

Reserva hídrica adaptativa para estanques de riego con bombeo solar

Propuesta de automatización para pequeños predios: control de nivel con referencia variable

Autor	Rodrigo Ignacio Núñez Huaiquir
Correo	r.nunez04@ufromail.cl
Fecha	30 de septiembre de 2026
Sistema	Control de nivel y reserva de agua en un estanque de riego alimentado por bomba solar

Resumen

Este informe propone y caracteriza una solución de automatización para pequeños predios agrícolas que acumulan agua en un estanque y la bombean con energía solar: un lazo de control de nivel cuya referencia no es fija, sino que se recalcula a partir del pronóstico de demanda de riego, de la generación solar prevista y del calendario de abastecimiento externo. Se revisaron soluciones existentes (monitores de estanques con reglas de bombeo, controladores de riego con pronóstico, sistemas de bombeo solar y desarrollos académicos) y se delimitó la diferencia: los componentes individuales ya existen; la propuesta consiste en tratar la reserva como una variable de referencia calculada y seguirla con un controlador proporcional integral con prefiltro y antiacumulación integral. El estanque se modeló como un integrador ($A = 5 \text{ m}^2$) y se simuló un cambio de referencia de 0,80 a 1,40 m. Con la sintonía propuesta no hay sobreimpulso, el nivel alcanza el 90 % del cambio en 32 min y entra en una banda de 2 % en 49 min, con un caudal máximo ordenado de 2,21 L/s frente a un límite de 2,5 L/s. En un escenario con bomba al 85 % de su caudal y un consumo de riego de 0,4 L/s, el lazo abierto termina 0,378 m bajo la referencia y el lazo cerrado 0,017 m sobre ella. Los resultados provienen de simulación con parámetros supuestos; la operación real y el valor económico requieren validación experimental y comercial.

Palabras clave: control de nivel, reserva de agua, bombeo solar, riego, lazo cerrado, controlador PI, emprendimiento.

1 Introducción

Muchos predios pequeños dependen de un estanque que se llena con una bomba alimentada por paneles solares, con agua de pozo, noria o canal, o con camiones aljibe. La reserva que se mantiene suele decidirse a criterio del operador o con interruptores de nivel fijos. Un nivel fijo no distingue entre una semana fresca y despejada y una ola de calor seguida de días nublados, en la que la demanda sube y la generación solar baja.

En Chile el riesgo de quedarse sin reserva es concreto. Funcionarios de INDAP describen una sequía estructural de más de una década en la que la gestión del agua se vuelve crítica (BioBioChile, 2022), y en algunas localidades el camión aljibe pasa solo una o dos veces al mes, de modo que los estanques sirven para guardar esa agua (Portal Frutícola, s. f.). Además, el bombeo solar para agua y riego se ha promovido en el país desde 2008 y se asocia sobre

todo a la pequeña agricultura (CEPAL, s. f.), lo que sugiere una base instalada de bombas y estanques sobre la cual podría agregarse una capa de control.

Un lazo de control de nivel permite mantener una referencia a pesar de perturbaciones, como se vio en el Informe 5, donde la realimentación compara la salida con la referencia y actúa sobre el error (Ogata, 2010). Este informe amplía ese caso: la referencia deja de ser un número fijo y pasa a ser el resultado de una política de reserva, y el estanque se modela como un integrador porque su salida la fija el riego y no el propio nivel.

2 Objetivo

Proponer y caracterizar una solución de automatización para la reserva de agua de un estanque de riego con bombeo solar, delimitando su diferencia respecto de soluciones existentes, definiendo sus variables y supuestos, representando su operación en lazo abierto y en lazo cerrado, e interpretando una respuesta temporal simulada e identificando las decisiones técnicas y las validaciones que faltarían para convertirla en una oportunidad de emprendimiento.

3 Metodología

Se eligió la Alternativa B de la pauta de la Semana 06 (Alarcón, 2026b). El trabajo siguió tres pasos: revisión de soluciones existentes, construcción de un modelo matemático con su simulación y representación mediante diagramas de bloques.

3.1 Búsqueda de soluciones existentes

El 30 de septiembre de 2026 se realizaron tres búsquedas web con el buscador integrado del asistente de IA: una en inglés sobre controladores de nivel de estanques con pronóstico y bombeo solar, y dos en español sobre acumulación de agua en la pequeña agricultura chilena y sobre monitoreo y telemetría de estanques. Se buscaron productos comerciales, patentes, desarrollos individuales y artículos académicos. Una solución se consideró equivalente a la propuesta solo si calculaba una referencia de nivel a partir del pronóstico y la seguía mediante realimentación. De cada resultado se analizaron los fragmentos devueltos por el buscador; no se leyeron manuales completos, no se hizo una búsqueda sistemática en bases de patentes ni se revisaron catálogos de distribuidores chilenos ni precios.

3.2 Modelo, controlador y simulación

Se adoptó un caso hipotético con parámetros ilustrativos y no medidos: estanque de área transversal $A = 5 \text{ m}^2$ (10 m^3 hasta 2 m de altura útil), nivel mínimo de protección de la bomba de 0,20 m, demanda diaria nominal de 3 m^3 y bomba solar con caudal máximo de 2,5 L/s. A diferencia del Informe 5, donde el caudal de salida dependía del nivel y el sistema era de primer orden, aquí el riego extrae un caudal independiente del nivel, por lo que el balance de volumen conduce a un integrador puro (Seborg et al., 2011). El controlador PI se sintonizó por asignación de polos para obtener un doble polo real, se agregó un prefiltro de referencia que cancela el cero del PI y se incorporó antiacumulación integral por integración condicional (Åström y Hägglund, 2006). Las simulaciones se programaron en Python con NumPy y un paso de integración de 1 s. Se simularon dos escenarios: un cambio de referencia sin perturbaciones y un escenario perturbado con bomba al 85 % de su caudal nominal y un consumo de riego de 0,4 L/s entre los 30 y los 90 min.

3.3 Uso de IA

Se utilizó Claude Sonnet 5.5 (Anthropic) en la interfaz web de Claude, con acceso a búsqueda web y a un entorno de ejecución de código. A partir de la pauta de la Semana 06 y del Informe de la Semana 05, entregados por el estudiante, se solicitó desarrollar la Alternativa B con el mismo formato del informe anterior. El modelo propuso y delimitó la idea, realizó las búsquedas, formuló y simuló el modelo, generó los diagramas y las gráficas y redactó el borrador. El estudiante definió el encargo, la pauta y el formato de referencia, y conserva la responsabilidad de la revisión, de la validación técnica y de la versión final entregada. La Tabla 1 presenta la evaluación de la distribución de contribuciones realizada por el propio modelo según el marco Ciencia Generativa (Alarcón, 2026a).

Participante	Contribuciones efectivamente realizadas
Rodrigo Ignacio Núñez Huaiquir (Humano)	Conceptualización (parcial: definición del encargo y selección de la pauta y del formato de referencia); Validación (contraste del borrador con la pauta y revisión de resultados); Revisión y edición.
Claude Sonnet 5.5, Anthropic (IA)	Conceptualización (propuesta y delimitación de la idea); Metodología (diseño del modelo, de la sintonía y de los escenarios); Investigación (búsqueda y selección de fuentes); Análisis formal (modelo, controlador y simulación numérica); Visualización (diagramas y gráficas); Redacción del borrador original; Revisión y edición (verificación de coherencia numérica y de formato).

Tabla 1. Distribución de contribuciones evaluada por la IA según la interacción realizada.

Al contrastar esa evaluación con el trabajo efectivamente realizado, se mantiene la asignación a la IA de la mayor parte de la investigación, el análisis formal, la visualización y la redacción, porque el estudiante no ejecutó esas tareas en esta interacción. La Conceptualización se declara compartida con mayor peso de la IA: la idea de la reserva adaptativa fue propuesta por el modelo y no por el estudiante. La validación humana se limita a revisar la coherencia con la pauta y con los resultados; no incluye validación experimental ni de mercado, ni una verificación independiente de las fuentes consultadas. Los valores numéricos provienen de código ejecutado y no de estimaciones de memoria del modelo.

4 Resultados

4.1 Problema, beneficiarios y solución propuesta

Problema. La reserva de un estanque de riego se gestiona con umbrales fijos o con decisiones manuales. Cuando coinciden más demanda de riego, menos generación solar y una fuente de abastecimiento intermitente, el estanque puede vaciarse; cuando se sobredimensiona la reserva de forma permanente, se pierde la posibilidad de usar mejor las horas de sol y se aumenta el riesgo de rebalse.

Beneficiarios. Productores hortícolas y de invernadero con estanque propio y bomba solar, comunidades que acopian agua del camión aljibe y asesores técnicos de riego que hoy deben revisar el predio para decidir cuándo reponer agua.

Solución. Un controlador de reserva adaptativa con tres capas: (i) un calculador que define el nivel objetivo r a partir del pronóstico de demanda de riego, los días de autonomía N que se desean cubrir y el calendario de abastecimiento externo; (ii) un lazo de nivel con controlador PI que lleva el estanque a ese objetivo con la bomba solar, respetando su límite de caudal; y (iii) protecciones independientes de nivel alto y bajo. La referencia se calcula con la ecuación (1), donde h_{min} es el nivel mínimo de protección, N los días de autonomía, $\hat{D}$ la demanda diaria pronosticada y A el área del estanque.

$$r = h_{min} + \frac{N\hat{D}}{A} \quad (1)$$

Con los parámetros del caso, la condición nominal ($N = 1$ día, $\hat{D} = 3 \text{ m}^3/\text{d}$) da $r = 0,80 \text{ m}$. Si el pronóstico anuncia una ola de calor con días nublados ($N = 1,5$ días, $\hat{D} = 4 \text{ m}^3/\text{d}$), la referencia sube a $1,40 \text{ m}$, es decir, un escalón de $0,60 \text{ m}$ equivalente a $3,0 \text{ m}^3$.

Valor económico (cualitativo). No se dispone de datos de costos ni de disposición a pagar, por lo que el valor se plantea como hipótesis: evitar pérdidas de cultivo por falta de agua en días críticos, evitar compras de emergencia de agua, proteger la bomba de la marcha en seco y reducir visitas al predio para revisar niveles. Ninguno de estos beneficios fue cuantificado.

4.2 Soluciones existentes y diferencia propuesta

La Tabla 2 resume las soluciones revisadas. En ninguna de las búsquedas realizadas se encontró un producto descrito de la manera exacta que aquí se plantea, pero varias cubren partes de la idea.

Solución (fuente)	Qué hace según la fuente	Diferencia con la propuesta
Aplicación de agua con control de bomba (Gallagher, s. f.)	Muestra niveles, integra el pronóstico de lluvia, permite el control remoto de la bomba y reglas de arranque según el nivel del estanque.	El pronóstico se muestra a la persona y las reglas son umbrales que ella define; no hay una referencia de reserva calculada.
Controladores de riego con pronóstico (Wikipedia, s. f.)	Ajustan o cancelan riegos según condiciones climáticas.	Actúan sobre el calendario de riego, no sobre la reserva del estanque.
Paquete PLC e IoT de riego con energía solar (Industrial Shields, s. f.)	Consulta el pronóstico antes de cada ciclo, lee el inversor solar y comanda la bomba con un variador.	Decide si se riega; la fuente no describe una referencia de nivel de reserva.

Solución (fuente)	Qué hace según la fuente	Diferencia con la propuesta
Patente de bombeo solar para riego mecanizado (USPTO, s. f.)	Ajusta programas de riego con la generación solar prevista y los niveles de almacenamiento.	Se dirige a máquinas de riego mecanizado, otra escala y otro uso.
Reposición de estanque con cálculo de déficit (Comunidad Rachio, s. f.)	Un usuario describe un sistema propio que calcula el déficit del estanque con humedad del suelo y pronóstico y repone agua hasta un nivel objetivo.	Es el antecedente más cercano. Es un desarrollo individual con agua de red; no describe seguimiento con PI ni manejo de los límites de la bomba.
Monitoreo y control de nivel en reservorios agrícolas ("Desarrollo de un sistema...", 2025)	Sistema con ESP32 y sensor ultrasónico para visualizar el nivel y proteger motobombas.	Protección y monitoreo; no se describe reserva dinámica.
Telemetría agropecuaria según exigencias de la DGA ("Emprendimiento de sistema de telemetría...", 2023)	Tesis sobre un emprendimiento de telemetría orientado a las exigencias de la Dirección General de Aguas.	Orientada a monitoreo y cumplimiento normativo; en el resumen consultado no se describe control de reserva.

Tabla 2. Soluciones existentes revisadas y diferencia respecto de la propuesta.

La diferencia que se propone es acotada. Los sensores, variadores, pronósticos y reglas de bombeo existen. Lo que no apareció en la búsqueda es la combinación de tres elementos: una referencia de reserva calculada con autonomía, demanda pronosticada y calendario de abastecimiento; un seguimiento con realimentación que respeta el límite de la bomba solar sin acumulación integral; y su empaquetado para pequeños predios chilenos con bombeo solar y camión aljibe. Los límites de esta afirmación son los de la búsqueda descrita en el apartado 3.1: tres consultas, fragmentos y no documentos completos, sin catálogos ni precios, de modo que no se puede descartar que exista una solución equivalente.

4.3 Definición del sistema y supuestos

La Tabla 3 identifica las variables y señales del sistema, y la Tabla 4 los parámetros del caso. La variable controlada es el nivel del estanque, la variable manipulada es el caudal de entrada de la bomba y la principal perturbación es el caudal de salida por riego.

Elemento	Símbolo	Definición y unidad
Referencia	$r(t), r_f(t)$	Reserva objetivo calculada por la ecuación (1), en m; r_f es la referencia después del prefiltro.
Salida controlada	$y(t) = h(t)$	Nivel real del agua, en m.
Error	$e(t)$	Diferencia entre la referencia filtrada y el nivel medido, en m.
Señal de control	$u(t)$	Caudal ordenado al variador, en m^3/s , limitado a $0 \leq u \leq q_{max}$.
Variable manipulada	$q_{in}(t)$	Caudal de entrada que entrega la bomba, en m^3/s .
Actuador	Variador y bomba solar	Transforma la orden de control en caudal; su caudal máximo depende de la irradiancia.
Sensor	$y_m(t)$	Transmisor continuo de nivel, escalado en m.
Perturbación	$d(t) = q_{out}(t)$	Caudal que sale del estanque por riego, evaporación o fugas, en m^3/s .

Tabla 3. Componentes, señales y unidades del sistema de reserva hídrica.

Parámetro	Valor	Observación
Área del estanque A	5 m ²	Supuesto; 10 m ³ hasta 2 m de altura útil.
Nivel mínimo h _{min}	0,20 m	Protección contra marcha en seco.
Nivel inicial h(0)	0,80 m	Reserva nominal.
Referencia final	1,40 m	Pronóstico de calor y días nublados (N = 1,5 d; D [*] = 4 m ³ /d).
Caudal máximo de la bomba q _{max}	2,5 L/s	Supuesto; en el escenario perturbado se entrega solo el 85 %.
Consumo de riego	0,4 L/s	Entre 30 y 90 min, solo en el escenario perturbado.
Sensor H(s)	1	Ideal, sin retardo, ruido ni deriva.
Sintonía PI	K _c = 0,02 m ² /s; T _i = 1000 s	Doble polo real en s = -0,002 s ⁻¹ .

Tabla 4. Parámetros supuestos del caso simulado; no son datos medidos.

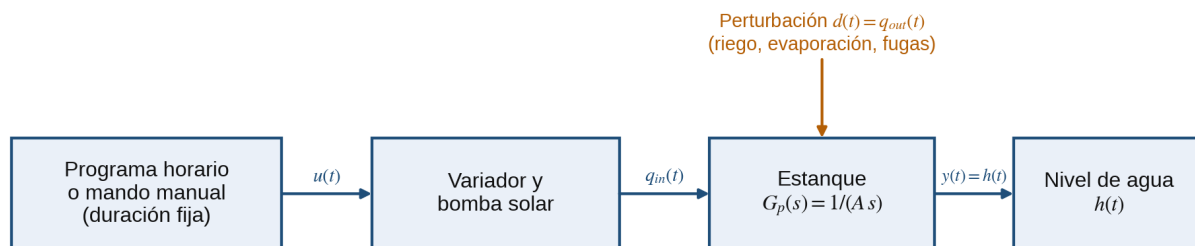
Se supuso un estanque de área constante, sin lluvia ni evaporación, un sensor ideal, una bomba lineal hasta saturar y un pronóstico que entrega la referencia sin error. El balance de volumen se expresa en la ecuación (2) y, para variaciones respecto del punto de operación, la planta resulta ser un integrador, ecuación (3).

$$A \frac{dh(t)}{dt} = q_{in}(t) - q_{out}(t) \quad (2)$$

$$G_p(s) = \frac{\Delta H(s)}{\Delta Q_{in}(s)} = \frac{1}{As} = \frac{1}{5s} \quad (3)$$

4.4 Representación en lazo abierto

La Figura 1 muestra la configuración en lazo abierto. Un programa horario o un operador fija la duración del bombeo a partir de una estimación inicial; el variador y la bomba entregan el caudal y el estanque produce el nivel. Para llevar el nivel de 0,80 a 1,40 m con la bomba a 2,5 L/s, la duración programada es de 1.200 s (20 min).



No existe medición del nivel utilizada para corregir el mando

Figura 1. Diagrama de bloques del sistema en lazo abierto. Elaboración propia con apoyo de IA.

En esta configuración no se mide nada con fines de corrección. Si la bomba entrega menos caudal que el previsto, si cambia el consumo o si el pronóstico fue incorrecto, la desviación solo se corrige cuando una persona vuelve a programar el tiempo de bombeo.

4.5 Representación en lazo cerrado

La Figura 2 incorpora realimentación negativa y el cálculo de la reserva. El calculador entrega $r(t)$ a partir del pronóstico, la demanda y el calendario de aljibe; el prefiltro suaviza esa referencia; el comparador calcula $e(t)$; el controlador PI genera $u(t)$; el variador limita el caudal y la bomba solar modifica $q_{in}(t)$; y el sensor devuelve el nivel medido $y_m(t)$. El caudal de salida actúa sobre el estanque como perturbación. Las protecciones independientes de nivel alto y bajo no se dibujan porque no forman parte del lazo.

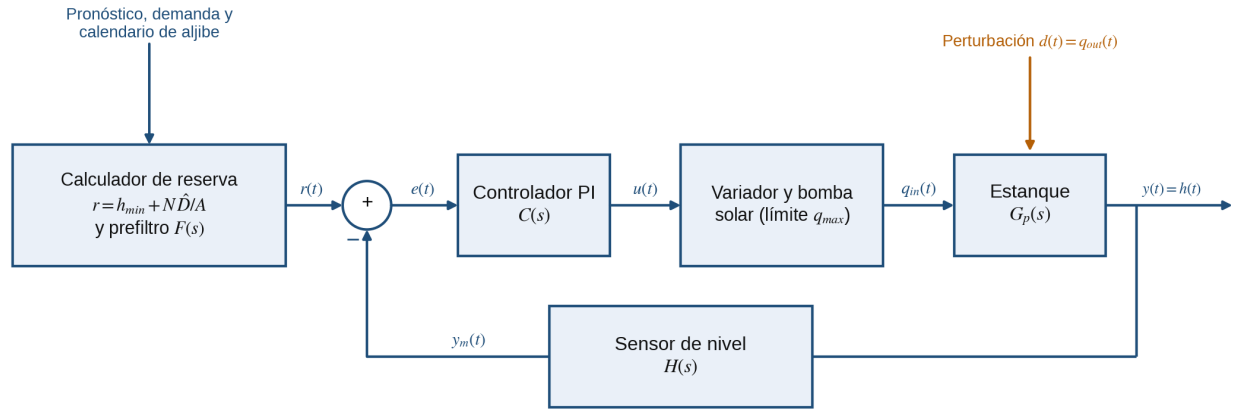


Figura 2. Diagrama de bloques del control de reserva en lazo cerrado con controlador PI y prefiltro. Elaboración propia con apoyo de IA.

El controlador PI y el prefiltro se definen en las ecuaciones (4) y (5). Con $H(s) = 1$, el lazo cerrado resultante entre la referencia y el nivel es la ecuación (6): un doble polo real en $s = -0,002 \text{ s}^{-1}$ sin ceros, porque el prefiltro cancela el cero del PI. Como el lazo contiene un integrador en la planta y otro en el controlador, un consumo constante de riego no deja error permanente en el modelo ideal.

$$C(s) = K_c \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right), \quad K_c = 0,02 \text{ m}^2/\text{s}, \quad T_i = 1000 \text{ s} \quad (4)$$

$$F(s) = \frac{1}{T_i s + 1} \quad (5)$$

$$\frac{\Delta H(s)}{\Delta R(s)} = \frac{F(s) C(s) G_p(s)}{1 + C(s) G_p(s)} = \frac{\omega_n^2}{(s + \omega_n)^2}, \quad \omega_n = 0,002 \text{ s}^{-1} \quad (6)$$

4.6 Respuesta temporal

Escenario A: cambio de referencia. La Figura 3 muestra la respuesta a un escalón de referencia de 0,80 a 1,40 m aplicado en $t = 0$, con condición inicial $h(0) = 0,80 \text{ m}$. Para la propuesta, el modelo ideal está dado por la ecuación (7), que coincide con la simulación porque el caudal ordenado no alcanza el límite de la bomba.

$$h(t) = 0,80 + 0,60 [1 - (1 + 0,002 t) e^{-0,002 t}] \text{ m}, \quad t \geq 0 \quad (7)$$

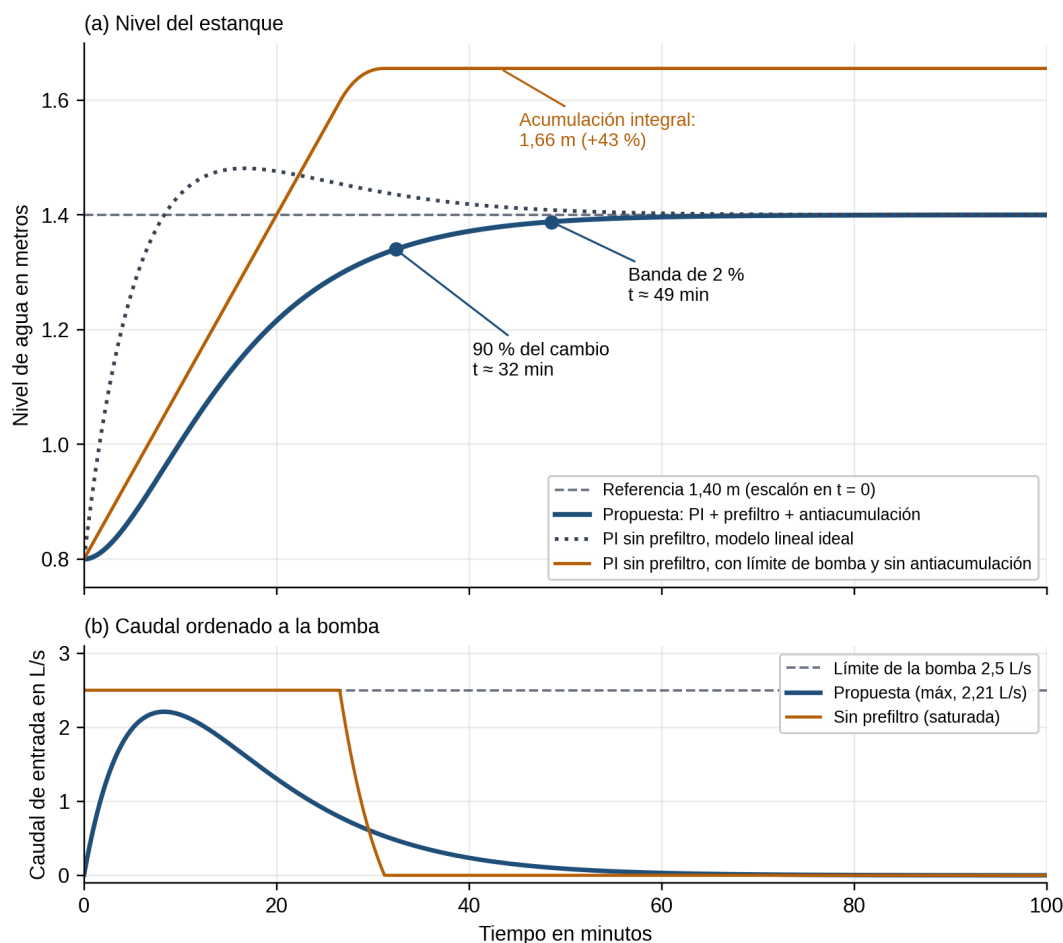


Figura 3. Respuesta simulada del nivel (a) y del caudal ordenado (b) ante un escalón de referencia de 0,80 a 1,40 m. Elaboración propia con apoyo de IA; simulación con parámetros supuestos, no son datos experimentales.

La Tabla 5 resume los indicadores. El tiempo mínimo para llenar 3,0 m³ a 2,5 L/s es de 20 min, de modo que la propuesta, que llega al 90 % en 32 min, usa una fracción del caudal disponible para no sobrepasar la referencia ni saturar la bomba.

Caso	Resultado	Observación
Propuesta: PI con prefiltro y antiacumulación	Sobreimpulso 0 %; 90 % en 32 min; banda de 2 % en 49 min; caudal máximo 2,21 L/s	El caudal máximo es el 88 % del límite de la bomba.
PI sin prefiltro, modelo lineal ideal	Sobreimpulso 13,5 % (1,481 m); banda de 2 % en 45 min	El cero del PI produce el sobreimpulso aun sin saturación.
PI sin prefiltro, con límite de bomba y con antiacumulación	Sobreimpulso 2,8 % (1,417 m); 90 % en 19 min	La bomba trabaja saturada durante el llenado inicial.
PI sin prefiltro, con límite de bomba y sin antiacumulación	Nivel máximo 1,655 m (+43 % del escalón)	La bomba no puede extraer agua, por lo que el exceso no se corrige.

Tabla 5. Indicadores de la respuesta a escalón de referencia.

Escenario B: perturbaciones. La Figura 4 compara el lazo abierto, con bombeo programado de 20 min, y el lazo cerrado cuando la bomba entrega el 85 % de su caudal y entre los 30 y los 90 min el riego extrae 0,4 L/s. La Tabla 6 reúne los niveles en instantes seleccionados.

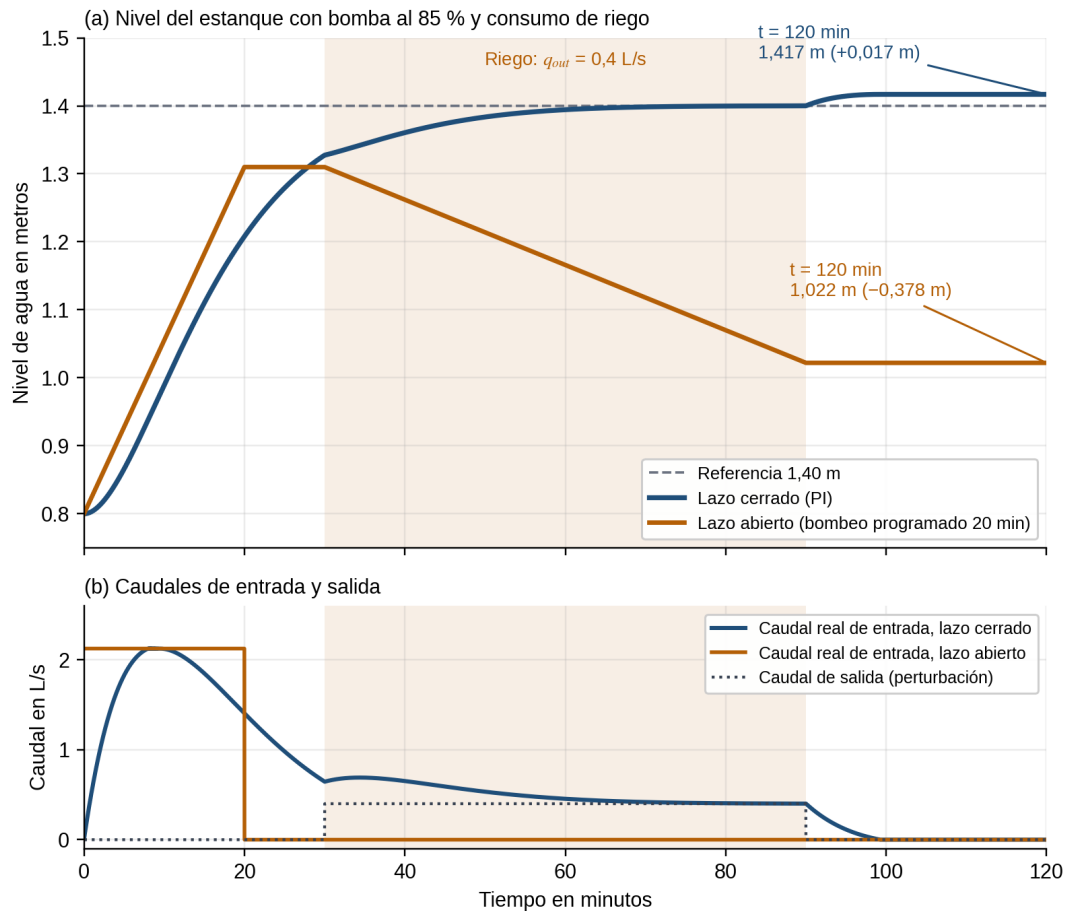


Figura 4. Respuesta simulada en lazo abierto y en lazo cerrado con bomba al 85 % y consumo de riego de 0,4 L/s entre 30 y 90 min. Elaboración propia con apoyo de IA; simulación con parámetros supuestos, no son datos experimentales.

Tiempo	Lazo abierto	Lazo cerrado
20 min	1,310 m	1,208 m
30 min	1,310 m	1,327 m
60 min	1,166 m	1,394 m
90 min	1,022 m	1,400 m
120 min	1,022 m (error -0,378 m, equivalente a -1,89 m³)	1,417 m (error +0,017 m, equivalente a +0,085 m³)

Tabla 6. Nivel simulado en el escenario perturbado; la referencia es 1,40 m.

En lazo abierto el nivel queda 0,09 m bajo la referencia al terminar el bombeo, porque la bomba entrega menos de lo previsto, y desciende otros 0,29 m durante el riego sin que nada lo corrija. En lazo cerrado el controlador prolonga el bombeo, compensa el consumo y mantiene el nivel en torno a 1,40 m. El exceso final de 0,017 m se debe a la acción integral acumulada durante el riego y decae una vez terminada la perturbación.

4.7 Decisiones técnicas y validaciones pendientes

La Tabla 7 separa las decisiones técnicas que permitirían operar la solución de las validaciones que se requerirían antes de emprender.

Ámbito	Decisión técnica para operar	Validación pendiente
Medición	Transmisor continuo de nivel (hidrostático sumergible o ultrasónico) con salida 4–20 mA y señal de falla.	Calibrar en el estanque real; medir el área efectiva; evaluar ruido, temperatura y suciedad.
Actuador	Bomba solar con variador y límite de caudal ordenado; caudal máximo en función de la irradiancia.	Medir la curva de caudal contra irradiancia; el 85 % usado es una hipótesis.
Control	PI con prefiltro y antiacumulación; recálculo de la referencia a intervalos fijos; nivel mínimo h_{min} .	Identificar la planta con un ensayo de escalón; verificar no linealidades y ajustar la sintonía.
Reserva	Definir N y D' con el pronóstico local y el calendario de abastecimiento; margen configurable por el usuario.	Calidad del pronóstico local; estimar D' con datos reales de consumo; la referencia no crea agua si la fuente es insuficiente.
Seguridad	Boyas independientes de nivel alto y bajo; parada en seco; estado seguro si falla el sensor; operación autónoma sin conexión.	Pruebas con fallas inyectadas del sensor, de la bomba y de la conexión.
Comercial	Definir si se vende equipo, instalación o servicio con suscripción.	Entrevistas con productores; disposición a pagar; costo frente a la pérdida evitada; comparación con productos existentes; fuentes de apoyo y requisitos normativos.

Tabla 7. Decisiones técnicas para operar la solución y validaciones pendientes.

5 Discusión

Los resultados muestran que, en el modelo, el diseño del seguimiento importa tanto como la presencia de realimentación. Con un PI sin prefiltro el cero del controlador produce un sobreimpulso de 13,5 % aun sin saturación, y cuando la bomba satura la acumulación integral lleva el nivel a 1,655 m, lo que en un estanque real implicaría riesgo de rebalse. El prefiltro y la antiacumulación evitan ambos efectos a costa de una respuesta más lenta que el mínimo físico: 32 min hasta el 90 % frente a 20 min como cota inferior. Esa lentitud es aceptable si la reserva se reajusta con horas de anticipación, pero no si se necesitara reaccionar a una emergencia en minutos.

En el escenario perturbado, el lazo abierto termina 1,89 m³ por debajo de lo previsto, más de la mitad de la demanda diaria nominal de 3 m³, sin ninguna advertencia. El lazo cerrado mantiene el nivel porque usa la medición. Esa ventaja depende de que el sensor sea confiable, de modo que las protecciones independientes no son un complemento opcional.

Conviene distinguir la viabilidad técnica de la oportunidad económica. Técnicamente, los componentes necesarios (transmisores de nivel, variadores, controladores y pronósticos) existen y el algoritmo es simple; aun así, la viabilidad no está comprobada, porque el integrador, la bomba lineal, el pronóstico sin error y el sensor ideal son supuestos. Económicamente, no hay evidencia propia: no se midió disposición a pagar ni costos, y las soluciones de la Tabla 2 ya cubren partes de la idea, de modo que un fabricante establecido podría incorporar una función similar como parte de su aplicación. Incluso el mejor caso técnico no demuestra que exista un mercado dispuesto a pagar por esta diferencia.

El modelo y la búsqueda tienen límites. La reserva objetivo no crea agua: si la fuente es insuficiente, el controlador solo saturará la bomba. La demanda real de riego depende del cultivo, del suelo y de decisiones del productor, que no se modelaron. El área del estanque puede no ser constante, el sensor puede tener ruido y la irradiancia cambia el caudal disponible durante el día. La búsqueda de soluciones fue acotada y basada en fragmentos, de modo que la diferencia declarada es una conclusión provisional.

En cuanto al uso real de la IA, el modelo propuso la idea, buscó las fuentes, programó el modelo, ejecutó las simulaciones y redactó el borrador. Fue útil para comparar rápidamente variantes de la sintonía, como el efecto del prefiltro y de la antiacumulación, y para mantener consistentes los valores numéricos del texto, las tablas y las figuras. Su principal riesgo es presentar una simulación con parámetros supuestos como si fuera una medición, por lo que cada figura y tabla lo declara. El estudiante debe verificar las fuentes, contrastar los supuestos con casos reales y decidir qué se mantiene en la versión final.

6 Conclusiones

Se propuso un controlador de reserva adaptativa para estanques de riego con bombeo solar. Su idea central es que el nivel objetivo no es fijo, sino que se calcula a partir de la demanda pronosticada, los días de autonomía y el abastecimiento disponible, y se sigue con un lazo de nivel que respeta el límite de la bomba. La revisión mostró que los componentes ya existen en productos, patentes y desarrollos individuales; la diferencia propuesta es la combinación y su adaptación a pequeños predios chilenos, y es provisional por el alcance limitado de la búsqueda.

Con parámetros supuestos ($A = 5 \text{ m}^2$, bomba de $2,5 \text{ L/s}$), un PI con $K_c = 0,02 \text{ m}^2/\text{s}$ y $T_i = 1000 \text{ s}$, prefiltro y antiacumulación lleva el nivel de $0,80$ a $1,40 \text{ m}$ sin sobreimpulso, con 90% del cambio en 32 min y banda de 2% en 49 min . Con la bomba al 85% y un riego de $0,4 \text{ L/s}$, el lazo abierto termina $0,378 \text{ m}$ bajo la referencia y el lazo cerrado $0,017 \text{ m}$ sobre ella. Estos valores describen un modelo ideal y no una medición.

El aporte del documento es una definición verificable del sistema, sus dos configuraciones, una respuesta simulada interpretada y una lista de decisiones técnicas y validaciones pendientes. Antes de emprender deberían identificarse los parámetros con un ensayo en un estanque real, medir la relación entre irradiancia y caudal y comprobar con productores si la reserva adaptativa resuelve un problema por el que estén dispuestos a pagar.

Este informe se distribuye bajo la licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0).

Bibliografía

- Alarcón, C. (2026a). Generative Science as an analytical framework for integrating the full capabilities of generative artificial intelligence into scientific research while preserving scientific recognition. *Generative Science Preprints*, 2026(07), 19055673. <https://doi.org/10.5281/zenodo.19055673>
- Alarcón, C. (2026b, 28 de septiembre). Requerimientos Informe Semana 06 [Guía de evaluación]. Universidad de La Frontera.
- Åström, K. J., y Hägglund, T. (2006). *Advanced PID control*. ISA.
- BioBioChile. (2022, 25 de noviembre). Indap se reúne con sus encargados regionales: modernización y derechos de aguas fueron temas claves. <https://www.biobiochile.cl/noticias/economia/actualidad-economica/2022/11/25/indap-se-reune-con-sus-encargados-regionales-modernizacion-y-derechos-de-aguas-fueron-temas-claves.shtml>
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe. (s. f.). [Documento borrador sobre sistemas de bombeo solar para riego en Chile]. https://www.cepal.org/sites/default/files/events/files/recomendaciones_estudio.pdf
- Comunidad Rachio. (s. f.). Custom sprinkler types for storage tank filling [Foro]. <https://community.rachio.com/t/custom-sprinkler-types-for-storage-tank-filling/312>
- Desarrollo de un sistema de monitoreo y control del nivel de agua para estaciones de bombeo en sistemas agrícolas. (2025). *DYNA*, 92(237), 51–58. <https://doi.org/10.15446/dyna.v92n237.117596>
- Emprendimiento de sistema de telemetría para el sector agropecuario según las exigencias de la Dirección General de Aguas [Tesis, Universidad Técnica Federico Santa María]. (2023). <https://repositorio.usm.cl/handle/123456789/51532>
- Gallagher. (s. f.). Water Mobile App (G02433). <https://shop.am.gallagher.com/row/en/animal-management/apps-and-software/apps-and-software/water-mobile-app/p/G02433>
- Industrial Shields. (s. f.). Agricultural irrigation project pack. <https://www.industrialshields.com/plc-solution-library/agricultural-irrigation-project-pack>
- Ogata, K. (2010). *Modern control engineering* (5.ª ed.). Prentice Hall.
- Portal Frutícola. (s. f.). Chile: Gremio agrícola entregó estanques acumuladores de agua a agricultores de Monte Patria y Vicuña. <https://www.portalfruticola.com/?p=553750>
- Seborg, D. E., Edgar, T. F., Mellichamp, D. A., y Doyle, F. J. (2011). *Process dynamics and control* (3.ª ed.). John Wiley y Sons.
- USPTO. (s. f.). System, method and apparatus for providing a solar pump system for use within a mechanized irrigation system (Patente US 11576313). <https://image-ppubs.uspto.gov/dirsearch-public/print/downloadPdf/11576313>
- Wikipedia. (s. f.). Smart irrigation controller. https://en.wikipedia.org/wiki/Smart_irrigation_controller