energía. (2021). *Ley 21.305 sobre Eficiencia Energética*. Gobierno de Chile.
- Ministerio de Energía y Universidad de Chile. (2025). *Reporte de Recurso Solar y datos meteorológicos (Explorador Solar)*. Departamento de Geofísica, Gobierno de Chile.
- Ministerio del Medio Ambiente. (2021). *Estrategia Climática de Largo Plazo de Chile*. Gobierno de Chile.
- Ministerio de Obras Públicas (MOP). (1981 / modificado 2022). *Código de Aguas. Decreto con Fuerza de Ley N° 1.122*. Biblioteca del Congreso Nacional de Chile.
- ONU-Agua. (2023). *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2023: Alianzas y cooperación por el agua*. París.
- Ramírez Rodríguez, P. (2024). *Evolución de la demanda hídrica y evapotranspiración de cultivos en el Valle del Limarí*. Tesis, Universidad de La Serena.
- Ruiz Canales, A. y Molina Martínez, J. M. (2010). *Automatización y telecontrol de sistemas de riego*. Madrid, España: Mundi-Prensa.
- UNESCO. (2021). *The United Nations World Water Development Report 2021: Valuing Water*. París.
- Van Rossum, G. y Drake, F. L. (2009). *Python 3 Reference Manual*. Scotts Valley, CA: CreateSpace.

## 6. Anexos

### 6.1. Código Fuente de Simulación (Python)

A continuación se presentan los scripts desarrollados en lenguaje Python utilizados para modelar y simular el comportamiento del sistema de riego fotovoltaico automatizado.

#### 6.1.1. Script 1: Simulación de Balance Hídrico y Dinámica del Estanque

Este primer script implementa el modelo físico del cultivo de *Vitis vinifera*, la lógica de control por histéresis y la simulación del estanque con márgenes de seguridad para un ciclo operativo estándar.

```
1 import numpy as np
2 import pandas as pd
3 import matplotlib.pyplot as plt
4
5
6 # 1. PARAMETROS DEL SISTEMA (Con Factor de Seguridad)
7
8 AREA_CULTIVO = 10000.0      # m2
9 EFICIENCIA_RIEGO = 0.90
10 PROFUNDIDAD_RAIZ = 600.0   # mm
11 CAUDAL_BOMBA = 10.8        # m3/h
12
13 # ESTANQUE Y SEGURIDAD
14 CAPACIDAD_FISICA = 195.0    # m3 (Estructura total)
15 FACTOR_SEGURIDAD = 0.90    # 90% Llenado maximo operativo
16 VOL_MAX_OPERATIVO = CAPACIDAD_FISICA * FACTOR_SEGURIDAD
17
18 # Suelo
19 CC = 35.0 # Capacidad Campo
20 PMP = 15.0 # Punto Marchitez
21 UR = CC - (0.45 * (CC - PMP)) # Umbral Riego ~26%
22
23 # Clima (Datos Ministerio Energia)
24 rad_mensual = [8.71, 7.91, 6.48, 4.67, 3.32, 2.81, 2.98, 3.90, 5.30,
25               7.00, 8.22, 8.92]
26 kc_mensual = [0.90, 0.85, 0.70, 0.45, 0.20, 0.00, 0.00, 0.00, 0.30,
27               0.50, 0.70, 0.85]
28 eto_base = [6.5, 5.8, 4.5, 3.0, 2.2, 1.8, 1.9, 2.5, 3.8, 5.0, 6.0,
29             6.8]
30
31 # 2. SIMULACION
32
33 horas_anio = pd.date_range(start='2025-01-01', periods=8760, freq='h')
34 df = pd.DataFrame(index=horas_anio)
35 df['Mes'] = df.index.month
36 df['Hora'] = df.index.hour
37
38 def simular_clima(row):
39     idx = int(row['Mes']) - 1
```

```

38     hora = int(row['Hora'])
39     if 7 <= hora <= 20:
40         factor = np.sin(np.pi * (hora - 7) / 13)
41         ghi = rad_mensual[idx] * factor * 1000 * 0.13
42         etc = eto_base[idx] * kc_mensual[idx] * factor * 0.15
43     else:
44         ghi, etc = 0.0, 0.0
45     return pd.Series([ghi, etc])
46
47 df[['GHI', 'ETc']] = df.apply(simular_clima, axis=1)
48
49 humedad, estanque, riego_log = [], [], []
50 h_act = CC
51 v_est = VOL_MAX_OPERATIVO
52 riego = False
53
54 for i, row in df.iterrows():
55     sensor = h_act + np.random.normal(0, 0.05)
56
57     if sensor <= UR: riego = True
58     elif sensor >= CC: riego = False
59
60     if row['GHI'] > 300 and v_est < VOL_MAX_OPERATIVO:
61         entrada = CAUDAL_BOMBA
62     else:
63         entrada = 0
64
65     if riego and v_est > 0:
66         salida = 15.0
67         mm_apli = (salida * 1000 / AREA_CULTIVO) * EFICIENCIA_RIEGO
68     else:
69         salida, mm_apli = 0, 0
70         if v_est <= 0: riego = False
71
72     v_est = min(VOL_MAX_OPERATIVO, max(0, v_est + entrada - salida))
73     delta = mm_apli - row['ETc']
74     h_act = max(PMP, min(45.0, h_act + (delta/PROFUNDIDAD_RAIZ)*100))
75
76     humedad.append(h_act)
77     estanque.append(v_est)
78     riego_log.append(1 if riego else 0)
79
80 df['Humedad'] = humedad
81 df['Estanque'] = estanque
82 df['Riego'] = riego_log

```

Listing 1: Modelo físico y control por histéresis general.

### 6.1.2. Script 2: Prueba de Resiliencia Básica (Apagón Solar en Enero)

Este bloque de código aísla el mes de mayor exigencia hídrica (enero) y evalúa el comportamiento del sistema frente a una falla prolongada de radiación solar durante 3 días para validar la capacidad del estanque.

```
1 import numpy as np
2 import pandas as pd
3 import matplotlib.pyplot as plt
4
5 # Generamos enero con los ajustes correctos
6 horas_enero = pd.date_range(start='2025-01-01', end='2025-01-31 23:00',
7                               , freq='h')
8 df_res = pd.DataFrame(index=horas_enero)
9 df_res['Hora'] = df_res.index.hour
10
11 # Radiacion y ETc para enero (mes critico)
12 def simular_enero(row):
13     h = int(row['Hora'])
14     if 7 <= h <= 20:
15         factor = np.sin(np.pi * (h - 7) / 13)
16         ghi = (8.71 * 1000 / 6.0) * factor
17         etc = (6.5 * 0.90 * factor * 0.15)
18     else:
19         ghi, etc = 0.0, 0.0
20     return pd.Series([ghi, etc])
21 df_res[['GHI_W_m2', 'ETc_mm']] = df_res.apply(simular_enero, axis=1)
22
23 # SIMULACION DEL APAGON SOLAR (Dias 20, 21 y 22 de enero sin sol)
24 mask_blackout = (df_res.index >= '2025-01-20 00:00:00') & (df_res.index < '2025-01-23 00:00:00')
25 df_res.loc[mask_blackout, 'GHI_W_m2'] = 0.0
26
27 # Parametros del sistema
28 CAPACIDAD_ESTANQUE, LIMITE_LLENADO = 195.0, 195.0 * 0.95
29 CC, PMP, UMBRAL_OPERATIVO = 35.0, 15.0, 33.0
30 CAUDAL_BOMBA, CAUDAL_RIEGO_SALIDA = 10.8, 12.0
31 AREA_CULTIVO, EFICIENCIA_RIEGO, PROFUNDIDAD_RAIZ = 10000.0, 0.90,
32     600.0
33
34 h_r, v_r = CC, CAPACIDAD_ESTANQUE
35 estanque_r, riego = [], False
36
37 for i, row in df_res.iterrows():
38     # Histeresis
39     if h_r <= UMBRAL_OPERATIVO: riego = True
40     elif h_r >= CC: riego = False
41
42     # Bomba (No funciona durante el apagon)
43     if row['GHI_W_m2'] > 200 and v_r < LIMITE_LLENADO: entrada =
44         CAUDAL_BOMBA
45     else: entrada = 0
```

```

45 # Riego
46 if riego and v_r > 5:
47     salida = CAUDAL_RIEGO_SALIDA
48     mm = (salida * 1000 / AREA_CULTIVO) * EFICIENCIA_RIEGO
49 else:
50     salida, mm = 0, 0
51     if v_r <= 5: riego = False
52
53     v_r = min(CAPACIDAD_ESTANQUE, max(0, v_r + entrada - salida))
54     delta = mm - row['ETc_mm']
55     h_r = max(PMP, min(45.0, h_r + (delta/PROFUNDIDAD_RAIZ)*100))
56     estanque_r.append(v_r)
57
58 df_res['Nivel_Estanque'] = estanque_r
59
60 # Graficar el evento (del 18 al 25 )
61 subset_r = df_res['2025-01-18':'2025-01-25']
62 plt.figure(figsize=(10, 6))
63 plt.plot(subset_r.index, subset_r['Nivel_Estanque'], label='Nivel del
64     Estanque', color='red', linewidth=2)
65 plt.axvspan(pd.Timestamp('2025-01-20'), pd.Timestamp('2025-01-23'),
66     color='gray', alpha=0.3, label='Apogon Solar (3 Dias)')
67 plt.axhline(y=0, color='black', linewidth=1)
68 plt.axhline(y=CAPACIDAD_ESTANQUE, color='black', linestyle='--', alpha
69     =0.5, label='Capacidad Maxima')
70 plt.title('Figura 3.5: Prueba de Resiliencia (3 Dias sin Radiacion
71     Solar)')
72 plt.ylabel('Volumen ($m^3$)')
73 plt.legend()
74 plt.grid(True, alpha=0.3)
75 plt.tight_layout()
76 plt.savefig('3.5.png')
77 print("Figura 3.5 (Resiliencia.)")

```

Listing 2: Simulación del apagón solar de 3 días.

### 6.1.3. Script 3: Simulación Avanzada de Resiliencia con Gestión de Directorios

Versión optimizada del código de resiliencia que incluye parámetros validados agrónomicamente, manejo de directorios nativos del sistema y generación visual avanzada con sombreado de zonas críticas.

```
1 import numpy as np
2 import pandas as pd
3 import matplotlib.pyplot as plt
4 import os
5
6 # Crear directorio para imagenes si no existe
7 if not os.path.exists('img'):
8     os.makedirs('img')
9
10
11 # 1. CONFIGURACION (Parametros Validados)
12
13 # Datos del sistema
14 AREA_CULTIVO = 10000.0      # 1 Hectarea
15 EFICIENCIA_RIEGO = 0.90
16 PROFUNDIDAD_RAIZ = 600.0
17 CAPACIDAD_ESTANQUE = 195.0 # m3 (Dimensionado para 3 dias)
18
19 # Caudales y Potencias
20 CAUDAL_BOMBA = 10.8        # m3/h
21 CAUDAL_RIEGO_SALIDA = 12.0 # m3/h (Ajustado para equilibrio)
22
23 # Parametros del Suelo
24 CC = 35.0 # Capacidad de Campo (%)
25 PMP = 15.0 # Punto de Marchitez (%)
26 # Disparador de Riego de Alta Frecuencia (Validado agronomicamente)
27 UMBRAL_OPERATIVO = 33.0
28
29
30 # 2. GENERACION DE CLIMA SINTETICO (ENERO)
31
32 # Generamos solo Enero para esta prueba especifica
33 horas_enero = pd.date_range(start='2025-01-01', end='2025-01-31 23:00',
34                               , freq='h')
35 df = pd.DataFrame(index=horas_enero)
36 df['Hora'] = df.index.hour
37
38 # Datos promedio para Enero (Mes critico)
39 RAD_ENERO_PROM = 8.71 # kWh/m2/dia
40 ETC_BASE_ENERO = 6.5 # mm/dia
41 KC_ENERO = 0.90
42
43 def simular_clima_enero(row):
44     h = int(row['Hora'])
45     # Curva solar diaria (7am a 8pm)
46     if 7 <= h <= 20:
47         factor = np.sin(np.pi * (h - 7) / 13)
48         # Factores de escala para que la suma diaria coincida con el
```

```

48         promedio
49         ghi = RAD_ENERO_PROM * 1000 / 6.0 * factor # W/m2 aprox
50         etc = ETC_BASE_ENERO * KC_ENERO * factor * 0.15 # mm/hora
51         aprox
52     else:
53         ghi, etc = 0.0, 0.0
54     return pd.Series([ghi, etc])
55
56 df[['GHI_W_m2', 'ETc_mm']] = df.apply(simular_clima_enero, axis=1)
57
58 # 3. SIMULACION DEL "APAGON SOLAR" (RESILIENCIA)
59
60 # Creamos una copia para no alterar los datos originales
61 df_resiliencia = df.copy()
62
63 # FORZAMOS 3 DIAS SIN SOL (Del 20 al 23 de Enero)
64 mask_blackout = (df_resiliencia.index >= '2025-01-20 00:00:00') & (
65     df_resiliencia.index < '2025-01-23 00:00:00')
66 df_resiliencia.loc[mask_blackout, 'GHI_W_m2'] = 0.0
67
68 print("Simulando escenario de resiliencia (3 dias sin sol)...")
69
70 # Inicializacion
71 h_actual = CC
72 vol_estanque = CAPACIDAD_ESTANQUE
73 riego_activo = False
74 LIMITE_LLENADO = CAPACIDAD_ESTANQUE * 0.95
75
76 estanque_log = []
77
78 # Bucle de Simulacion
79 for i, row in df_resiliencia.iterrows():
80     # A. Control (Histeresis de Alta Frecuencia)
81     lectura_sensor = h_actual + np.random.normal(0, 0.05)
82     if lectura_sensor <= UMBRAL_OPERATIVO:
83         riego_activo = True
84     elif lectura_sensor >= CC:
85         riego_activo = False
86
87     # B. Modelo Fisico
88     # Entrada: Bomba (Sera 0 durante los dias del apagon)
89     if row['GHI_W_m2'] > 200 and vol_estanque < LIMITE_LLENADO:
90         entrada_agua = CAUDAL_BOMBA
91     else:
92         entrada_agua = 0 # Aqui cae a 0 en el blackout
93
94     # Salida: Riego (Sigue funcionando si hay agua en el estanque)
95     if riego_activo and vol_estanque > 5:
96         salida_agua = CAUDAL_RIEGO_SALIDA
97         riego_mm = (salida_agua * 1000 / AREA_CULTIVO) *
98             EFICIENCIA_RIEGO
99     else:
100         salida_agua = 0

```

```

98     riego_mm = 0
99     if vol_estanque <= 5: riego_activo = False # Proteccion de
        vaciado total
100
101     # Actualizar balances
102     vol_estanque = min(CAPACIDAD_ESTANQUE, max(0, vol_estanque +
        entrada_agua - salida_agua))
103     delta_pct = ((riego_mm - row['ETc_mm']) / PROFUNDIDAD_RAIZ) * 100
104     h_actual = max(PMP, min(45.0, h_actual + delta_pct))
105
106     estanque_log.append(vol_estanque)
107
108 df_resiliencia['Nivel_Estanque_Resiliencia'] = estanque_log
109
110
111 # 4. GENERACION DEL GRAFICO
112
113 subset_r = df_resiliencia['2025-01-18':'2025-01-25']
114
115 plt.figure(figsize=(10, 6))
116
117 # Graficar el nivel del estanque
118 plt.plot(subset_r.index, subset_r['Nivel_Estanque_Resiliencia'],
119         label='Nivel del Estanque', color='red', linewidth=2)
120
121 # Sombrear el area del apagon solar
122 plt.axvspan(pd.Timestamp('2025-01-20'), pd.Timestamp('2025-01-23'),
123         color='gray', alpha=0.3, label='Apagon Solar (3 Dias)')
124
125 # Lineas de referencia
126 plt.axhline(y=0, color='black', linewidth=1.5, linestyle='--') # El
        suelo (0 m3)
127 plt.axhline(y=CAPACIDAD_ESTANQUE, color='blue', linestyle='--', alpha
        =0.5, label='Capacidad Maxima (195 m3)')
128
129 # Titulos y etiquetas
130 plt.title('Figura 3.5: Prueba de Resiliencia (3 Dias sin Radiacion
        Solar en Enero)')
131 plt.ylabel('Volumen Almacenado ($m^3$)')
132 plt.xlabel('Fecha')
133 plt.legend(loc='upper right')
134 plt.grid(True, alpha=0.3)
135 plt.tight_layout()
136
137 # Guardar imagen en la carpeta correcta
138 ruta_imagen = os.path.join('img', '3.5.png')
139 plt.savefig(ruta_imagen)
140 print(f"Grafico de resiliencia: {ruta_imagen}")
141 plt.show()

```

Listing 3: Simulación Avanzada de Resiliencia con Parámetros Validados.

## 6.2. Planos y Diagramas de Ingeniería

Esta sección contiene los esquemas técnicos fundamentales para la correcta interpretación, instalación y mantenimiento del sistema de bombeo fotovoltaico automatizado propuesto para el cultivo de *Vitis vinifera*.

### 6.2.1. Diagrama Unilineal Eléctrico

El siguiente plano detalla la arquitectura eléctrica del sistema, incluyendo la conexión en serie de los módulos fotovoltaicos de 550Wp, las protecciones de corriente continua (fusibles, seccionador y descargador de sobretensiones), el controlador MPPT y la conexión final hacia la motobomba de 3 HP.

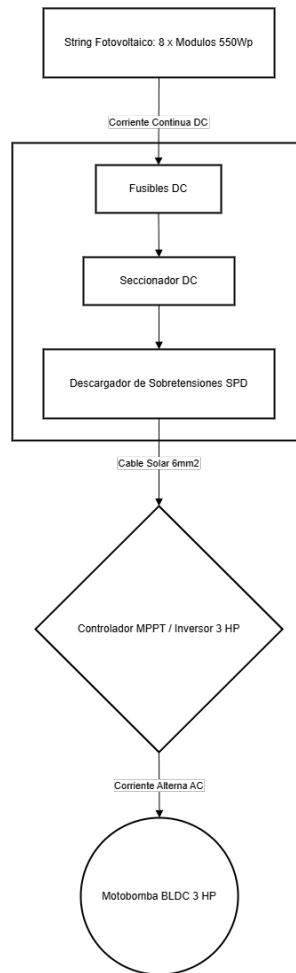


Figura 6.1: Diagrama unilineal del sistema de generación y fuerza fotovoltaica.

### **6.2.2. Diagrama de Tuberías e Instrumentación (P&ID)**

El diagrama P&ID ilustra el circuito hidráulico y la lógica de control. Se detalla el recorrido del agua desde la fuente hasta el estanque de acumulación de 195 m<sup>3</sup>, y la retroalimentación de la señal de humedad desde el sensor FDR hacia el controlador central para ejecutar la histéresis del 33 %.

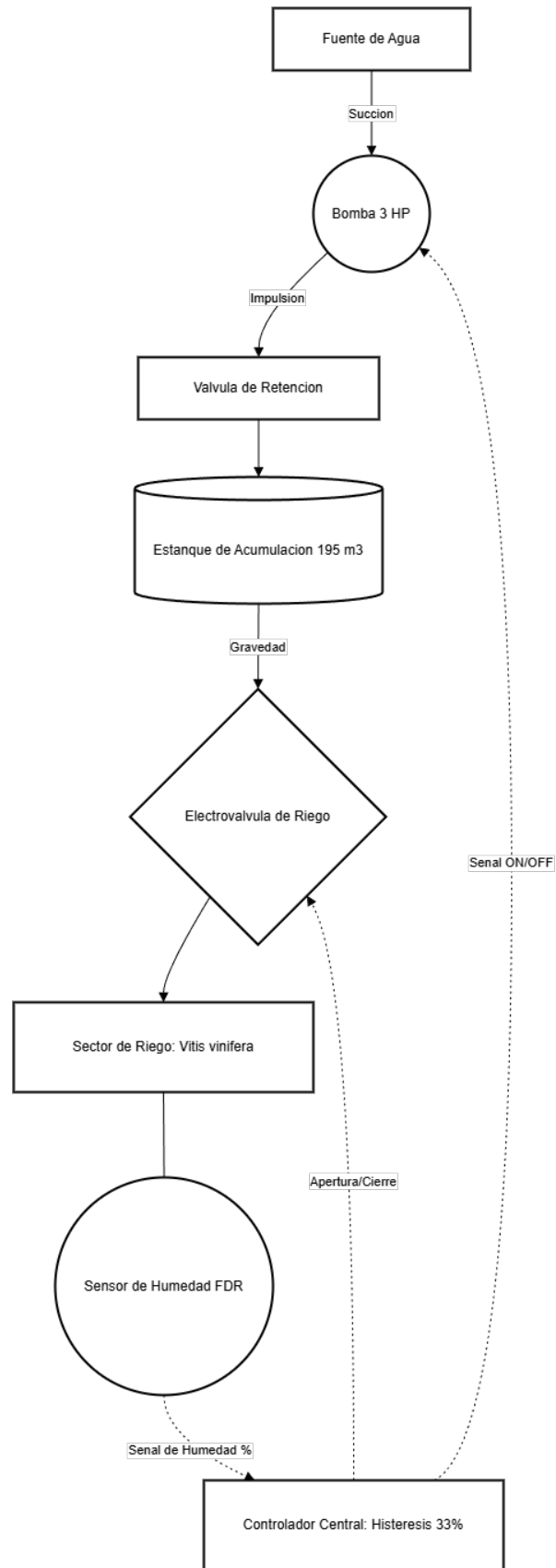


Figura 6.2: Diagrama de Tuberías e Instrumentación (P&ID) y lazos de control.

### **6.3. Fichas Técnicas (Datasheets) del Equipamiento**

En esta sección se adjuntan las especificaciones técnicas oficiales provistas por los fabricantes para los componentes críticos del sistema. Estos documentos respaldan los parámetros de eficiencia, potencia eléctrica y tolerancias operativas utilizados durante el modelamiento, las simulaciones y el análisis económico del proyecto.

#### **6.3.1. Módulo Fotovoltaico Monocristalino (550Wp)**

A continuación se detallan las especificaciones eléctricas y mecánicas del panel solar utilizado en el dimensionamiento.

# Tiger Neo N-type 72HL4-BDV 550-570 Watt BIFACIAL MODULE WITH DUAL GLASS

## N-Type

Positive power tolerance of 0~+3%

IEC 61215(2016), IEC 61730(2016)  
ISO 9001:2015: Quality Management System  
ISO 14001:2015: Environment Management System  
ISO 45001:2018  
Occupational health and safety management systems



## Key Features



### SMBB Technology

Better light trapping and current collection to improve module power output and reliability.



### PID Resistance

Excellent Anti-PID performance guarantee via optimized mass-production process and materials control.



### Higher Power Output

Module power increases 5-25% generally, bringing significantly lower LCOE and higher IRR.



### Hot 2.0 Technology

The N-type module with Hot 2.0 technology has better reliability and lower LID/LETID.

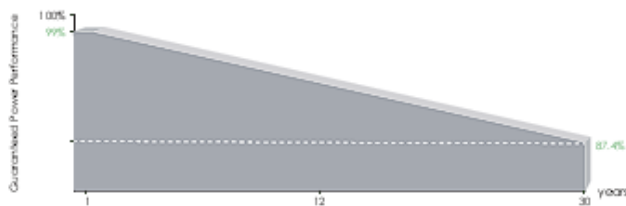


### Enhanced Mechanical Load

Certified to withstand: wind load (2400 Pascal) and snow load (5400 Pascal).



## LINEAR PERFORMANCE WARRANTY

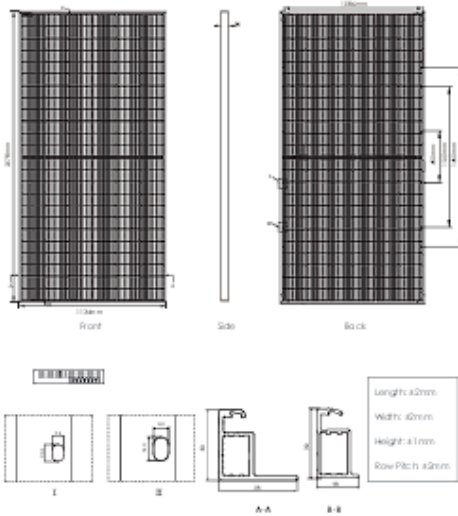


12 Year Product Warranty

30 Year Linear Power Warranty

0.40% Annual Degradation Over 30 years

## Engineering Drawings



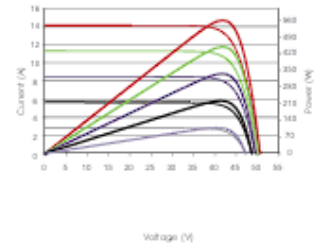
## Packaging Configuration

(Two pallets = One stack)

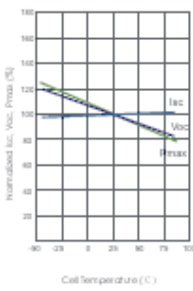
34pcs/pallets, 72pcs/stack, 720pcs/40HQ Container

## Electrical Performance & Temperature Dependence

Current-Voltage & Power-Voltage Curves (560W)



Temperature Dependence of Isc, Voc, Pmax



## Mechanical Characteristics

Cell Type	N type Mono-crystalline
No. of cells	144 (6x24)
Dimensions	2278x1134x30mm [89.69x44.65x1.18 inch]
Weight	32 kg [70.55 lbs]
Front Glass	2.0mm, Anti-Reflection Coating
Back Glass	2.0mm, Heat Strengthened Glass
Frame	Anodized Aluminium Alloy
Junction Box	IP68 Rated
Output Cables	TUV 1x4.0mm <sup>2</sup> (+): 400mm, (-): 200mm or Customized Length

## SPECIFICATIONS

Module Type	JKM550N-72HL4-8DV		JKM555N-72HL4-8DV		JKM560N-72HL4-8DV		JKM565N-72HL4-8DV		JKM570N-72HL4-8DV	
	STC	NOCT	STC	NOCT	STC	NOCT	STC	NOCT	STC	NOCT
Maximum Power (Pmax)	550Wp	414Wp	555Wp	417Wp	560Wp	421Wp	565Wp	425Wp	570Wp	429Wp
Maximum Power Voltage (Vmp)	41.58V	39.13V	41.77V	39.26V	41.95V	39.39V	42.14V	39.52V	42.29V	39.65V
Maximum Power Current (Imp)	13.23A	10.57A	13.29A	10.63A	13.35A	10.69A	13.41A	10.75A	13.48A	10.81A
Open-circuit Voltage (Voc)	50.27V	47.75V	50.47V	47.94V	50.67V	48.13V	50.87V	48.32V	51.07V	48.51V
Short-circuit Current (Isc)	14.01A	11.31A	14.07A	11.36A	14.13A	11.41A	14.19A	11.46A	14.25A	11.50A
Module Efficiency STC (%)	21.29%		21.48%		21.68%		21.87%		22.07%	
Operating Temperature (°C)	-40°C~+85°C									
Maximum system voltage	1500VDC (IEC)									
Maximum series fuse rating	30A									
Power tolerance	0~+3%									
Temperature coefficients of Pmax	-0.30%/°C									
Temperature coefficients of Voc	-0.25%/°C									
Temperature coefficients of Isc	0.048%/°C									
Nominal operating cell temperature (NOCT)	45±2°C									
Refer. Bifacial Factor	80±5%									

## BIFACIAL OUTPUT-REAR SIDE POWER GAIN

		578Wp	583Wp	588Wp	593Wp	599Wp
5%	Maximum Power (Pmax)	578Wp	583Wp	588Wp	593Wp	599Wp
	Module Efficiency STC (%)	22.36%	22.56%	22.77%	22.97%	23.17%
15%	Maximum Power (Pmax)	633Wp	638Wp	644Wp	650Wp	656Wp
	Module Efficiency STC (%)	24.48%	24.71%	24.93%	25.15%	25.37%
25%	Maximum Power (Pmax)	688Wp	694Wp	700Wp	706Wp	713Wp
	Module Efficiency STC (%)	26.61%	26.86%	27.10%	27.34%	27.58%

\*STC: Irradiance 1000W/m<sup>2</sup>

Cell Temperature 25°C

AM=1.5

NOCT: Irradiance 800W/m<sup>2</sup>

Ambient Temperature 20°C

AM=1.5

Wind Speed 1m/s

©2021 Jinko Solar Co., Ltd. All rights reserved.

Specifications included in this datasheet are subject to change without notice.

JKM550-570N-72HL4-8DV-F1-EN (IEC 2016)

### **6.3.2. Bomba Solar BLDC y Controlador MPPT**

Características técnicas del grupo de bomba de acople directo y su controlador.

## PS2-4000 C-SJ8-15

### Solar Submersible Pump System for 4" wells

#### System Overview

Head	max. 80 m
Flow rate	max. 13 m <sup>3</sup> /h

#### Technical Data

##### Controller PS2-4000

- Controlling and monitoring
- Control inputs for dry running protection, remote control etc.
- Protected against reverse polarity, overload and overtemperature
- Integrated MPPT (Maximum Power Point Tracking)
- Integrated Sun Sensor

Power	max. 4,0 kW
Input voltage	max. 375 V
Optimum Vmp**	> 238 V
Motor current	max. 14 A
Efficiency	max. 98 %
Ambient temp.	-40...50 °C
Enclosure class	IP68

##### Motor ECDRIVE 4000-C

- Maintenance-free brushless DC motor
- Water filled
- Premium materials, stainless steel: AISI 304/316
- No electronics in the motor

Rated power	4,0 kW
Efficiency	max. 92 %
Motor speed	900...3 300 rpm
Insulation class	F
Enclosure class	IP68
Submersion	max. 150 m

##### Pump End PE C-SJ8-15

- Non-return valve
- Premium materials, stainless steel: AISI 304
- Optional: dry running protection
- Centrifugal pump



##### Pump Unit PU4000 C-SJ8-15 (Motor, Pump End)

Borehole diameter	min. 4,0 in
Water temperature	max. 50 °C

#### Standards



2006/42/EC, 2004/108/EC, 2006/95/EC

IEC/EN 61702:1995

The logos shown reflect the approvals that have been granted for this product family. Products are ordered and supplied with the approvals specific to the market requirements.

\*\*Vmp: MPP-voltage under Standard Test Conditions (STC): 1000 W/m<sup>2</sup> solar irradiance, 25 °C cell temperature

BERNT LORENTZ GmbH & Co. KG  
Sickertstecken 24, 24558 Henstedt-Ulzburg  
Germany, Tel +49 (0)4193 8806-700, www.lorenz.de



Created by LORENTZ COMPASS 3.1.0.95

All specifications and information are given with good intent, errors are possible and products may be subject to change without notice. Pictures may differ from actual products depending on local market requirements and regulations.

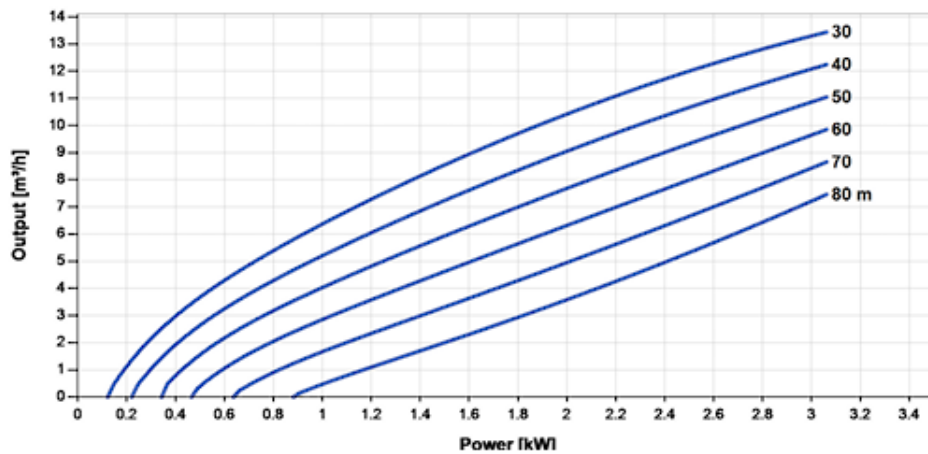
Sun. Water. Life.

## PS2-4000 C-SJ8-15

### Solar Submersible Pump System for 4" wells

#### Pump Chart

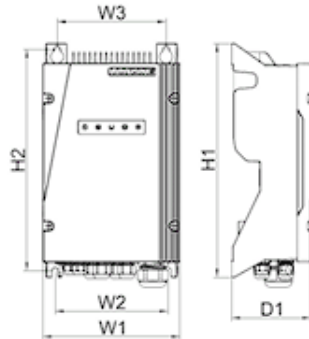
Vmp\* > 238 V



#### Dimensions and Weights

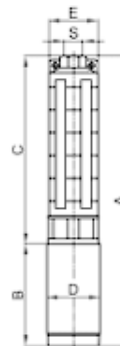
##### Controller

H1 = 352 mm  
 H2 = 333 mm  
 W1 = 207 mm  
 W2 = 170 mm  
 W3 = 164 mm  
 D1 = 124 mm



##### Pump Unit

A = 1 118 mm  
 B = 245 mm  
 C = 873 mm  
 D = 96 mm  
 E = 98 mm  
 S = 2 in



	Net weight
Controller	6,1 kg
Pump Unit	21 kg
Motor	10 kg
Pump End	11 kg

\*Vmp: MPP-voltage under Standard Test Conditions (STC): 1000 W/m² solar irradiance, 25 °C cell temperature

BERNT LORENTZ GmbH & Co. KG  
 Skobenstuecken 24, 24558 Henstedt-Ulzburg  
 Germany, Tel +49 (0)4193 8806-700, www.lorentz.de

Created by LORENTZ COMPASS 3.1.0.95  
 All specifications and information are given with good intent, errors are possible and products may be subject to change without notice. Pictures may differ from actual products depending on local market requirements and regulations.

Sun. Water. Life.

### **6.3.3. Sonda de Humedad de Suelo (FDR)**

Especificaciones operativas del sensor capacitivo utilizado para la medición volumétrica y la lógica de control por histéresis.

---

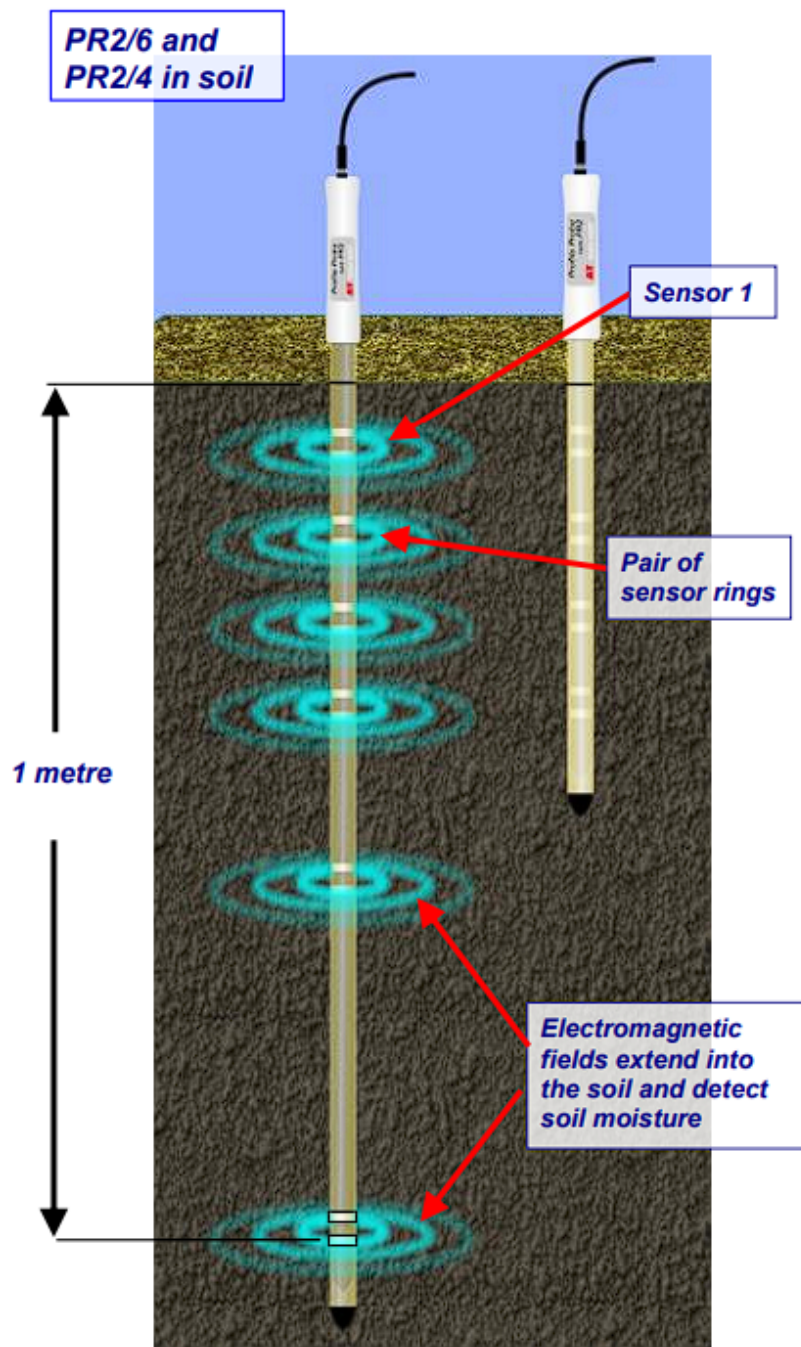
# User Manual for the *Profile Probe*

type **PR2**



PR2-UM-5.0

**Delta-T Devices Ltd**



### 6.3.4. Controlador Lógico Programable (PLC)

Ficha técnica del equipo de control central encargado de procesar las señales de entrada del sensor FDR y ejecutar la lógica de histéresis automatizada.

# Controlador NMC-PRO

## CONTROLADOR DE RIEGO AVANZADO, MULTIFUNCIONAL MODULAR Y ROBUSTO

El NMC-PRO es un controlador de riego de vanguardia para aplicaciones de mediana a gran escala. Es un controlador adecuado para soluciones en campo abierto e invernaderos.



Huertos



Invernadero



Campo Abierto

### / Características & Beneficios

- ✓ Controlador rentable de alto nivel.
- ✓ Interfaz multilingüe y fácil de utilizar.
- ✓ Diseño modular.
- ✓ Control avanzado de CE/pH.
- ✓ Apoyo al tratamiento de pH durante el fertirriego por cantidad.



### / Funcionalidad

- Permite configurar la irrigación / enfriamiento / nebulización y apertura de válvulas.
- Permite Control de la válvula a través de Multicable, RF con RadioNet, o a través de un cable de 2 hilos con SingleNet.
- Estrategia de irrigación basada en el programa de dosificación, tiempo riego y el programa de irrigación.
- Inicio de riego basado en la condición de tiempo, radiación acumulada, VPD, por horario o manual.
- Permite operar sistemas adicionales en el cabezal de riego como filtros automáticos, agitadores de aire, etc.
- Protege el cultivo y el sistema hidráulico por medio de alarmas.
- Provee un historial por riego, por día y acumulativo a partir de una fecha deseada.

### / Especificaciones de hardware

- ✓ Salidas - 24VCA - hasta 64 (en módulos de 8).
- ✓ Salidas - Contacto de relé - hasta 64 (en módulos de 8).
- ✓ Salidas - DC Latch (pulsos) - hasta 256 (por un solo cable).
- ✓ Entradas - Digital/pulsos - hasta 16 (en módulos de 8).
- ✓ Entradas - analógicas - hasta 22 (en módulos de 11).

### / Especificaciones de software

- ✓ Hasta 15 programas de riego.
- ✓ Hasta 40 válvulas por programa de riego (en serie o en grupos).
- ✓ Hasta 10 programas de dosificación.
- ✓ Método de dosificación independiente por canal: pasivo, CE/pH.
- ✓ Medición doble de CE/pH: verifica las lecturas de los sensores en refuerzo de la confiabilidad.
- ✓ Medición del drenaje, hasta 8 medidores.
- ✓ Lavado de hasta 24 filtros con válvula principal de filtros.

#### → NÚMEROS DE CATÁLOGO

NÚMEROS DE CATÁLOGO	DESCRIPCIÓN	OBSERVACIONES
74340-XXXXXX	NMC PRO - SMALL	NMC PRO - 11 ANALOG INPUTS, 8 DIGITAL INPUTS, 24 OUTPUTS, RADIONET AND SINGLENET (OPTIONAL)
74340-XXXXXX	NMC PRO - MEDIUM	NMC PRO - 11 ANALOG INPUTS, 8 DIGITAL INPUTS, 40 OUTPUTS, RADIONET AND SINGLENET (OPTIONAL)
74340-XXXXXX	NMC PRO - LARGE	NMC PRO - 11 ANALOG INPUTS, 8 DIGITAL INPUTS, 64 OUTPUTS, RADIONET AND SINGLENET (OPTIONAL)
74340-XXXXXX	NMC PRO - GIANT	NMC PRO - 11 ANALOG INPUTS, 8 DIGITAL INPUTS, UP TO 256 OUTPUTS, RADIONET AND SINGLENET (OPTIONAL)

Para obtener un número específico de SAP, póngase en contacto con nuestro servicio de ventas atención al cliente.



→ ¿Quieres saber más?  
[netafim.mexico@netafim.com](mailto:netafim.mexico@netafim.com)

### 6.3.5. Electroválvula de Riego (24V)

Especificaciones hidráulicas y eléctricas del actuador encargado de dar paso al agua hacia el sector de Vitis vinifera.



Tech Spec

## PGA Series Valves

Versatility at an affordable price.

Whether the job calls for a globe or angle valve, PGA Series valves are the right choice. Loaded with features, these heavy-duty PVC valves are economical, easy to install and built to withstand constant 150 psi (10.35 bar) pressure and 2 to 150 gpm (0.45 to 34.05 m<sup>3</sup>/h; 7.8 to 568 l/m) flows.

The PGA Series from Rain Bird – built to last... and last!

### Features

- Globe and angle configuration for flexibility in design and installation
- PVC and glass reinforced nylon construction
- Filtered pilot flow to resist debris and clogging of solenoid ports
- Slow closing to prevent water hammer and subsequent system damage
- Manual internal bleed operates the valve without allowing water into the valve box
- One-piece solenoid design with captured plunger and spring for easy servicing
- Prevents loss of parts during field service
- Non-rising flow control handle adjusts water flows as needed
- Normally closed, forward flow design

### Options (order separately)

- Accommodates optional, field installed PRS-D pressure regulating module
- Optional purple flow control handle for easy identification of non-potable water system
  - PGA-NP-HAN (1" and 1½")
  - PGA-NP-HAN2 (2")
- Accepts latching solenoid for use with Rain Bird battery-operated controllers up to 150 psi (10.35 bar)
- Compatible with ESP-LXD decoders

### Operating Range

- Pressure: 15 to 150 psi (1.04 to 10.35 bar)
- Flow: 2 – 150 gpm (0.45 to 34.05 m<sup>3</sup>/h; 7.8 to 568 l/m)
- Flow with PRS-D: 5 – 150 gpm (1.14 to 34.05 m<sup>3</sup>/h; 19.2 to 568 l/m)
- Water Temperature: up to 110° F (43° C)
- Ambient Temperature: up to 125° F (52° C)

### Electrical Specifications

- Power: 24 VAC 50/60 Hz (cycles/sec) solenoid

- Inrush current: 0.41 A (9.84 VA) at 60 Hz
- Holding current: 0.14A (3.43 VA) at 60 Hz
- Coil resistance: 30-39 Ohms

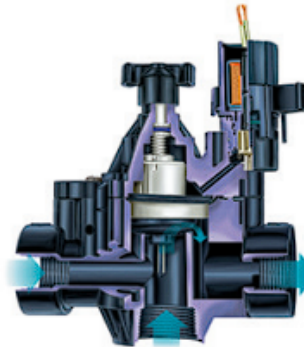
### Models

- 100PGA 1" (26/34)
- 150PGA 1½" (40/49)
- 200PGA 2" (50/60)
- BSP threads available; specify when ordering.

### Dimensions

Size	Height	Length	Width
100PGA	7½" (18.4 cm)	5½" (14.0 cm)	3¼" (8.3 cm)
150PGA	8" (20.3 cm)	6½" (17.2 cm)	3½" (8.9 cm)
200PGA	10" (25.4 cm)	7½" (19.7 cm)	5" (12.7 cm)

Note: The PRS-D option adds 2" (5.1 cm) to valve height.



PGA Series Valve Pressure Loss (psi)							
Flow gpm	100-PGA Globe 1"	100-PGA Angle 1"	150-PGA Globe 1½"	150-PGA Angle 1½"	200-PGA Globe 2"	200-PGA Angle 2"	
1	5.1	4.3	-	-	-	-	
5	5.5	5.0	-	-	-	-	
10	5.9	5.5	-	-	-	-	
20	6.0	5.6	-	-	-	-	
30	6.4	5.5	1.9	1.3	-	-	
40	7.0	7.5	3.2	2.0	1.2	1.0	
50	-	-	4.8	3.0	1.5	0.9	
75	-	-	11.1	6.5	3.0	1.7	
100	-	-	19.2	11.7	5.5	3.0	
125	-	-	-	-	8.6	4.8	
150	-	-	-	-	12.0	6.5	

PGA Series Valve Pressure Loss (bar)							
Flow m <sup>3</sup> /h	Flow l/m	100-PGA Globe 2.5cm	100-PGA Angle 2.5cm	150-PGA Globe 3.8cm	150-PGA Angle 3.8cm	200-PGA Globe 5.1cm	200-PGA Angle 5.1cm
0.23	3.8	0.35	0.30	-	-	-	-
0.6	10	0.36	0.32	-	-	-	-
1.2	20	0.38	0.35	-	-	-	-
3	50	0.41	0.38	-	-	-	-
6	100	0.43	0.38	0.10	0.07	-	-
9	150	0.48	0.51	0.22	0.14	0.08	0.07
12	200	-	-	0.38	0.23	0.12	0.07
15	250	-	-	0.61	0.36	0.17	0.10
18	300	-	-	0.85	0.51	0.24	0.13
21	350	-	-	1.16	0.70	0.33	0.18
24	400	-	-	-	-	0.43	0.23
27	450	-	-	-	-	0.54	0.30
30	500	-	-	-	-	0.66	0.36
34	568	-	-	-	-	0.83	0.45

### Notes

- Loss values are with flow control fully open.
- PRS-D module recommended for all flow ranges.

### Recommendations

- Rain Bird recommends flow rates in the supply line not to exceed 7.5 ft./sec. (2.29 m/s) in order to reduce the effects of water hammer.
- For flows below 5 gpm (1.14 m<sup>3</sup>/h; 19.2 l/m), Rain Bird recommends use of upstream filtration to prevent debris from collecting below the diaphragm.
- For flows below 10 gpm (2.27 m<sup>3</sup>/h; 37.8 l/m) Rain Bird recommends the flow control stem be turned down two full turns from the fully open position.

PGA Series Temperature Rating	
Water Temp.	Continuous Pressure
73° F (23° C)	150 psi (10.40 bar)
80° F (27° C)	132 psi (9.10 bar)
90° F (32° C)	112 psi (7.70 bar)
100° F (38° C)	93 psi (6.40 bar)
110° F (43° C)	75 psi (5.20 bar)

### How To Specify

100	-	PGA	-	PRS-D
Size		Model		Optional Feature
100: 1" (26/34)		PGA		PRS-Dial pressure regulating module (must be ordered separately)
150: 1½" (40/49)				
200: 2" (50/60)				

Note: Valve and PRS-Dial module must be ordered separately. For non-U.S. applications, it is necessary to specify NPT or BSP thread type.

## Specifications

The electric remote control valve shall be a normally closed 24 VAC 50/60 Hz (cycles/sec) solenoid actuated globe/angle pattern design. The valve pressure rating shall not be less than 150 psi (10.35 bar). The valve shall have the following characteristics (circle one):

Flow rate: \_\_\_\_\_ gpm    m<sup>3</sup>/h    l/m

Pressure loss not to exceed: \_\_\_\_\_ psi    bar

The valve body and bonnet shall be constructed of high-impact, water-resistant PVC for the body and glass-filled nylon for the bonnet with stainless steel screws.

The valve shall have manual open/close control (internal bleed) for manual opening and closing of valve without electrically energizing the solenoid. The valve's internal bleed shall prevent flooding of the valve box.

The valve shall house a fully-encapsulated, one-piece solenoid. The solenoid shall have a captured plunger with a removable retainer for easy servicing, and a leverage handle for easy turning. This 24 VAC 50/60 Hz solenoid shall open with 19.6 VAC minimum at 150 psi (10.35 bar). At 24 VAC, average inrush current shall not exceed 0.41 amps. Average holding current shall not exceed 0.28 amps.

The valve shall have a flow control stem for accurate manual regulation and/or shut off of outlet flow. The valve must open or close in less than 1 minute at 150 psi (10.35 bar), and less than 30 seconds at 20 psi (1.38 bar).

The valve construction shall provide for all internal parts to be removable from the top of the valve without disturbing the valve installation. The body shall have a removable O-ringed plug for installation in either globe or angle configuration.

## Optional Feature Specification

### PRS-D Pressure Regulating Module 100PGA-PRS-D, 150PGA-PRS-D, 200PGA-PRS-D

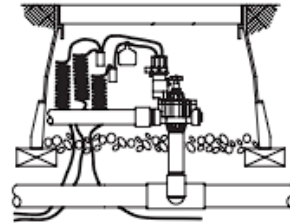
When so indicated on the design, the electric remote control valve shall have a pressure regulating module (PRS-D) capable of regulating outlet pressure between 15 and 100 psi ( $\pm 3$  psi) (1.04 and 6.90 bar ( $\pm 0.21$  bar)).

The PRS-D module shall have an adjusting knob for setting pressure and Schrader valve connection for monitoring pressure. The pressure shall be adjustable from the PRS-D when the valve is internally manually bled or electrically activated.

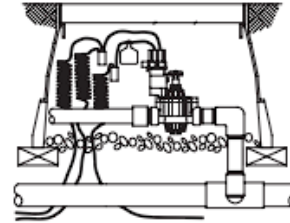
### Non-Potable Flow Control Handle PGA-NP-HAN1 - Fits 1" and 1 1/2" PGA-NP-HAN2 - Fits 2"

When so indicated on the design, the valve shall have a purple flow control handle to indicate to the user that non-potable water is being used. There shall be no difference between the black and purple handles except for the color.

Plastic Electric Remote Control  
PGA Valve (with PRS-D) using bottom inlet



Plastic Electric Remote Control  
PGA Valve (with PRS-D) using side inlet



**Rain Bird Corporation**  
6991 E. Southpoint Road  
Tucson, AZ 85756  
Phone: (520) 741-6100  
Fax: (520) 741-6522

**Rain Bird Technical Services**  
(800) RAINBIRD (1-800-724-6247)  
(U.S. and Canada)

**Rain Bird Corporation**  
970 West Sierra Madre Avenue  
Azusa, CA 91702  
Phone: (626) 812-3400  
Fax: (626) 812-3411

**Specification Hotline**  
800-458-3005 (U.S. and Canada)

**Rain Bird International, Inc.**  
1000 West Sierra Madre Ave.  
Azusa, CA 91702  
Phone: (626) 963-9311  
Fax: (626) 852-7343

The Intelligent Use of Water™  
[www.rainbird.com](http://www.rainbird.com)

### 6.3.6. Geomembrana de Polietileno de Alta Densidad (HDPE 1.5 mm)

Especificaciones técnicas del revestimiento impermeable utilizado en la construcción del estanque de acumulación de 195 m<sup>3</sup>, garantizando la retención segura del volumen hídrico dimensionado.



## Product Data Sheet

### GSE HD Geomembranes

GSE HD is a smooth, high quality, high density polyethylene (HDPE) geomembrane produced from specially formulated, virgin polyethylene resin. This polyethylene resin is designed specifically for flexible geomembrane applications. It contains approximately 97.5% polyethylene, 2.5% carbon black and trace amounts of antioxidants and heat stabilizers; no other additives, fillers or extenders are used. GSE HD has outstanding chemical resistance, mechanical properties, environmental stress crack resistance, dimensional stability and thermal aging characteristics. GSE HD has excellent resistance to UV radiation and is suitable for exposed conditions. *These product specifications meet or exceed GRI GM13.*

#### Product Specifications

TESTED PROPERTY	TEST METHOD	FREQUENCY	MINIMUM VALUE				
<b>Product Code</b>			HDE 030A000	HDE 040A000	HDE 060A000	HDE 080A000	HDE 100A000
Thickness, (minimum average) mil (mm) Lowest individual reading (-10%)	ASTM D 5199	every roll	30 (0.75) 27 (0.69)	40 (1.00) 36 (0.91)	60 (1.50) 54 (1.40)	80 (2.00) 72 (1.80)	100 (2.50) 90 (2.30)
Density, g/cm <sup>3</sup>	ASTM D 1505	200,000 lb	0.94	0.94	0.94	0.94	0.94
Tensile Properties (each direction)	ASTM D 6693, Type IV Dumbbell, 2 ipm	20,000 lb	114 (20) 63 (11)	152 (27) 84 (15)	228 (40) 126 (22)	304 (53) 168 (29)	380 (67) 210 (37)
Strength at Break, lb/in-width (N/mm)							
Strength at Yield, lb/in-width (N/mm)							
Elongation at Break, %	G.L. 2.0 in (51 mm)		700	700	700	700	700
Elongation at Yield, %	G.L. 1.3 in (33 mm)		12	12	12	12	12
Tear Resistance, lb (N)	ASTM D 1004	45,000 lb	21 (93)	28 (125)	42 (187)	56 (249)	70 (311)
Puncture Resistance, lb (N)	ASTM D 4833	45,000 lb	54 (240)	72 (320)	108 (480)	144 (640)	180 (800)
Carbon Black Content, %	ASTM D 1603*/4218	20,000 lb	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
Carbon Black Dispersion	ASTM D 5596	45,000 lb	+Note 1	+Note 1	+Note 1	+Note 1	+Note 1
Notched Constant Tensile Load, hr	ASTM D 5397, Appendix	200,000 lb	300	300	300	300	300
REFERENCE PROPERTY	TEST METHOD	FREQUENCY	NOMINAL VALUE				
Oxidative Induction Time, min	ASTM D 3895, 200° C; O <sub>2</sub> , 1 atm	200,000 lb	>100	>100	>100	>100	>100
Roll Length <sup>(1)</sup> (approximate), ft (m)			1,120 (341)	870 (265)	560 (171)	430 (131)	340 (104)
Roll Width <sup>(1)</sup> , ft (m)			22.5 (6.9)	22.5 (6.9)	22.5 (6.9)	22.5 (6.9)	22.5 (6.9)
Roll Area, ft <sup>2</sup> (m <sup>2</sup> )			25,200 (2,341)	19,575 (1,819)	12,600 (1,171)	9,675 (899)	7,650 (711)

#### NOTES:

- +Note 1: Dispersion only applies to near spherical agglomerates. 9 of 10 views shall be Category 1 or 2. No more than 1 view from Category 3.
- GSE HD is available in rolls weighing about 3,900 lb (1,769 kg)
- All GSE geomembranes have dimensional stability of ±2% when tested with ASTM D 1204 and ITB of <77° C when tested with ASTM D 746.
- <sup>(1)</sup>Roll lengths and widths have a tolerance of ± 1%.
- \*Modified.

DS005 HD R01/07/08

This information is provided for reference purposes only and is not intended as a warranty or guarantee. GSE assumes no liability in connection with the use of this information. Please check with GSE for current, standard minimum quality assurance procedures and specifications.

GSE and other trademarks in this document are registered trademarks of GSE Lining Technology, Inc. in the United States and certain foreign countries.

#### **6.4. Datos Climáticos y Recurso Solar (Explorador Solar)**

En este anexo se adjunta el reporte oficial del Ministerio de Energía de Chile para las coordenadas del proyecto. Estos datos validan la radiación global horizontal (GHI) utilizada en la simulación fotovoltaica y confirman la baja velocidad del viento que justificó la selección de una arquitectura 100% solar.



# EXPLORADOR SOLAR

## Reporte Recurso Solar y datos meteorológicos



---

# Reporte

## Recurso solar y datos meteorológicos

11/12/2025

### 1 Introducción

En este reporte se presenta información sobre el recurso solar basada en la modelación numérica de la transferencia de radiación solar en la atmósfera y en datos satelitales de alta resolución. El producto obtenido ha sido validado con observaciones, sin embargo, no debe ser considerado como definitivo antes de ser corroborado con mediciones in situ.

El modelo utilizado para la transferencia radiativa en cielo despejado es el modelo CLIRAD-SW, el cual considera las interacciones de la radiación con la atmósfera por bandas espectrales de manera independiente. El modelo utiliza datos de temperatura, humedad y aerosoles de reanálisis meteorológicos y datos climatológicos de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> y O<sub>3</sub>.

La información para la nubosidad que se ha utilizado proviene de los satélites GOES-EAST para los años 2004 a 2016. Con esta base de datos se ha identificado la nubosidad y sus características radiativas, y a través de un modelo empírico se ha modificado el resultado obtenido para una atmósfera con cielo despejado para adaptarlo a una condición de cielo nublado.

A continuación encontrará información sobre la radiación (global, directa y difusa), la nubosidad, las sombras proyectadas por la topografía, la temperatura y la velocidad del viento en el sitio seleccionado.

### 2 Sitio

En esta sección se muestran las características topográficas del sitio escogido por el usuario.

Tabla 1: Ubicación del sitio seleccionado

<b>Nombre</b>	Mi Sitio
<b>Latitud</b>	30.5725 °S
<b>Longitud</b>	71.1983 °O
<b>Elevación</b>	275 m

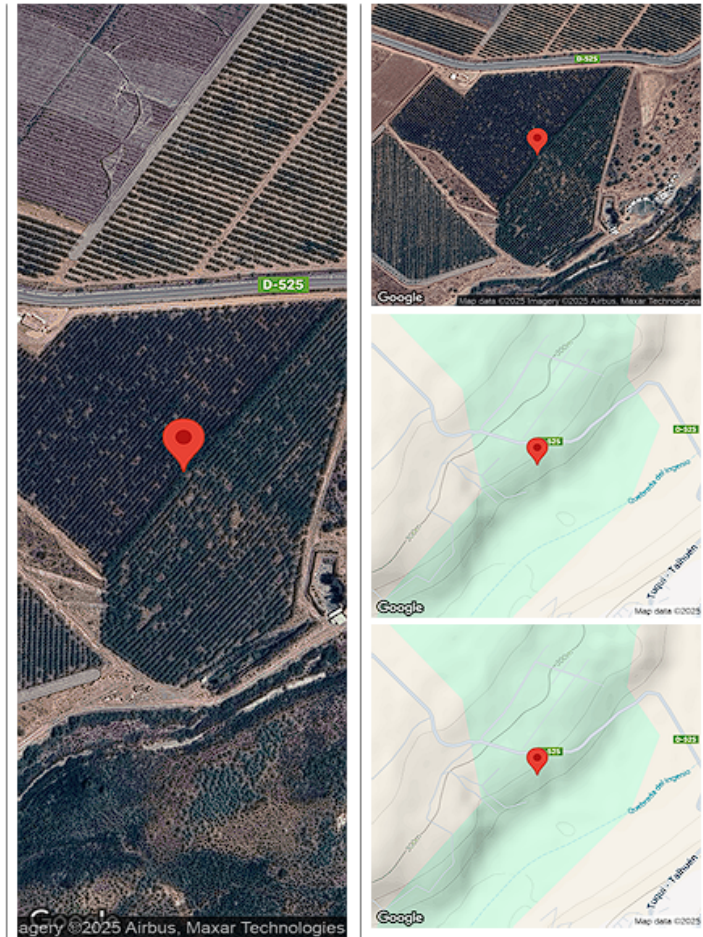


Figura 1: Mapas del sitio seleccionado

### 3 Características meteorológicas del sitio

#### 3.1 Radiación

Las siguientes tablas y gráficos muestran los promedios de la radiación global, directa y difusa incidente sobre un plano horizontal y sobre un plano orientado hacia el norte, con una inclinación igual a la latitud del sitio.

##### 3.1.1 Insolación mensual

Tabla 3: Promedio mensual de la insolación diaria en unidades de  $[kWh/m^2/día]$ .

Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
<b>Directa</b>	7.67	7.01	5.65	3.79	2.55	2.18	2.26	3.03	4.18	5.65	7.01	7.88
<b>Difusa</b>	1.04	0.9	0.83	0.88	0.77	0.63	0.72	0.87	1.12	1.35	1.21	1.04
<b>Global</b>	8.71	7.91	6.48	4.67	3.32	2.81	2.98	3.9	5.3	7.0	8.22	8.92

(a) Radiación incidente en el plano horizontal

Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
<b>Directa</b>	6.62	6.77	6.39	5.09	4.0	3.67	3.69	4.31	5.02	5.75	6.27	6.58
<b>Difusa</b>	0.97	0.84	0.77	0.82	0.71	0.59	0.67	0.81	1.04	1.25	1.12	0.97
<b>Suelo</b>	0.15	0.14	0.11	0.08	0.06	0.05	0.05	0.07	0.09	0.12	0.14	0.15
<b>Global</b>	7.74	7.75	7.27	5.99	4.77	4.31	4.41	5.19	6.15	7.12	7.53	7.7

(b) Radiación incidente en un plano con inclinación igual a la latitud del sitio.

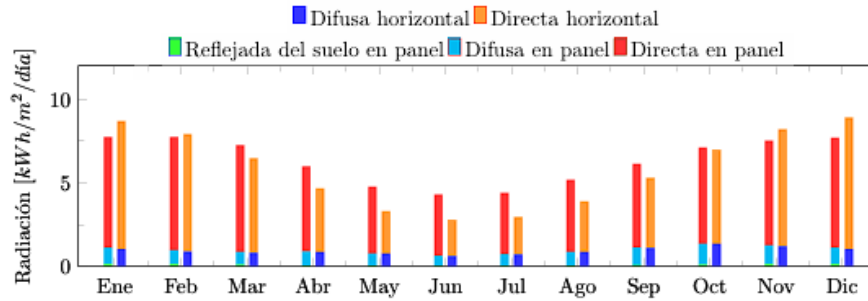


Figura 4: Promedio mensual de la insolación diaria incidente en un plano horizontal y en un plano inclinado, separada en sus componentes directa, difusa y reflejada del suelo.