

**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA**



**DESALINIZACIÓN MODULAR**  
**CON ENERGÍA FOTOVOLTAICA**

**ALEJANDRA ANTONIA PAREDES SANDOVAL**

PROYECTO DE TÍTULO  
PRESENTADO A LA FACULTAD DE  
INGENIERÍA AGRÍCOLA DE LA  
UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN,  
PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
INGENIERO CIVIL AGRÍCOLA

**CHILLÁN-CHILE**  
**2025**

## DESALINIZACIÓN MODULAR CON ENERGÍA FOTOVOLTAICA

Aprobado por:

David Lara Castells  
Ingeniero Civil Eléctrico Dr.  
Profesor Asociado

---

Profesor Guía

Juan Cañumir Veas  
Ingeniero Agrónomo, Ph.D.  
Profesor Asociado

---

Asesor

Camilo Souto Escalona  
Ingeniero Civil Agrícola, Ph.D.  
Profesor Asociado

---

Asesor

Christian Correa Farias.  
Ingeniero Civil Agrícola, Dr.  
Profesor Asociado

---

Director de Departamento

Octavio Lagos Roa  
Ingeniero Civil Agrícola, Ph.-D.  
Profesor Titular

---

Decano

## Dedicatoria

*A mis padres, Damarit Sandoval y Héctor Paredes, quienes siempre me han brindado su apoyo incondicional. Los amo y admiro profundamente, gracias por todo lo que han hecho por mí. Sé que en mí están cumpliendo ese sueño que no pudieron alcanzar, y gran parte de este logro es por ustedes.*

*A mi hermana, gracias por siempre estar a mi lado, compartiendo risas, lágrimas y momentos que solo nosotras entendemos.*

*A mis abuelas, por su sabiduría, cariño y los innumerables rezos que han hecho por todos sus nietos. Su apoyo me ha fortalecido más de lo que ellas saben y me ha dado fuerzas en los momentos más difíciles.*

*A mis abuelos, sé que estarían inmensamente felices de verme lograr esto. Los llevo en el corazón y les mando un beso al cielo, siempre están presentes en cada paso que doy.*

*Y, finalmente, a mi Tata Beto. Lo logré tata, y aunque ya no estás aquí conmigo, sé que en alguna parte me estás mirando. Te extraño siempre y te llevo conmigo en cada paso que doy.*

## **Agradecimientos**

*Quiero agradecer, en primer lugar, a mis padres y hermana por su constante apoyo y amor, que me han dado en todo momento. A mis abuelos, por su cariño incondicional. Y a mi familia, quienes siempre me han apoyado en todos los aspectos de mi vida, con ese amor que me ha acompañado en los momentos más importantes.*

*A mi profesor David Lara, quien me guió, ayudó y, sobre todo, tuvo la paciencia de acompañarme durante este proceso. Gracias por brindarme sus conocimientos y por su apoyo constante.*

*A mis amigos y compañeros, que son una de las cosas más bonitas que me ha dejado la vida y la universidad. Gracias por las alegrías, risas, momentos inolvidables, por las penas que compartimos y, sobre todo, por el cariño que me han dado. Sin ustedes, muchos de los momentos vividos no habrían sido tan especiales.*

*Y a mi pololo, Miguel Bustos, agradecida siempre por el apoyo que me has brindado, por ser mi compañero de aventuras y por estar a mi lado en cada paso. Espero que, con suerte, sigamos compartiendo y creciendo juntos en este lindo camino que es la vida.*

## ÍNDICE DE MATERIAS

Página	
	RESUMEN..... 1
	ABSTRACT..... 3
	1. INTRODUCCIÓN..... 5
	2. OBJETIVOS..... 8
	2.1. Objetivo general..... 8
	2.2. Objetivos específicos ..... 8
	3. ANTECEDENTES GENERALES ..... 9
	3.1. Área de estudio..... 9
	3.2. Contexto hídrico..... 10
	3.3. Desalinización como solución hídrica ..... 11
	3.4. Uso de energía fotovoltaica en desalinización ..... 11
	4. METODOLOGÍA ..... 13
	4.1. Caracterización de la planta desaladora..... 13
	4.1.1. Sistema de filtración. .... 15
	4.1.2. Cálculo de la potencia de las bombas ..... 17
	4.1.3. Cálculo de la potencia requerida por las membranas ..... 21
	4.1.4. Sincronización de los motores ..... 22
	4.2. Sistema de generación de energía ..... 24
	4.2.1. Perfil horario y dimensionamiento FV por bomba ..... 26
	4.2.2. Análisis de curvas de energía fotovoltaica ..... 28
	4.3. Modelación en MATLAB del funcionamiento de la planta..... 30
	4.4. Sincronización de operación según disponibilidad energética..... 30
	4.5. Comparación del modelo ..... 32
	4.5.1. Marco de comparación ..... 32
	4.5.2. Fuentes de datos y entradas del modelo ..... 33
	4.5.3. Escenarios de simulación para la comparación ..... 33
	4.5.4. Indicadores y criterios de comparación ..... 34
	5. RESULTADOS ..... 35
	5.1. Cálculo de la potencia y consumo energético de las bombas ..... 36

5.1.1. Potencia requerida por las membranas de filtración .....	39
5.2. PARTE I: SIMULACIÓN SIN SINCRONIZACIÓN.....	41
5.2.1. Producción energética del sistema fotovoltaico .....	41
5.2.2. Generación horaria diaria promedio para cada etapa.....	42
5.2.3. Generación y consumo energético total .....	43
5.3. PARTE II – SIMULACIÓN SINCRONIZADA:.....	45
5.3.1. ESCENARIO A: Simulación con estanques iniciales vacíos.....	45
5.3.2. ESCENARIO B: Simulación con estanques condicionados.....	54
5.4. Comparación del modelo .....	62
5.4.1. Condiciones operativas comparativas entre sistemas .....	63
5.4.2. Producción de agua permeada .....	64
5.4.3. Tiempos efectivos de operación .....	65
5.4.4. Consumo energético.....	66
5.4.5. Comparación Global .....	66
5.4.6. Consideraciones sobre la simulación .....	68
6. CONCLUSIONES .....	70
7. BIBLIOGRAFIA.....	73
8. ANEXOS Y APÉNDICES.....	78

## ÍNDICE DE TABLAS

En el texto	Página
Tabla 1. Especificaciones de las bombas implicadas en la desalación según catálogo .....	16
Tabla 2. Registro de datos de operación y desempeño de las etapas ET1 y ET2 en distintos escenarios operativos, según el estudio de Caleta Rumena .....	18
Tabla 3. Parámetros y valores introducidos en el explorador solar .....	25
Tabla 4. Condiciones de operación de las bombas de alta presión.....	37
Tabla 5. Condiciones de operación de las bombas centrífugas.....	38
Tabla 6. Potencia de operación y consumo energético de las bombas.....	39
Tabla 7. Potencia requerida para superar la caída de presión en las membranas de filtración.....	40
Tabla 8. Numero de paneles necesarios para cada bomba y tiempos posibles de trabajo (Sin sincronización) .....	41
Tabla 9. Generación y consumo energético de las bombas (Sin sincronización) .....	43
Tabla 10. Energía fotovoltaica generada y utilizada por el sistema - Escenario A .....	48
Tabla 11. Cantidad de paneles asignados y tiempo efectivo de operación de las bombas – Escenario A.....	54
Tabla 12. Energía fotovoltaica generada y utilizada por el sistema - Escenario B.....	57
Tabla 13. Cantidad de paneles asignados y tiempo efectivo de operación de las bombas - Escenario B.....	62
Tabla 14. Comparación de las condiciones de trabajo entre planta piloto (A. Quezada, 2024) y el sistema actual.....	64
Tabla 15. Comparación entre la planta piloto y los escenarios de simulación.....	68

## ÍNDICE DE FIGURAS

En el texto	Página
Figura 1. Ubicación de la planta modular de desalinización en Cobquecura, Región de Ñuble, Chile .....	9
Figura 2. Componentes del sistema de procesamiento de agua de mar .....	16
Figura 3. Generación fotovoltaica, horas de uso y potencia utilizada en la ET0, ET1 y ET2.....	42
Figura 4. Generación y potencia utilizada en la ET0 – Escenario A.....	47
Figura 5. Generación y potencia utilizada en la ET1 – Escenario A.....	47
Figura 6. Generación y potencia utilizada en la ET2 – Escenario A.....	48
Figura 7. Evolución horaria de los volúmenes en los estanques EAM, EAI y EAP – Escenario A.....	50
Figura 8. Volumen final de los estanques al cierre de la jornada – Escenario A.....	51
Figura 9. Producción horaria y acumulada de agua permeada en el estanque EAP – Escenario A.....	52
Figura 10. Generación y potencia utilizada en la ET0 – Escenario B.....	56
Figura 11. Generación y potencia utilizada en la ET1 – Escenario B.....	56
Figura 12. Generación y potencia utilizada en la ET2 – Escenario B.....	57
Figura 13. Evolución horaria de los volúmenes en los estanques EAM, EAI y EAP - Escenario B .....	58
Figura 14. Volumen final de los estanques al cierre de la jornada – Escenario B.....	59
Figura 15. Producción horaria y acumulada de agua permeada en el estanque EAP - Escenario B. ....	60

## ÍNDICE DE ECUACIONES

En el texto	Página
Ecuación 1. Potencia hidráulica.....	18
Ecuación 2. Potencia en eje.....	19
Ecuación 3. Potencia eléctrica del motor .....	19
Ecuación 4. Potencia requerida desde el campo fotovoltaico.....	19
Ecuación 5. Potencia para Bomba Hydra-Cell G25-E.....	20
Ecuación 6. Potencia para Bomba Hydra-Cell G10-S.....	20
Ecuación 7. Ajuste de bomba.....	21
Ecuación 8. Potencia de la membrana.....	22
Ecuación 9. Balance en ET1.....	93
Ecuación 10. Balance en ET2.....	93
Ecuación 11. Flujo en el estanque de agua de mar (EAM).....	94
Ecuación 12. Flujo en el estanque de agua de mar (EAM).....	94
Ecuación 13. Flujo en el estanque de agua intermedia (EAI).....	94
Ecuación 14. Flujo en el estanque de agua intermedia (EAI).....	94
Ecuación 15. Flujo en el estanque de agua permeada (EAP).....	94
Ecuación 16. Flujo de rechazo al mar.....	94

## DESALINIZACION MODULAR CON ENERGIA FOTOVOLTAICA

### MODULAR DESALINATION WITH PHOTOVOLTAIC ENERGY

**Palabras clave:** desalinización, nanofiltración, energía fotovoltaica, Planta desaladora modular, sincronización, Cobquecura.

#### RESUMEN

El acceso al agua potable en comunidades costeras de Chile enfrenta limitaciones crecientes por la escasez hídrica y el cambio climático. En este contexto, la desalinización mediante nanofiltración surge como alternativa eficiente frente a la ósmosis inversa, al requerir menores presiones de operación, reducir el consumo energético y conservar minerales esenciales en el agua tratada.

Este estudio evaluó la factibilidad técnica de una planta modular de desalinización ubicada en Cobquecura, Región de Ñuble, operando exclusivamente con energía solar fotovoltaica. La metodología incluyó cálculos hidráulicos y eléctricos de bombas, estimación de generación fotovoltaica con Explorador Solar y simulaciones en MATLAB bajo distintos escenarios de operación, considerando la dinámica de los estanques y la sincronización energética de las bombas.

Los resultados mostraron producciones diarias entre 5.855 y 6.211 L de agua permeada, con consumos energéticos de 71 a 73 kWh/día, duplicando la capacidad de una planta piloto similar (~2.500 L/día) y reduciendo el consumo

respecto a sistemas con baterías (80–90 kWh/día). Se comprobó la viabilidad de operar un sistema autónomo y eficiente solo con energía solar, capaz de cubrir la demanda hídrica básica de una pequeña comunidad costera. Se identificaron mejoras potenciales como ampliar el campo fotovoltaico y los estanques, incorporar esquemas híbridos con baterías y optimizar bombas e inversores, consolidando la desalinización modular fotovoltaica como alternativa estratégica para la resiliencia hídrica en comunidades costeras de Chile.

## MODULAR DESALINATION WITH PHOTOVOLTAIC ENERGY

**Keywords:** desalination, nanofiltration, photovoltaic energy, synchronization, Modular desalination plant, Cobquecura.

### ABSTRACT

Access to drinking water in Chilean coastal communities is increasingly limited due to water scarcity and climate change. In this context, seawater desalination through nanofiltration emerges as an efficient alternative to reverse osmosis, as it operates at lower pressures, reduces energy consumption, and preserves essential minerals in the treated water.

This study evaluated the technical feasibility of a modular desalination plant located in Cobquecura, Ñuble Region, designed to operate exclusively with solar photovoltaic energy. The methodology included hydraulic and electrical calculations of pumps, photovoltaic generation estimation using the *Explorador Solar* software, and MATLAB simulations under different operating scenarios, incorporating tank dynamics and synchronized pump operation with solar availability.

The results showed daily productions ranging from 5,855 to 6,211 L of permeate water, with energy consumptions of 71–73 kWh/day. These values double the capacity of a similar pilot plant in Chile (~2,500 L/day) and reduce energy use compared to battery-supported systems (80–90 kWh/day). The direct use of solar energy avoided charge–discharge losses and

intermediate electrical conversions, improving overall efficiency. The findings confirm the feasibility of operating an autonomous system fully powered by solar energy, capable of meeting the basic water demand of a small coastal community. Improvement opportunities include expanding photovoltaic and storage capacity, incorporating hybrid battery systems, and optimizing pumps and inverters, positioning modular photovoltaic desalination as a strategic solution for water resilience in Chilean coastal communities.

## 1. INTRODUCCIÓN

El acceso al agua potable es esencial para garantizar la salud y el desarrollo socioeconómico de cualquier comunidad. Sin embargo, en localidades remotas y aisladas, como muchas comunidades costeras de Chile, el abastecimiento continuo enfrenta serias limitaciones debido a la disminución de fuentes de agua superficiales y subterráneas, fenómenos asociados al cambio climático y la carencia de infraestructura adecuada (ONU, 2020; World Health Organization, WHO, 2017).

En zonas como Cobquecura, estas dificultades se agudizan durante la temporada estival, cuando el aumento del turismo, la agricultura y otras actividades productivas eleva significativamente la demanda de agua, presionando aún más los sistemas de abastecimiento existentes (Dirección General de Aguas, DGA, 2021). En estos sectores, el suministro depende en gran parte de camiones aljibe que, en promedio, entregan cerca de 50 litros por persona al día, valor muy por debajo de los 100 litros diarios recomendados por la Organización Mundial de la Salud para condiciones básicas de vida (WHO, 2017).

Frente a este escenario, la desalinización de agua de mar mediante nanofiltración se presenta como una alternativa eficiente y viable, ya que opera con presiones más bajas que la ósmosis inversa (20–40 bar frente a 55–70 bar), reduciendo el consumo energético y los costos de operación, además de

conservar minerales esenciales en el agua tratada (Yadav et al., 2022; Neira, 2016).

El presente estudio se centra en una planta desaladora modular ubicada en la localidad de Cobquecura, Región de Ñuble, diseñada para funcionar exclusivamente con energía solar fotovoltaica. El sistema cuenta con paneles solares monocristalinos, inversores de alta eficiencia, estanques de almacenamiento y un conjunto de bombas que operan en tres etapas: (I) captación de agua de mar hacia el estanque de agua cruda, (II) primera etapa de nanofiltración hacia el estanque intermedio y (III) segunda etapa de nanofiltración hacia el estanque de agua permeada (Hanersun, 2023).

La radiación solar en la zona alcanza hasta 5 kWh/m<sup>2</sup> diarios en verano, lo que proporciona un recurso energético suficiente para operar la planta de forma autónoma (Centro de Información de Recursos Naturales, CIREN, 2020). No obstante, su funcionamiento eficaz requiere una cuidadosa sincronización entre la generación de energía y los procesos de captación, bombeo y tratamiento de agua.

En este contexto, el objetivo del presente trabajo es optimizar la operación de la planta mediante el análisis de curvas de generación fotovoltaica y la modelación de sus etapas de funcionamiento en MATLAB. Se busca maximizar la producción de agua potable, garantizando el uso exclusivo de energía solar y asegurando la sostenibilidad del sistema, además de proponer

un modelo replicable en otras comunidades costeras con condiciones similares.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. Objetivo general**

Evaluar operación de una planta desaladora modular de nanofiltración alimentada exclusivamente con energía solar fotovoltaica, mediante la sincronización de sus procesos de captación, bombeo y tratamiento de agua con la disponibilidad energética diaria en la localidad de Cobquecura, Región de Ñuble.

### **2.2. Objetivos específicos**

- Caracterizar la demanda energética de cada etapa de la planta, considerando los requerimientos de los equipos en los procesos de captación, bombeo y filtración.
- Dimensionar el sistema fotovoltaico necesario para cada componente de la planta, considerando la radiación solar, pérdidas por conversión y demanda de potencia de las bombas.
- Desarrollar un modelo en MATLAB que integre la generación fotovoltaica y los requerimientos operativos, simulando escenarios diarios de producción de agua.
- Diseñar una estrategia de operación sincronizada basada en las curvas horarias de radiación solar, para optimizar el uso de la energía solar disponible.

### 3. ANTECEDENTES GENERALES

#### 3.1. Área de estudio

La zona de estudio para la ubicación de la planta modular de desalinización de agua de mar es la localidad de Colmuyao en Cobquecura, perteneciente a la región de Ñuble, en Chile, con coordenadas geográficas de latitud  $-36,253376$  y longitud  $-72,808564$ . Esta zona se caracteriza por su dependencia de actividades económicas tradicionales, como la pesca y la recolección de algas, así como por la producción agrícola de cultivos como papas, hortalizas, papayas, frutillas y vid. Al mismo tiempo, enfrenta desafíos significativos en relación con el acceso al agua potable, cuya disponibilidad ha sido históricamente limitada debido a la escasez de fuentes superficiales y subterráneas de abastecimiento.



Figura 1. Ubicación geográfica de la planta modular de desalinización en Colmuyao, Región de Ñuble, Chile. (Fuente: Elaboración propia.)

### **3.2. Contexto hídrico**

Cobquecura, al igual que muchas localidades costeras de la Región de Ñuble, presenta una alta vulnerabilidad hídrica debido a la limitada disponibilidad de fuentes de agua naturales y a la carencia de infraestructura de captación y almacenamiento eficiente (DGA, 2021). Esta situación se agrava en un contexto de cambio climático, con una mayor frecuencia e intensidad de sequías prolongadas, lo que ha reducido de forma significativa las reservas hídricas superficiales y subterráneas (Garreaud et al., 2017).

Según datos recientes, miles de habitantes en la región no cuentan con acceso directo a agua potable, dependiendo en gran medida de la entrega mediante camiones aljibe, lo que no siempre permite cubrir las necesidades básicas (DGA, 2021). Este problema se intensifica en verano debido a la presión ejercida por el incremento de actividades productivas y turísticas en la zona (Ministerio de Obras Públicas, MOP, 2022), aumentando la demanda de agua sobre los ya limitados recursos disponibles.

En este escenario, resulta prioritario implementar soluciones sostenibles que garanticen un suministro continuo y seguro, aprovechando las ventajas de la ubicación costera de Cobquecura y su alto potencial de radiación solar como base para el funcionamiento de una planta desaladora alimentada exclusivamente con energía fotovoltaica (CIREN, 2020; Yadav et al., 2022).

### **3.3. Desalinización como solución hídrica**

La desalinización es una alternativa viable para abastecer de agua potable a comunidades costeras. Este proceso permite eliminar sales y otros minerales del agua de mar, transformándola en agua dulce apta para el consumo humano. A nivel mundial, el método más utilizado es la ósmosis inversa, que requiere presiones de operación entre 55 y 70 bar, implicando un alto consumo energético (Neira, 2016).

La nanofiltración, en cambio, opera con presiones más bajas (20 a 40 bar), reduciendo los costos energéticos y de mantenimiento. Este método también conserva minerales esenciales en el agua, mejorando su calidad para el consumo humano. Investigaciones recientes sugieren que las membranas de nanofiltración tienen un gran potencial como tecnología principal para la desalinización de agua de mar, especialmente en comunidades remotas (Yadav et al., 2022).

### **3.4. Uso de energía fotovoltaica en desalinización**

La energía fotovoltaica (FV) se ha consolidado como una alternativa sostenible para alimentar plantas desaladoras, especialmente en zonas remotas. En la Región de Ñuble y su zona costera, la elevada radiación solar disponible durante el verano permite operar sistemas de tamaño moderado mediante el uso directo de la generación fotovoltaica y estrategias de sincronización horaria entre las bombas y la curva solar.

- **Caso local de referencia (FV aislada con baterías)**

En Caleta Rumena se evaluó una planta modular de nanofiltración off-grid con 24 paneles de 430 W, banco de baterías GEL 48 V e inversores trifásicos que abastecen las etapas de captación y doble nanofiltración. Con la operación estival, la planta logró 6 - 8 h/día, produciendo 2.400–4.200 L/día y un consumo específico de 12,4–13,4 kWh·m<sup>-3</sup>; además, se recomendó concentrar la operación entre septiembre–abril para resguardar la vida útil del banco de baterías. Estos resultados muestran que la coincidencia horaria entre demanda y generación, más el uso de estanques como “pulmón”, es clave para sostener la producción sin sobredimensionar almacenamiento electroquímico.

- **Alternativas híbridas/on-grid**

Como línea complementaria al esquema FV aislado, las configuraciones on-grid (acopladas a red) o híbridas (FV-viento-batería/red) permiten inyectar excedentes y cubrir déficits sin sobrecargar bancos de baterías, reduciendo el sobredimensionamiento FV y mejorando la continuidad de servicio. En esta tesis se emplea el esquema FV aislado como línea base; sin embargo, en la Discusión se contrasta su desempeño con la factibilidad de esquemas on-grid/híbridos para contextos costeros similares.

## **4. METODOLOGÍA**

### **4.1. Caracterización de la planta desaladora**

La planta analizada corresponde a una instalación modular existente de desalinización de agua de mar, implementada en Caleta Rumena, organizada en tres etapas hidráulicas que se apoyan en estanques operacionales:

EAM: Estanque de agua de mar, que recibe el caudal captado desde la costa.

EAI: Estanque intermedio, donde se almacena el agua parcialmente filtrada.

EAP: Estanque de agua permeada, que contiene el agua desalinizada lista para consumo.

El tren de bombas está compuesto por B1 (captación a EAM), B2 (alimentadora a prefiltros en ET1), BAP (alta presión para NF en ET1), B3 (transferencia desde EAI en ET2) y BAP2 (alta presión para NF en ET2), dimensionadas según los requerimientos de caudal y presión de cada etapa.

El esquema del proceso se muestra en la Figura 2.

En particular, los parámetros de caudal, presión, potencia y ventanas horarias se tomaron del estudio real de Caleta Rumena (Quezada, 2024), y sobre esa base se propone la integración fotovoltaica por bomba como mejora operativa y energética.

Sobre esta planta base, la tesis propone una mejora centrada en la integración fotovoltaica por bomba y en la optimización operativa para uso directo de la energía solar, sin alterar la arquitectura hidráulica (ET0–ET2) ni las funciones

de EAM, EAI y EAP: se moderniza la alimentación eléctrica y la estrategia de operación para elevar el desempeño energético y la continuidad.

Modificaciones introducidas respecto de la planta base:

1. Arreglos FV dedicados por bomba (B1, B2, BAP, B3, BAP2) con inversores trifásicos dimensionados por motor, habilitando operación independiente.
2. Sustitución del campo fotovoltaico se actualiza desde la configuración original (430 Wp) a módulos Hanersun HN21N-66HT700W (700 Wp), de modo de elevar la densidad de potencia y optimizar la operación diurna con sincronización por bomba.
3. Sincronización horaria con la curva solar estival: prioriza BAP y BAP2 en horas de mayor irradiancia y escalona captación/transferencias usando los estanques como desacople hidráulico.
4. Criterio de potencia mínima: cada bomba solo opera cuando la potencia FV disponible supera su potencia eléctrica absorbida (eficiencias y pérdidas incluidas), evitando periodos ineficientes.
5. Pre-dimensionamiento estival: como condición inicial, se dimensiona para 10 h/bomba en verano; luego se reestima el número de paneles al incorporar restricciones de volúmenes y la interacción dinámica entre etapas.
6. Almacenamiento electroquímico: se prescinde de baterías respecto del esquema original, privilegiando uso directo de la generación FV.

#### **4.1.1. Sistema de filtración.**

El funcionamiento de la planta se definió en tres etapas operativas, las cuales regulan el flujo de agua a través del sistema de desalinización. Estas etapas son las siguientes:

- Etapa de alimentación (ET0): La bomba de captación se encuentra en funcionamiento, impulsando el agua de mar hacia el estanque de agua de mar (EAM).
- Etapa filtrado 1 (ET1): El agua del EAM es impulsada por la bomba de alimentación a través de los filtros multicapa y de microfiltración y luego la bomba de alta presión (BAP) impulsa el agua de mar hacia los módulos de nanofiltración, en este módulo, el agua es sometida al primer paso de filtrado. El agua parcialmente filtrada es dirigida al estanque de agua intermedia (EAI), donde se almacena antes de pasar a la siguiente etapa.
- Etapa filtrado 2 (ET2): desde el EAI, la bomba B3 traslada el agua hacia la bomba de alta presión 2 (BAP2), esta impulsa el agua hacia el segundo módulo de nanofiltración; el permeado se almacena en el EAP estanque de agua permeada (EAP) y el rechazo retorna al EAM.

El esquema de la planta, junto a los componentes de la filtración, se presentan en la Figura 2.

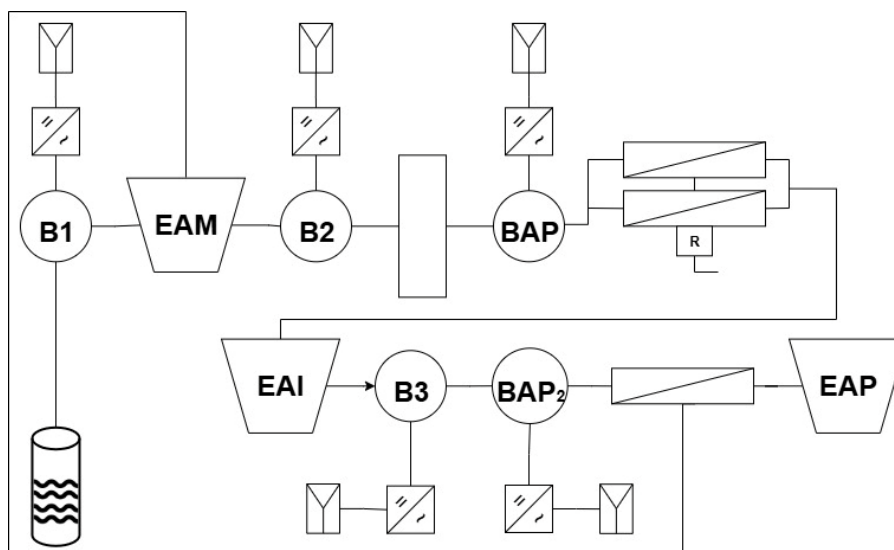


Figura 2. Componentes del sistema de procesamiento de agua de mar.  
(Fuente: Elaboración propia.)

Tabla 1. Especificaciones de las bombas implicadas en la desalación según catálogo.

Bomba	Función en el sistema	Modelo	Tipo	Caudal (L/min)	P (kW)
B1	Captación de agua de mar hacia el tanque EAM	Bestflow 5-12 (4SPM)	1 $\phi$	60,0	1,1
B2	Transferencia de agua del EAM al EAI.	WEG W22	3 $\phi$	Variable	2,2
BAP	Bombeo de agua de mar a presión media para nanofiltración	Hydra-Cell G25-E	3 $\phi$	63,0	9,1
B3	Bombeo de agua tratada entre EAI y BAP <sub>2</sub>	Pedrollo 2CP 25/14B	3 $\phi$	Variable	1,1
BAP <sub>2</sub>	Bombeo del agua desalinizada hacia el tanque de almacenamiento (EAP)	Hydra-Cell G10-S	3 $\phi$	18,8	2,8

(Fuente: Elaboración propia.)

#### 4.1.2. Cálculo de la potencia de las bombas

La estimación de la potencia se realizó en dos etapas: primero se calculó la potencia hidráulica requerida por cada bomba y posteriormente se ajustó a la potencia eléctrica equivalente demandado desde el arreglo fotovoltaico, incorporando las pérdidas de conversión asociadas a motores como los inversores.

Para obtener datos representativos, se analizaron registros de consumo energético en una planta de desalinización ubicada en Caleta Rumena, Región del Biobío (Quezada, 2024). Este estudio presenta mediciones de consumo bajo diferentes escenarios operativos, lo que permitió identificar condiciones comparables a cada etapa de la planta en Cobquecura (Tabla 2):

- ET0 (captación): equivalente a la Etapa 1 en el estudio de Rumena.
- ET1 (primera nanofiltración): equivalente a la Etapa 6.
- ET2 (segunda nanofiltración): equivalente a la Etapa 5.

El uso de datos empíricos provenientes de esta planta en operación permite afinar la estimación de consumo, incorporando factores como variaciones de caudal, pérdidas mecánicas no contempladas en los cálculos teóricos y fluctuaciones en la presión de operación.

Tabla 2. Registro de datos de operación y desempeño de las etapas ET1 y ET2 en distintos escenarios operativos, según el estudio de Caleta Rumena

Escenarios	Presión (Bar)		Frecuencia (Hz)		Potencia (W)	Caudal (L/min)			
	ET1	ET2	Delta	ABB	Consumo	$P_{ET1}$	$P_{ET2}$	$R_{ET1}$	$R_{ET2}$
E1	-	-	-	-	1132	-	-	-	-
E2									
E3									
E4	39,0	16,6	23,3	33,8	5009	13,4	20,0	22,8	10,6
E5	-	16,8	-	34,0	1723	-	20,0	-	10,6
E6	39,7	-	37,4	-	6342	18,2	-	40,0	-
E7									

(Fuente: A. Quezada 2024.)

- **Potencia hidráulica ( $P_h$ )**

Corresponde al trabajo teórico que debe realizar la bomba para elevar el agua a una altura determinada:

$$P_h = Q \times H \times \rho \times g \quad [1]$$

Donde:

$P_h$  : Potencia en kW

$Q$  : Caudal en m<sup>3</sup>/h

$H$  : Altura manométrica en metros

$\rho$  : Densidad del fluido (1.000 kg/m<sup>3</sup>)

$g$  : Aceleración debida a la gravedad (9,81m/s<sup>2</sup>)

Esta fórmula es ampliamente utilizada para estimar la potencia de bombas en sistemas de agua (Karassik et al., 2017). Los valores de H y Q se obtuvieron de los catálogos técnicos de cada bomba (Best Pump Works, 2021; Pedrollo S.p.A., 2023; WEG, 2022).

- **Potencia en eje ( $P_{eje}$ )**

Se obtiene al corregir  $P_h$  por la eficiencia hidráulica de la bomba:

$$P_{eje} = \frac{P_h}{\eta_b} \quad [2]$$

Donde:

$\eta_b$ : Eficiencia hidráulica de la bomba, obtenida de catálogos técnicos (Bestflow, 2023; Pedrollo S.p.A., 2023; WEG, 2022).

- **Potencia eléctrica del motor ( $P_{motor}$ )**

Incluye las pérdidas asociadas al rendimiento del motor eléctrico:

$$P_{motor} = \frac{P_{eje}}{\eta_m} \quad [3]$$

Donde:

$\eta_m$ : Eficiencia del motor ( $\approx 0,90$  para motores trifásicos estándar IE2–IE3; IEC, 2019; WEG, 2022)

- **Potencia requerida desde el campo fotovoltaico ( $P_{FV}$ )**

Corresponde a la potencia que debe suministrar el sistema fotovoltaico, considerando además la eficiencia del inversor:

$$P_{FV} = \frac{P_{motor}}{\eta_{inv}} \quad [4]$$

Donde:

$\eta_{inv}$ : 0,95 (López-Luque & Agugliaro, 2011).

De esta forma, la secuencia de cálculo permite pasar desde la potencia hidráulica teórica ( $P_h$ ) hasta la potencia real requerida desde el campo fotovoltaico ( $P_{FV}$ ) integrando las pérdidas hidráulicas, mecánicas y eléctricas de cada componente del sistema.

- **Bomba Hydra-Cell G25-E y G10 S**

La estimación de la potencia de trabajo de las bombas se realizó a partir de las expresiones recomendadas por el fabricante Hydra-Cell, que permiten calcular directamente la potencia del motor en función de la velocidad de rotación, el caudal bombeado y la presión de operación. Para las bombas utilizadas en la planta, los modelos Hydra-Cell G25-E y Hydra-Cell G10-S, las ecuaciones de potencia son las siguientes (Wanner Engineering, 2022):

- Bomba Hydra-Cell G25-E:

$$P(kW) = \frac{50 \times rpm}{84,428} + \frac{Q(l/min) \times P(bar)}{511} \quad [5]$$

- Bomba Hydra-Cell G10-S:

$$P(kW) = \frac{15 \times rpm}{84,428} + \frac{Q(l/min) \times P(bar)}{511} \quad [6]$$

Donde:

$rpm$  : es la velocidad de rotación de la bomba.

$Q$  : es el caudal de la bomba en litros por minuto (L/min).

$P$  : presión de la bomba en bar.

- **Ajuste de bomba**

Las potencias obtenidas mediante estas expresiones corresponden a la potencia de motor requerida para las condiciones nominales de caudal, presión y velocidad de operación consideradas en el diseño de la planta.

Con el objetivo de representar la demanda real sobre el sistema fotovoltaico, en el caso de las bombas de alta presión se incorporó un ajuste considerando

la eficiencia de la bomba. Para ello, la potencia calculada de motor se corrigió mediante un rendimiento típico de  $\eta_b=0,85$ , obteniendo la siguiente relación:

$$P_{FV} = \frac{P_{motor}}{\eta_b} \quad [7]$$

Donde:

$P_{motor}$ : potencia eléctrica absorbida por el motor en sus bornes (lado AC).

$P_{FV}$ : potencia requerida desde el campo fotovoltaico (lado DC, antes del inversor).

Adicionalmente, la generación disponible del generador FV se ajusta con un PR = 0,70 (30% de pérdidas por cableado, desajuste/mismatch, temperatura y suciedad), de modo que los resultados incluyan tanto las condiciones de operación hidráulica como las pérdidas del sistema FV.

#### **4.1.3. Cálculo de la potencia requerida por las membranas**

Para determinar la potencia necesaria para operar las membranas de nanofiltración DOW FILMTEC NF90-400, es esencial considerar la caída de presión que experimenta el agua al pasar a través de la membrana. Esta caída de presión, junto con el caudal de permeado, es un factor clave en el cálculo de la potencia.

La caída de presión ( $\Delta P$ ) es la diferencia de presión entre la entrada y la salida de la membrana durante la operación. Este valor se determina según las especificaciones de la membrana, pero en general, las membranas de nanofiltración como la DOW FILMTEC NF90-400 tienen una caída de presión máxima de 3,4 bar (340.000 Pa). Este valor puede variar dependiendo de las

condiciones de operación, como el caudal de agua filtrada, la calidad del agua de alimentación y la configuración del sistema.

La fórmula para calcular la potencia necesaria para superar esta caída de presión es la siguiente:

$$P_{membrana} = \frac{Q \times \Delta P}{\eta} \quad [8]$$

Donde:

$P_{membrana}$  : Potencia requerida por las membranas (kW).

$Q$  : Caudal (m<sup>3</sup>/s).

$\Delta P$  : Caída de presión en la membrana (Pa),

$\eta$  : Eficiencia del sistema de filtrado (85%).

Estos cálculos permiten tener una vista más cercana a la realidad, teniendo en cuenta las condiciones de operación y los parámetros técnicos de las bombas seleccionadas.

Asimismo, facilita una estimación de la demanda energética de la planta, asegurando la adecuada sincronización entre los procesos de captación bombeo y tratamiento de agua y la capacidad del sistema fotovoltaico. Esta información es clave para garantizar un funcionamiento sostenible del sistema en las condiciones específicas del sitio de estudio.

#### **4.1.4. Sincronización de los motores**

La planta desaladora modular cuenta con un conjunto de bombas que operan en diferentes etapas del proceso de captación y nanofiltración. Para gestionar su funcionamiento, es necesario establecer una estrategia de sincronización

que coordine el encendido y apagado de cada motor de acuerdo con la disponibilidad de energía fotovoltaica y la demanda hidráulica en cada etapa.

El sistema de conversión y gestión de energía está compuesto por inversores fotovoltaicos trifásicos dedicados, uno para cada bomba, seleccionados en función de la potencia nominal de los motores:

- Inversor de 12 kW → BAP (Hydra-Cell G25-E, bomba de alta presión para la primera etapa de nanofiltración).
- Inversor de 5 kW → B1 (Bestflow 5-8, bomba de captación de agua de mar).
- Inversor de 5 kW → B2 (WEG W22, bomba alimentadora paso 1).
- Inversor de 2 kW → B3 (Pedrollo 2CP 5/14B, bomba alimentadora paso 2).
- Inversor de 5 kW → BAP2 (Hydra-Cell G10-S, bomba de alta presión de permeado).

Con esta asignación, cada bomba dispone de su propio inversor, lo que asegura independencia operativa y elimina la necesidad de variadores de frecuencia. Esta práctica es consistente con recomendaciones para sistemas fotovoltaicos aislados, donde se prioriza el dimensionamiento individual de inversores para cada motor, optimizando eficiencia y reduciendo pérdidas (Kalogirou, 2020; López-Luque & Agugliaro, 2011; Nogueira et al., 2021).

La sincronización se implementa bajo los siguientes criterios:

1. Priorizar las bombas de mayor consumo en horas de máxima irradiación solar (11:00–16:00).
2. Utilizar los estanques intermedios como almacenamiento temporal, desacoplando hidráulicamente las etapas.
3. Coordinar la operación de cada bomba en función de la generación solar disponible y de los mínimos hidráulicos definidos, evitando pérdidas o paradas innecesarias.

Esta estrategia permite maximizar la producción de agua en función de la energía disponible, asegurando que todo el sistema opere con energía 100% solar fotovoltaica, sin fuentes auxiliares no renovables.

#### **4.2. Sistema de generación de energía**

El sistema fotovoltaico de la planta desaladora está compuesto por paneles solares monocristalinos Hanersun HN21N-66HT700W, seleccionados por su alta eficiencia y durabilidad en entornos costeros, donde la humedad y la salinidad pueden afectar el rendimiento de los módulos (Hanersun, 2023; Nobre et al., 2020). Estos paneles cuentan con una potencia nominal de 700 Wp, 132 celdas tipo N y un coeficiente de temperatura de  $-0,28\%/^{\circ}\text{C}$ , lo que permite un mejor desempeño en climas con alta radiación, pero temperaturas elevadas.

La conversión de la energía generada se realiza mediante inversores trifásicos de alta eficiencia (95%), dimensionados según la potencia de cada bomba. La

correcta selección de inversores es esencial para evitar sobredimensionamiento y pérdidas, y debe considerar tanto la potencia máxima de salida como la potencia máxima de entrada admisible desde el campo fotovoltaico (Kalogirou, 2020; López-Luque & Agugliaro, 2011).

Para el dimensionamiento y la estimación de la producción energética, se utilizó el software Explorador Solar de la Comisión Nacional de Energía de Chile (CNE), herramienta que permite simular la generación en función de la ubicación geográfica, inclinación, orientación y factores de pérdidas (CNE, 2023). Este enfoque es ampliamente utilizado en la planificación de sistemas solares fotovoltaicos, ya que integra datos climatológicos y radiométricos históricos con modelos de conversión energética (Duffie & Beckman, 2013).

Tabla 3. Parámetros y valores introducidos en el explorador solar.

Parámetro	Valor
Latitud	-36,253376°
Longitud	-72,808564°
Modelo de generación	Monofacial, modelo avanzado
Número de celdas por panel	132 (2 x 11 x 6)
Voltaje de Máxima Potencia (Vmp)	40,40 V
Corriente de Máxima Potencia (Imp)	17,33 A
Voltaje de circuito abierto (Voc)	48,20 V
Coefficiente de temperatura de Pmax	-0,28%/°C
Corriente de cortocircuito (Isc)	18,34 A
Coefficiente de temperatura de Isc	+0,045%/°C
Inclinación	25°
Acimut	0°
Eficiencia del inversor (%)	95%
Factor de pérdidas del sistema (%)	30%

(Fuente: Elaboración propia.)

Se adoptó un 30% ( $PR = 0,70$ ) como criterio conservador para representar pérdidas por temperatura, ensuciamiento en ambiente marino (salitre, polvo y vaguadas costeras), además de desajustes entre módulos y caídas en cableado y conexiones. Este valor es coherente con lo reportado para sistemas aislados en zonas costeras, donde las pérdidas pueden superar el 25% (Nobre et al., 2020; CNE, 2023). Cabe destacar que se consideró independiente de la eficiencia del inversor (95%), con el fin de evitar doble contabilización.

Con estos parámetros, el Explorador Solar entregó la energía diaria por panel en enero, mes crítico por la alta demanda hídrica y la mayor radiación. Este resultado constituye la base para el dimensionamiento preliminar de paneles por bomba y para el análisis de la sincronización operativa de la planta.

#### **4.2.1. Perfil horario y dimensionamiento FV por bomba**

Se aplicaron dos enfoques complementarios para definir el perfil horario de demanda de cada bomba y dimensionar su arreglo FV dedicado:

- Sin sincronización (preliminar por energía).
  1. Para cada bomba, se calcula la energía diaria que necesita multiplicando su potencia eléctrica (4.1.3) por 10 horas (objetivo de verano).
  2. Del Explorador Solar (enero) se toma la energía que entrega un panel en un día (ya ajustada con  $PR=0,70$ ).

3. El número preliminar de paneles es la demanda diaria de la bomba dividida por la energía diaria de un panel, redondeando hacia arriba.
  4. Se hace un chequeo de potencia instantánea a mediodía: si con esos paneles no alcanza la potencia requerida por la bomba, se añaden 1–2 paneles.
- Con sincronización (simulación a 15 minutos).
1. Se toma la potencia por panel hora a hora del Explorador Solar y se interpolan valores cada 15 minutos.
  2. Un modelo en MATLAB activa o apaga las bombas según: potencia FV disponible, niveles de los estanques (EAM–EAI–EAP) y reglas de operación (modos 1M/2M en ET1, umbrales de arranque, histéresis mínima, etc.).
  3. El modelo identifica en qué intervalos funciona cada bomba y calcula el mínimo número de paneles que garantiza que, cada vez que la bomba está encendida, la potencia FV disponible alcanza su umbral de potencia, aplicando un margen de seguridad del 5%.
  4. El resultado es un número mínimo de paneles por bomba que evita sobredimensionar, porque solo cubre los periodos en que realmente operan.

Se utilizaron los datos de potencias eléctricas por bomba (de 4.1.3), parámetros FV (Tabla 3), energía y potencia horaria por panel del Explorador

Solar (enero) y datos operativos de Caleta Rumena (Tabla 2) para fijar caudales/presiones y validar órdenes de magnitud. Y se obtuvieron por bomba: paneles preliminares del enfoque (A), paneles mínimos con sincronización del enfoque (B) y tiempo efectivo de operación.

#### **4.2.2. Análisis de curvas de energía fotovoltaica**

El análisis de las curvas horarias de generación de energía fotovoltaica se realizó con el objetivo de evaluar la coincidencia temporal entre la producción de energía y los requerimientos de potencia de las bombas de la planta desaladora. Es importante señalar que la simulación corresponde a un día solar promedio mensual generado por el Explorador Solar (CNE, 2023), por lo que no representa cambios temporales asociados a condiciones meteorológicas puntuales (p. ej., nubosidad o niebla costera).

Para la modelación se utilizaron datos horarios de radiación solar obtenidos del software Explorador Solar, ajustados considerando un factor de pérdidas del 30% y una eficiencia de inversores del 90%. Estos valores fueron procesados en MATLAB, herramienta ampliamente utilizada en la simulación de sistemas energéticos por su capacidad para integrar modelos de generación renovable con perfiles de consumo.

El procedimiento incluyó tres etapas:

1. Generación de curvas horarias de potencia fotovoltaica neta, calculadas a partir de la radiación solar incidente y la potencia nominal de cada panel, considerando pérdidas térmicas y eléctricas (Nobre et al., 2020).
2. Construcción de curvas de consumo horario de las bombas, utilizando las potencias nominales ajustadas de cada equipo y la secuencia de operación definida para las etapas ET0, ET1 y ET2.
3. Superposición y análisis comparativo, para identificar horas de coincidencia plena entre generación y consumo, así como periodos de déficit energético.

Este cruce permitió identificar las franjas horarias óptimas de operación, principalmente entre las 11:00 y las 18:00 horas, cuando la generación alcanza su máximo y es posible operar bombas de alta demanda como la BAP (Hydra-Cell G25-E). En contraste, en periodos de baja irradiación (mañana temprano y final de la tarde) sólo resulta viable operar equipos de menor consumo o acumular agua en los estanques intermedios. Este tipo de análisis es fundamental para definir estrategias de sincronización energética, que minimicen el sobredimensionamiento de sistemas fotovoltaicos y reduzcan la necesidad de almacenamiento en baterías, priorizando el uso directo de la energía generada.

### **4.3. Modelación en MATLAB del funcionamiento de la planta**

Se desarrolló un modelo en MATLAB que permite integrar las curvas horarias de generación fotovoltaica con los consumos energéticos de cada componente de la planta desaladora. El modelo incluye:

- Las curvas de radiación solar y generación de energía, hora a hora.
- Los consumos de potencia definidos para cada bomba y etapa del proceso (captación, nanofiltración, distribución).
- La representación de la eficiencia de los inversores y pérdidas del sistema.
- La capacidad de los estanques intermedios, para modelar el almacenamiento y uso diferido del agua.

El modelo simula el funcionamiento horario de la planta durante un día tipo y entrega como salida:

- El volumen de agua producido por hora y acumulado del día.
- El consumo energético horario.
- La proporción de energía utilizada y la sobrante.
- La evaluación de la cobertura de la demanda hídrica diaria.

### **4.4. Sincronización de operación según disponibilidad energética**

Para evaluar la operación de la planta desaladora se plantearon dos simulaciones principales:

- Parte I – Simulación sin sincronización. Comprende el cálculo de la potencia de trabajo de las bombas, la estimación de la generación

fotovoltaica y el consumo energético por etapa, bajo un esquema de operación teórica que no considera la interacción dinámica entre los estanques ni la secuencia real de funcionamiento de las bombas.

- Parte II – Simulación sincronizada. Corresponde a la modelación en MATLAB con resolución temporal de 15 minutos, incorporando criterios de sincronización basados en la disponibilidad energética y en los niveles mínimos y máximos de los estanques de almacenamiento. Esta simulación se ejecuta en dos escenarios de condiciones iniciales:
  - Escenario A: estanques vacíos (0 L en EAM, EAI y EAP).
  - Escenario B: estanques con los volúmenes resultantes tras el Escenario A.

La sincronización de la operación se definió bajo los siguientes criterios metodológicos:

1. Priorizar el funcionamiento de las bombas de mayor consumo durante las horas de máxima irradiación solar (11:00–16:00).
2. Utilizar los estanques intermedios como almacenamiento temporal, desacoplando hidráulicamente las distintas etapas.
3. Coordinar la operación de cada bomba en función de la generación solar disponible y de los mínimos hidráulicos establecidos, evitando pérdidas o detenciones innecesarias.

Esta estrategia busca maximizar la producción de agua y el aprovechamiento de la energía disponible, asegurando que el sistema opere de manera

confiable con un suministro 100% solar fotovoltaico, sin necesidad de apoyo de fuentes auxiliares no renovables.

#### **4.5. Comparación del modelo**

La comparación del modelo busca verificar que las simulaciones realizadas en MATLAB reproducen órdenes de magnitud, tendencias y restricciones operativas observadas en una planta real de referencia. En particular, se contrasta el desempeño del sistema modelado con los resultados reportados para la planta piloto modular de Caleta Rumena (Quezada, 2024), incorporando las modificaciones hidráulicas y eléctricas consideradas en esta tesis (sustitución de bombas principales por Hydra-Cell G25-E y G10-S y operación 100% FV sin baterías).

##### **4.5.1. Marco de comparación**

- Verificar que el modelo sincronizado reproduce niveles realistas de producción de agua, tiempos efectivos de operación y consumo energético diario.
- Identificar diferencias atribuibles a condiciones de trabajo (bombas, fuente de alimentación, estrategia de sincronización) entre la planta piloto y el sistema simulado.

#### 4.5.2. Fuentes de datos y entradas del modelo

- Curvas FV: series horarias diarias promedio obtenidas con Explorador Solar (CNE) para la ubicación de estudio. Se interpolaron a 15 min e incluyeron pérdidas globales del 30% y eficiencia de inversores del 95%.
- Parámetros hidráulicos y eléctricos: caudal, presión y rangos de potencia por etapa tomados de registros de la planta piloto de Caleta Rumena (base de referencia), más las curvas y ecuaciones de potencia de fabricante para las bombas Hydra-Cell G25-E y G10-S que reemplazan a las bombas originales en esta tesis.
- Topología y reglas operativas: filtración en tres etapas (ET0, ET1, ET2), estanques EAM–EAI–EAP con mínimos y máximos operativos, y reglas de sincronización que encienden cada bomba solo si hay potencia FV suficiente y se cumplen mínimos hidráulicos.

#### 4.5.3. Escenarios de simulación para la comparación

Se evaluaron tres referencias:

1. Sin sincronización: techo teórico de energía y tiempos posibles (no incorpora dinámica de estanques).
2. Escenario A (arranque en seco): EAM, EAI y EAP iniciales en 0 L.
3. Escenario B (condiciones iniciales favorables): EAM = 5 000 L, EAI parcial (> mínimo), EAP = 0 L.

Estos escenarios se ejecutaron con resolución de 15 min, aplicando las reglas de despacho por potencia FV y mínimos hidráulicos.

#### 4.5.4. Indicadores y criterios de comparación

- Producción diaria de permeado (EAP, L/día): suma de caudal horario de ET2.

*Criterio:* el modelo debe producir el mismo orden de magnitud que la planta piloto; diferencias se interpretan a la luz de cambios de bombas, número de paneles y ausencia de baterías.

- Tiempo efectivo de operación por etapa (h/día): horas en ON dentro de la ventana FV.

*Criterio:* coherencia con las restricciones de potencia FV y con mínimos de EAM/EAI.

- Consumo energético total (kWh/día): integral de potencia eléctrica por bomba.

*Criterio:* valores comparables o inferiores a la planta piloto si la sincronización y el reemplazo de bombas mejoran el uso de la energía.

- Consistencia hidráulica: no sobrepasar capacidades de estanques; cuando el volumen simulado excede la capacidad de EAP, se reporta como permeado total diario y se señala el excedente no almacenable (se asume consumo/distribución durante la jornada).

## 5. RESULTADOS

En esta sección se presentan los resultados obtenidos a partir de los cálculos de potencia de las bombas y de las simulaciones energéticas desarrolladas en MATLAB para la planta desaladora modular alimentada con energía fotovoltaica. Con el fin de evaluar de manera progresiva el desempeño del sistema, los resultados se organizan en dos partes diferenciadas:

- **Parte I – Simulación sin sincronización:** comprende el cálculo de la potencia de trabajo de las bombas, la estimación de la generación fotovoltaica y el consumo energético por etapa, bajo un esquema de operación teórica que no considera la interacción dinámica entre los estanques ni la secuencia real de funcionamiento de las bombas.
- **Parte II – Simulación sincronizada:** corresponde a la modelación en MATLAB con resolución temporal de 15 minutos, incorporando criterios de sincronización basados en la disponibilidad energética y en los niveles mínimos y máximos de los estanques de almacenamiento. Esta simulación considera dos escenarios de condiciones iniciales:

Escenario A: estanques vacíos (0 L en EAM, EAI y EAP).

Escenario B: estanque de agua de mar lleno (EAM = 5.000 L), con un volumen parcial en el estanque intermedio (EAI = 968 L) y el estanque de agua permeada vacío (EAP = 0 L). Esta condición representa el estado alcanzado tras el arranque en seco.

Esta estructura permite comparar el comportamiento del sistema bajo un esquema teórico y otro ajustado a condiciones más realistas de operación, identificando las mejoras potenciales en eficiencia energética y en producción de agua al considerar la dinámica de los estanques y la sincronización de las bombas.

### **5.1. Cálculo de la potencia y consumo energético de las bombas**

Para dimensionar correctamente la demanda energética de la planta desaladora modular, se estimó la potencia de operación de cada una de las bombas involucradas en el proceso. Los cálculos se realizaron a partir de las condiciones de caudal y presión definidas para cada equipo, utilizando las expresiones recomendadas por el fabricante en el caso de las bombas de desplazamiento positivo (Hydra-Cell G25-E y G10-S) y fórmulas hidráulicas convencionales en el caso de las bombas centrífugas.

Estos cálculos se fundamentaron en las condiciones de diseño de la planta modular y en los registros de operación de la planta piloto ubicada en Caleta Rumena, Región del Biobío (Quezada, 2024). De esta manera, los valores empleados en la simulación integran tanto parámetros teóricos como antecedentes empíricos de un caso real.

En la Tabla 4 se presentan las condiciones de operación de la BAP (Hydra-Cell G25-E) y de la BAP2 (Hydra-Cell G10-S), expresadas en términos de caudal, presión de trabajo y velocidad de rotación. La BAP se consideró en

dos configuraciones: operación con una membrana ( $BAP_{M1}$ ) y con dos membranas ( $BAP_{M2}$ ). Dichos valores se obtuvieron a partir de las curvas de flujo máximo a presión designada entregadas por el fabricante (ver Figura A1 en Anexo A).

Tabla 4. Condiciones de operación de las bombas de alta presión.

Bomba	rpm	Q (L/min)	P (bar)	$P_{FV}$ (kW)
BAPM1 (G25-E, 1 membrana)	443	29,1	39,7	2,96
BAPM2 (G25_E, 2 membranas)	887	58,2	39,7	5,94
BAP2 (G10-S)	862	18,2	16,8	0,88

(Fuente: Elaboración propia a partir de catálogos Hydra-Cell G25 y G10.)

En la Tabla 5 se resumen las condiciones de operación de las bombas centrífugas: B1 y B2 en sus modos de una y dos membranas, y la B3. Los valores de caudal (Q) y altura manométrica (H) fueron obtenidos de catálogos de fabricante y de las curvas de funcionamiento de cada bomba (ver Figura A2 para la bomba B1 y Figura A3 para la bomba B3 en Anexo A). Con estos parámetros se calcularon la potencia hidráulica ( $P_h$ ), la potencia en eje ( $P_{eje}$ ), la potencia de motor ( $P_{motor}$ ) y finalmente la potencia equivalente demandada desde el campo fotovoltaico (PFV), incorporando los rendimientos hidráulicos ( $\eta_b$ ), del motor ( $\eta_m$ ) y del inversor ( $\eta_{inv}$ ).

Tabla 5. Condiciones de operación de las bombas centrífugas.

Bomba	Q (L/min)	H (m)	$\eta_b$ (%)	$\eta_m$ (%)	$\eta_{inv}$ (%)	$P_h$ (kW)	$P_{eje}$ (kW)	$P_{motor}$ (kW)	$P_{FV}$ (kW)
B1 – Captación	60,0	59	66	90	95	0,58	0,88	1,10	1,15
B2 <sub>M1</sub> – Alimentación a BAP	29,1	36	70	90	95	0,17	0,25	0,27	0,29
B2 <sub>M2</sub> – Alimentación a BAP	58,2	36	85	90	95	0,34	0,40	0,44	0,47
B3 – Alimentación a BAP2	30,6	46	35	90	95	0,23	0,66	0,73	0,77

(Fuente: Elaboración propia a partir de catálogos Bestflow, WEG y Pedrollo.)

Las potencias reflejan la secuencia completa de transformación energética: desde la potencia hidráulica necesaria para movilizar el caudal y superar la altura manométrica, hasta la potencia final que debe ser suministrada por los paneles solares. Este enfoque permite identificar de manera explícita el efecto de cada eficiencia (hidráulica, del motor y del inversor) y destacar los equipos más críticos en términos de desempeño, como la bomba B3, cuya baja eficiencia hidráulica incrementa significativamente la demanda sobre el sistema fotovoltaico.

En la Tabla 6 se presentan las potencias equivalentes demandadas desde el campo fotovoltaico (PFV) para cada bomba, junto con los tiempos de operación diarios y los consumos energéticos obtenidos en la simulación. De esta forma, se cuantifica directamente la energía que cada equipo requiere de

los paneles solares para sostener su funcionamiento, diferenciando entre el consumo en eje y el consumo ajustado a condiciones eléctricas reales.

Tabla 6. Potencia de operación y consumo energético de las bombas.

Bomba	$P_{FV}$ (kW)	Tiempo de operación diario (h)	Consumo FV (kWh/día)
B1	1,15	10,0	11,50
B2 <sub>M1</sub>	0,29	1,2	0,35
B2 <sub>M2</sub>	0,47	8,8	4,14
BAP <sub>M1</sub>	2,96	2,0	5,93
BAP <sub>M2</sub>	5,94	8,0	47,53
B3	0,77	10,0	7,70
BAP2	0,88	10,0	8,80

(Fuente: Elaboración propia.)

### 5.1.1. Potencia requerida por las membranas de filtración

Además del cálculo de la potencia de las bombas, se estimó de manera independiente la potencia necesaria para superar la pérdida de carga que se produce en las membranas de nanofiltración (modelo DOW FILMTEC NF90-400). Este análisis complementario permite desagregar la contribución energética específica del proceso de filtración, lo que resulta útil para respaldar decisiones de diseño y confirmar la consistencia de los valores obtenidos para las bombas de alta presión.

La caída de presión típica de estas membranas se aproxima a 3,4 bar bajo condiciones nominales de operación, lo que equivale a una resistencia significativa que debe ser compensada por las bombas. Para su estimación se

consideró el caudal de alimentación en cada caso y una eficiencia global del sistema de filtrado de 85%.

Los cálculos se realizaron para tres configuraciones de operación: la bomba Hydra-Cell G25-E funcionando con una membrana, con dos membranas, y la bomba Hydra-Cell G10-S en configuración de una membrana. Los resultados se presentan en la Tabla 7.

Tabla 7. Potencia requerida para superar la caída de presión en las membranas de filtración.

Configuración	Caudal (L/min)	Caudal (m <sup>3</sup> /s)	$\Delta P$ (bar)	Potencia requerida (kW)
G25-E con 1 membrana	29,1	0,000485	3,4	0,194
G25-E con 2 membranas	58,2	0,000970	3,4	0,388
G10-S con 1 membrana	18,2	0,000303	3,4	0,121

(Fuente: Elaboración propia a partir de especificaciones DOW FILMTEC y Wanner Engineering, 2022).

Aunque la potencia necesaria para vencer la pérdida de carga de las membranas es relativamente baja en comparación con la potencia total de las bombas de alta presión, su cálculo independiente permite dimensionar con mayor precisión el aporte energético del módulo de filtración y verificar que los valores simulados son consistentes con lo esperado para este tipo de membranas.

En conjunto, los resultados confirman que la mayor fracción del consumo energético de la planta se concentra en las bombas de alta presión, siendo la resistencia de las membranas una parte importante pero no predominante en la demanda global.

## 5.2. PARTE I: SIMULACIÓN SIN SINCRONIZACIÓN

### 5.2.1. Producción energética del sistema fotovoltaico

Una vez determinadas las potencias de las bombas y sus consumos energéticos, se evaluó la capacidad del sistema fotovoltaico para abastecer la planta sin aplicar aún criterios de sincronización. Este primer análisis corresponde a un escenario teórico, en el cual se asigna un número fijo de paneles a cada bomba y se estima el tiempo potencial de operación de acuerdo con la generación diaria de energía en el mes de enero, considerado como mes crítico por la alta radiación solar y la elevada demanda hídrica.

En la Tabla 8 se presenta el número de paneles asignados a cada bomba y el tiempo máximo de operación estimado. En este escenario, la cantidad de paneles se dimensionó de manera que cada bomba pudiera operar hasta 10 horas diarias, asumiendo que toda la energía generada por dichos paneles se destina de forma exclusiva a su funcionamiento, sin considerar aún la interacción dinámica entre etapas.

Tabla 8. Número de paneles necesarios para cada bomba y tiempos posibles de trabajo (sin sincronización).

Bomba	Número de paneles	Tiempo posible de trabajo (h)
B1	13	10
B2	3	10
BAP	30	10
B3	8	10
BAP <sub>2</sub>	12	10

(Fuente: Elaboración propia.)

Los resultados muestran que la BAP requiere con diferencia el mayor número de paneles (30), lo que confirma su rol como principal consumidora de energía dentro del sistema.

### 5.2.2. Generación horaria diaria promedio para cada etapa

Para visualizar el comportamiento energético del sistema en este escenario, se construyeron curvas de potencia generada y utilizada para cada etapa del proceso, utilizando un intervalo de 15 minutos en MATLAB. En este análisis, el número de paneles asignado a cada bomba se dimensionó de manera que todas pudieran operar durante 10 horas diarias, asumiendo un uso continuo mientras existiera suficiente generación fotovoltaica disponible. La Figura 3 muestra la generación fotovoltaica en cada etapa, con las horas de uso y la potencia utilizada.

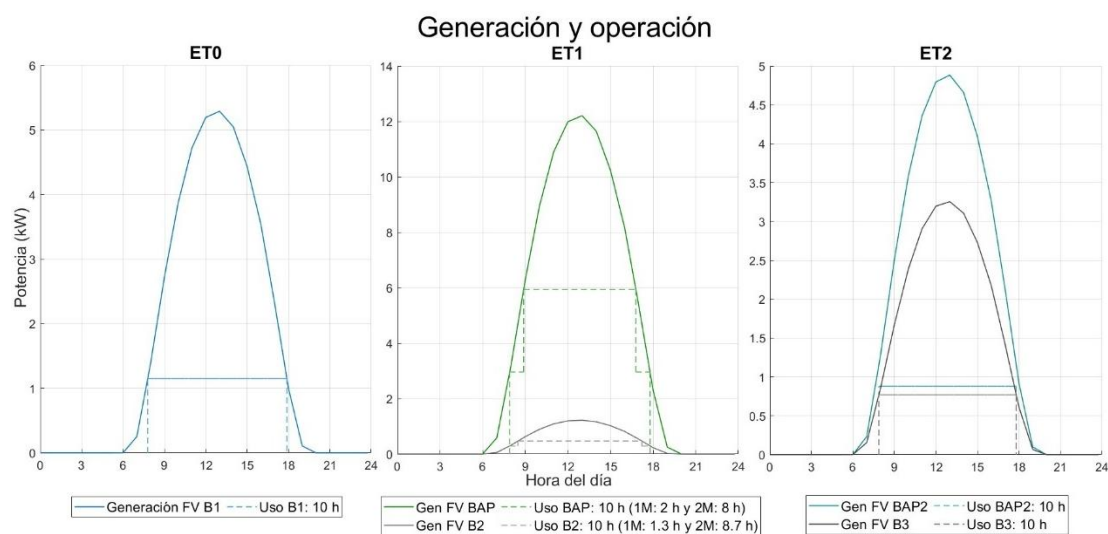


Figura 3. Generación fotovoltaica, horas de uso y potencia utilizada en la ET0, ET1 y ET2. (Fuente: Elaboración propia.)

En estas figuras se observa que la operación de las bombas se concentra en las horas centrales del día, coincidiendo con el mayor nivel de irradiación solar. La ET0 mantiene un patrón estable de consumo durante las 10 horas asignadas, ajustándose al número de paneles y a la generación fotovoltaica disponible. En la ET1, el comportamiento es más variable: la BAP opera 2 horas en modo 1M y 8 horas en modo 2M, siendo la bomba que demanda la mayor potencia, alcanzando los 52,77 kWh/día en consumo energético, y generando la mayor potencia con 92,05 kWh/día. La B2, por su parte, mantiene consumos menores, pero igualmente sostenidos durante las 10 horas. En la ET2, tanto la BAP2 como la B3 mantienen un perfil de consumo constante, limitado por la disponibilidad de irradiación, pero también dimensionados para alcanzar las 10 horas de operación.

### 5.2.3. Generación y consumo energético total

En la Tabla 9 se resumen los valores de generación y consumo energético durante la jornada simulada.

Tabla 9. Generación y consumo energético de las bombas diaria (Sin sincronización).

Bomba	Generación total (kWh/día)	Energía consumida (kWh/día)
B1	39,9	11,5
B2	9,2	4,5
BAP	92,0	53,4
B3	24,5	7,7
BAP <sub>2</sub>	36,8	8,8

(Fuente: Elaboración propia.)

El propósito de esta simulación sin sincronización fue establecer un tope de referencia en la cantidad de paneles necesarios para que cada bomba pudiera operar 10 horas diarias, sin considerar las restricciones hidráulicas ni la secuencia real de la planta. De esta manera, se obtuvo una primera aproximación al comportamiento energético del sistema en condiciones ideales, lo que permitió visualizar el nivel de sobredimensionamiento y contar con una base de comparación para el análisis posterior con sincronización.

Los resultados indican que, aunque la generación solar es suficiente para cubrir la demanda global, el aprovechamiento energético real se ve limitado por la falta de coordinación entre etapas. La BAP concentra la mayor parte del consumo, utilizando una gran parte de la energía generada. En contraste, la B1, B2 y B3 muestran una baja proporción de uso respecto a la energía disponible, lo que refleja un desajuste operativo cuando no se consideran los volúmenes y secuencias de operación de los estanques.

En resumen, este escenario teórico sin sincronización funciona como un punto de partida metodológico, proporcionando un techo en el número de paneles y en la energía potencialmente disponible para cada bomba. Sin embargo, no refleja condiciones realistas de operación, ya que no considera la interacción dinámica de los estanques y las secuencias de funcionamiento. Por lo tanto, es esencial avanzar hacia estrategias de sincronización, las cuales integren

tanto la disponibilidad energética como las restricciones hidráulicas de los estanques, tema que se aborda en la Parte II.

### **5.3. PARTE II – SIMULACIÓN SINCRONIZADA**

#### **5.3.1. ESCENARIO A: Simulación con estanques iniciales vacíos**

En este primer escenario se modeló la operación sincronizada de la planta considerando que el EAM, el EAI y EAP se encontraban vacíos al inicio de la jornada. Esta condición corresponde a un arranque en seco, en el cual es necesario acumular primero volúmenes mínimos en los estanques para habilitar la operación de las bombas de filtración.

El modelo sincronizado en MATLAB, con resolución de 15 minutos, aplicó criterios de operación que restringen el funcionamiento de las bombas únicamente cuando se cumplen simultáneamente dos condiciones: (i) disponibilidad suficiente de energía fotovoltaica y (ii) volúmenes mínimos establecidos en los estanques. De este modo, se evita el funcionamiento en vacío y se optimiza el uso de la energía solar disponible.

##### **5.3.1.1 Generación disponible y potencia utilizada**

El propósito de este análisis es evaluar cómo la generación fotovoltaica se distribuye durante el día en función de la demanda de las bombas, con el fin de optimizar el uso de la energía disponible. La disminución en las horas de funcionamiento de las bombas se debe a que el sistema no necesita operar

durante las 10 horas continuas planteadas inicialmente. Con 8 horas de operación, el sistema logra satisfacer la cantidad de agua necesaria para operar las demás etapas sin necesidad de estar funcionando todo el día. Esto se debe a que, una vez que el agua es transferida a los estanques intermedios (EAM y EAI), el sistema tiene suficiente reserva para operar sin interrupciones. En este escenario, el tiempo de funcionamiento de la B1 se ajusta a 8 horas, lo que garantiza que la planta no se detenga por falta de agua y se optimiza el uso de la energía generada por los paneles fotovoltaicos.

En las Figuras 4, 5 y 6 se presentan la generación fotovoltaica diaria y la potencia utilizada por las bombas en las tres etapas del sistema durante el Escenario A. En la Figura 4, correspondiente a la ET0, se observa que la curva de potencia generada sigue la forma típica de la irradiación solar: un aumento progresivo en la mañana, un máximo al mediodía y un descenso por la tarde. La operación de la B1 se concentra en torno a 8 horas continuas, lo que permite alimentar de manera estable el EAM. Este ajuste de 8 horas se debe a que, con ese tiempo de funcionamiento, se satisface la cantidad de agua necesaria para operar las otras etapas sin que la planta se atenga por falta de agua.

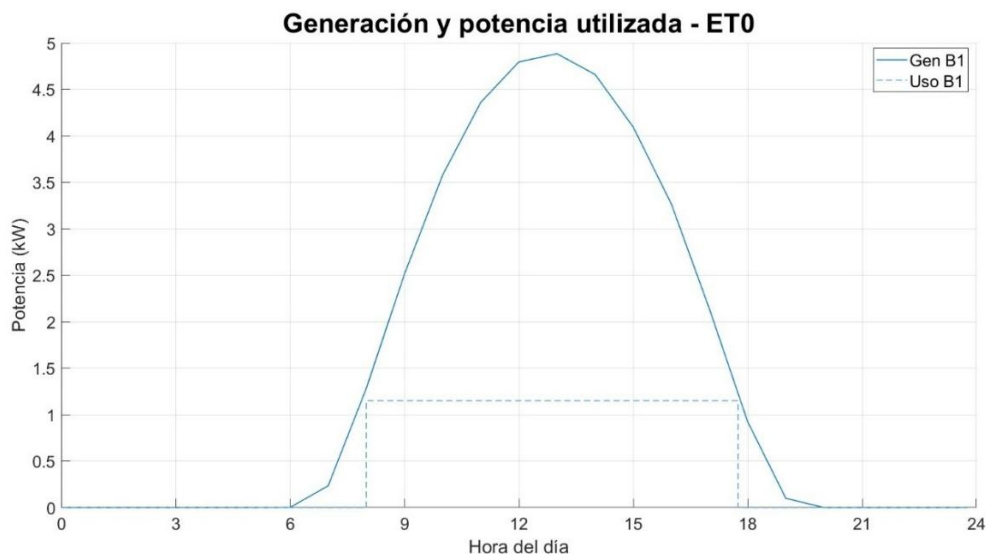


Figura 4. Generación y potencia utilizada en la ET0 – Escenario A. (Fuente: Elaboración propia.)

En la Figura 5, correspondiente a la ET1, se aprecia un comportamiento más dinámico. La BAP concentra su operación en las horas centrales del día, mientras que la B2 acompaña su funcionamiento con consumos menores, manteniéndose ambas en actividad por cerca de 9 horas dentro de la jornada.

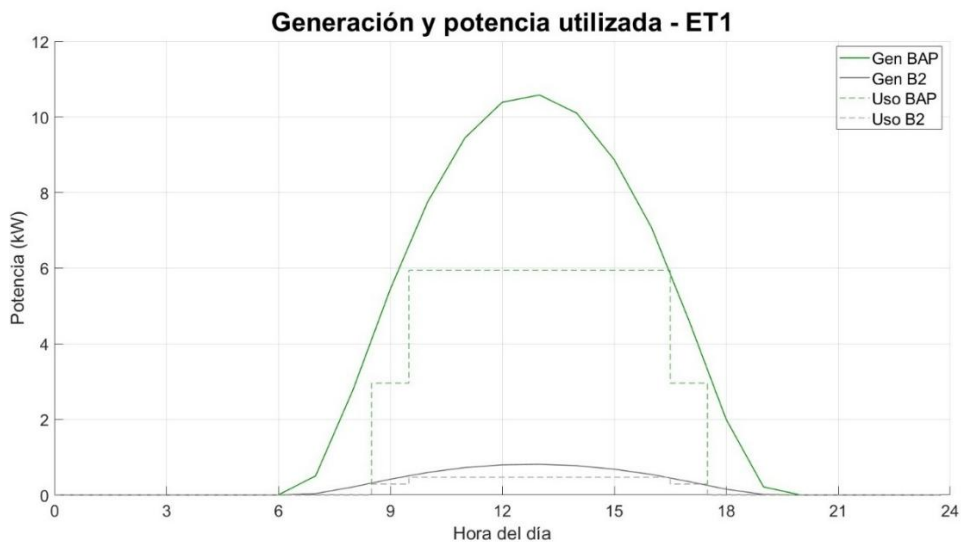


Figura 5. Generación y potencia utilizada en la ET1- Escenario A. (Fuente: Elaboración propia.)

En la Figura 6, que muestra la ET2, la operación se concentra en una ventana más acotada, cercana a las 7 horas de funcionamiento. Ambas bombas trabajan de forma coordinada durante este periodo, habilitando la transferencia hacia el EAP.

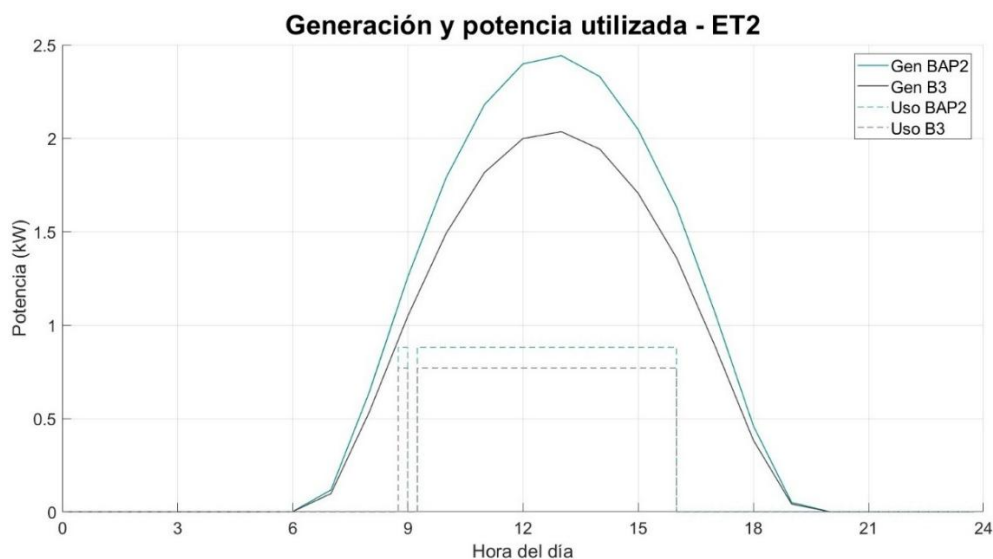


Figura 6. Generación y potencia utilizada en la ET2. (Fuente: Elaboración propia.)

Tabla 10. Energía fotovoltaica generada y utilizada por el sistema - Escenario A.

Bomba	Generación (kWh)	Energía usada (kWh)
B1	36,8	9,7
B2	6,1	3,9
BAP	79,8	47,5
B3	15,3	5,4
BAP2	18,4	6,2

(Fuente: Elaboración propia.)

Se puede apreciar en la Tabla 10 la relación entre la energía generada y la energía efectivamente utilizada por cada bomba en el Escenario A. En este escenario, los volúmenes mínimos de los estanques influyen directamente en

el comportamiento de las bombas. Por ejemplo, las bombas de captación (B1) y transporte (B2) no requieren operar durante las 10 horas completas debido a la interacción con los niveles de los estanques. Cuando el EAM alcanza su volumen mínimo de operación, las bombas de alimentación (como B1) pueden reducir su tiempo de funcionamiento sin afectar la operación general del sistema, ya que la energía generada se ajusta para operar las otras etapas sin generar un excedente innecesario.

Por otro lado, la BAP requiere una mayor cantidad de energía debido a su función crítica en la planta, especialmente en los momentos de mayor demanda de agua, por lo que su energía utilizada es proporcionalmente mayor en comparación con las bombas de menor consumo. La BAP2 y B3, aunque operan de manera constante durante el día, también están limitadas por las capacidades de los estanques, lo que ajusta su energía utilizada en función de la cantidad de agua almacenada en EAI y EAP.

### **5.3.1.2 Evolución de estanques**

En la Figura 7 se presenta la evolución horaria de los volúmenes en los estanques EAM, EAI y EAP durante el Escenario A. Se observa que, tras el arranque en seco, el EAM comienza a llenarse en la mañana hasta alcanzar su volumen operativo mínimo de 1.000 L, condición necesaria para habilitar la transferencia hacia el EAI. Una vez alcanzado ese umbral, el estanque se continúa llenando de forma rápida hasta alcanzar su capacidad máxima de

5.000 L. Durante la simulación en MATLAB, se ajustaron los mínimos operativos para llevar al EAM al valor más beneficioso para la ET2, considerando que el EAM se limitó a 250 L como mínimo para habilitar la operación de la etapa. Este desfase temporal explica el retraso en el inicio de la etapa de permeado.

A lo largo del día, el EAI mantiene volúmenes variables sin llegar a valores altos de almacenamiento, lo que concuerda con su función principal de actuar como un estanque de transición y no de acumulación final. El EAP, en cambio, presenta un crecimiento tardío y más restringido, reflejando que su llenado depende de que el EAI alcance primero los volúmenes habilitantes. Una vez activada la ET2, el estanque de permeado crece rápidamente hasta completar su capacidad nominal de 5.000 L.

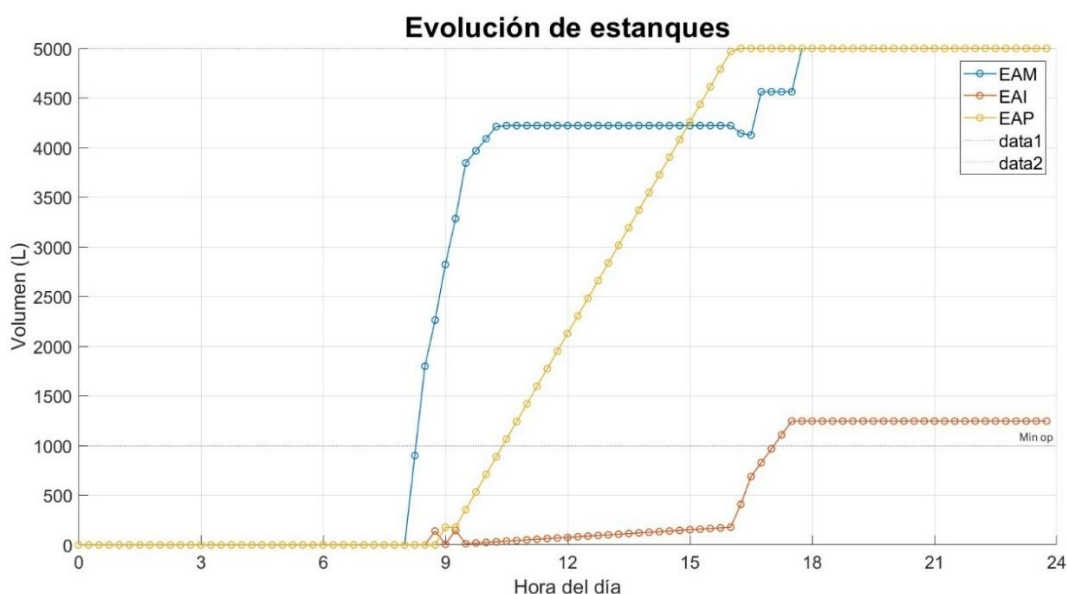


Figura 7. Evolución horaria de los volúmenes en los estanques EAM, EAI y EAP – Escenario A. (Fuente: Elaboración propia.)

La Figura 8 muestra los volúmenes finales de cada estanque al cierre de la jornada. El EAM alcanzó su máxima capacidad, el EAI acumuló 1.247 L (25% de su capacidad), suficiente para sostener parcialmente la segunda etapa de filtración y poder comenzar la ET2 el siguiente día de funcionamiento de la planta, y el EAP se representa lleno con 5.000 L. Sin embargo, el modelo de simulación contabilizó un volumen total producido de 5.855,8 L en el EAP, lo que implica un excedente de aproximadamente 855,8 L que en la práctica no puede acumularse debido a la limitación física del estanque, pero se tiene en cuenta como el total del agua permeada puede producir la planta.

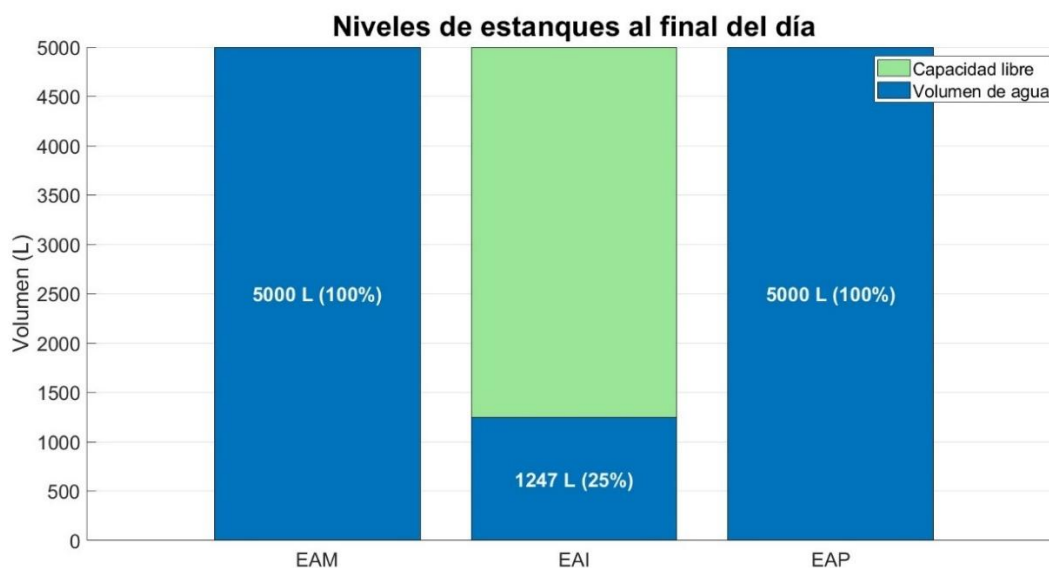


Figura 8. Volumen final de los estanques al cierre de la jornada – Escenario A.  
(Fuente: Elaboración propia.)

Este resultado refleja que, aunque en la gráfica el volumen del EAP se detiene en 5.000 L para reproducir la capacidad real del estanque, el sistema efectivamente produjo un volumen mayor, el cual se habría ido utilizando

durante el día en condiciones reales de operación. Lo más relevante es que, incluso bajo la condición restrictiva de un arranque en seco, la planta fue capaz de generar más de 5,8 m<sup>3</sup> de agua permeada en la jornada, lo que confirma la efectividad del esquema de sincronización.

### 5.3.1.3 Producción horaria de permeado (EAP)

En la Figura 9 se presenta la producción horaria de agua en el EAP durante el Escenario A. Se observa que la producción comienza de manera tardía, alrededor de las 8:30 h, ya que previamente el EAI debía alcanzar el volumen mínimo de 250 L requerido para habilitar la segunda etapa de filtración.

Una vez activada la ET2, la producción se mantiene prácticamente constante entre las 10:00 y las 15:00 horas, con valores cercanos a 700 L por hora. Hacia el cierre de la tarde la producción se interrumpe, en concordancia con la reducción de la radiación solar y el menor tiempo disponible de operación.

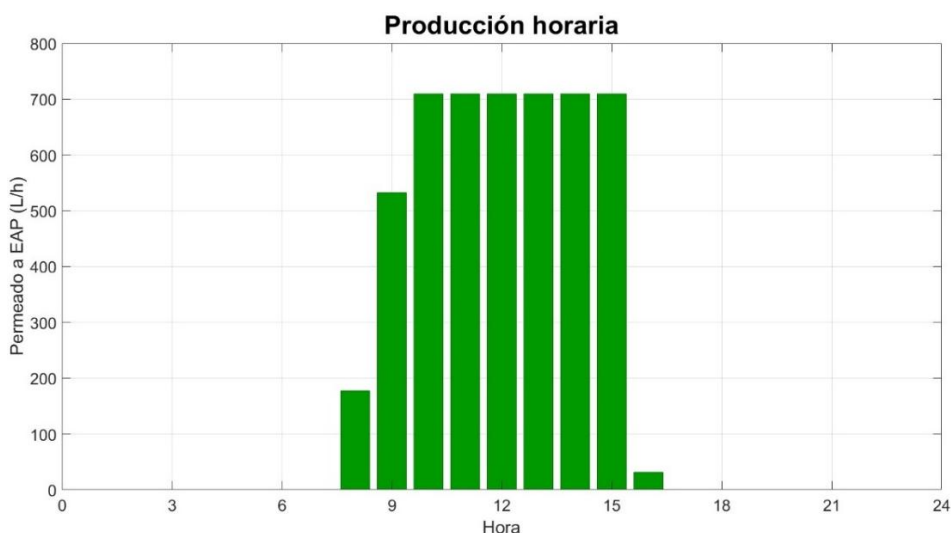


Figura 9. Producción horaria y acumulada de agua permeada en el estanque EAP – Escenario A. (Fuente: Elaboración propia.)

Este resultado confirma que, incluso bajo condiciones restrictivas de arranque en seco, la planta logra no solo completar el estanque de agua tratada, sino también generar un volumen adicional que incrementa su aporte real de agua potable disponible.

#### **5.3.1.4 Tiempo efectivo de operación por bomba y etapa**

La Tabla 11 presenta el número de paneles asignados a cada bomba y el tiempo efectivo de operación durante el Escenario A. Estos valores corresponden a la simulación en MATLAB, que precisó el dimensionamiento mínimo necesario para cubrir la demanda energética de cada bomba bajo las condiciones de arranque en seco.

Es importante destacar que en comparación con la simulación sin sincronización (donde se asignaron más paneles), en este caso de sincronización, el arreglo de paneles se ajustó para evitar sobredimensionar el sistema, garantizando suficiente energía para cada bomba, pero sin exceder el número de paneles necesarios. En este escenario, se incorporó un margen de seguridad del 5% (1,05) para asegurar que las bombas operen sin interrupciones, pero también evitar el sobrecoste por paneles innecesarios.

Tabla 11. Cantidad de paneles asignados y tiempo efectivo de operación de las bombas – Escenario A.

Bomba	N° paneles	Tiempo de operación (h)
B1	13	8,4
B2	2	9,0
BAP	26	9,0
B3	5	7,0
BAP2	6	7,0

(Fuente: Elaboración propia)

Los resultados muestran que la B1 alcanzó un tiempo efectivo de operación de 8,4 horas, mientras que la B2 y la BAP se mantuvieron en funcionamiento durante 9,0 horas, destacándose como las de mayor continuidad en este escenario. En tanto, la B3 y la BAP2 registraron tiempos de 7,0 horas cada una, lo que está coherente con el retraso inicial asociado al llenado del EAI.

En conjunto, la mayoría de las bombas logró operar más de 7 horas en la jornada, lo que refleja una sincronización efectiva del sistema, aún bajo la condición restrictiva de arranque en seco.

### **5.3.2. ESCENARIO B: Simulación con estanques condicionados**

Este segundo escenario se construyó a partir de los volúmenes alcanzados al finalizar el arranque en seco (Escenario A), es decir, con el EAM lleno con 5.000 L y el EAI con 1247 L (25% de su capacidad). El EAP se mantuvo vacío al inicio de la simulación. Esta condición inicial representa un arranque más favorable, donde se dispone de agua inmediatamente para alimentar la primera etapa de filtración y de un volumen parcial en el EAI suficiente para habilitar anticipadamente la segunda etapa. Con ello se reduce la latencia de

operación observada en el Escenario A, y se busca analizar cómo la mayor disponibilidad inicial de agua impacta en la eficiencia global del sistema, favoreciendo la coincidencia entre la generación fotovoltaica y la operación de las bombas.

#### **5.3.2.1 Generación disponible y potencia utilizada**

En este escenario se mantuvo la misma asignación de paneles definida en la simulación de MATLAB, utilizando los valores finales del Escenario A como condición inicial. Las Figuras 10, 11 y 12 muestran la comparación entre la generación fotovoltaica y la potencia utilizada por las bombas en cada etapa del proceso.

En la Figura 10, correspondiente a la ET0, se observa que la operación de la B1 se extiende de manera continua desde las primeras horas de la mañana hasta media tarde, con un total de aproximadamente 7 horas de funcionamiento, coherente con su rol de alimentación al EAM.

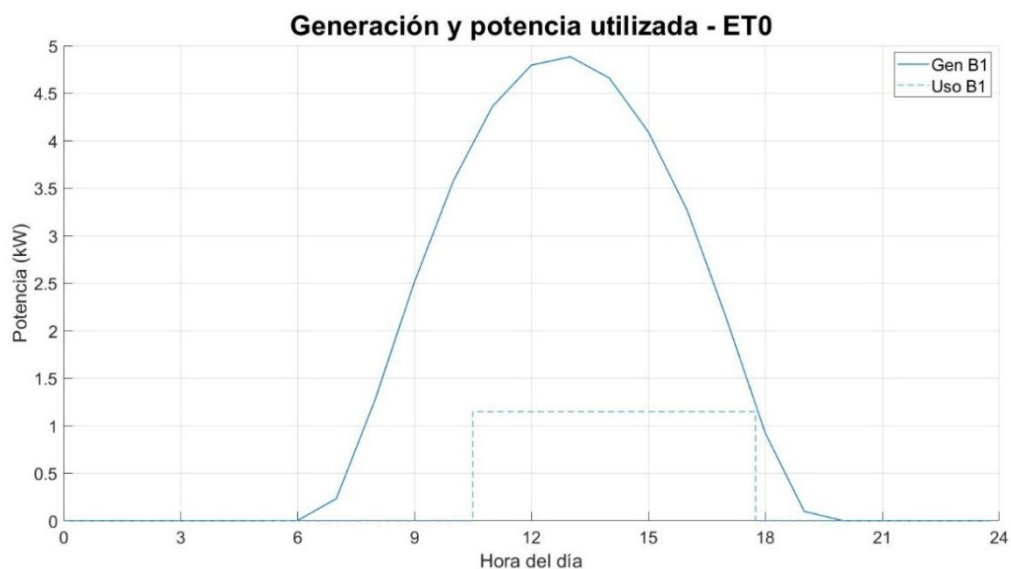


Figura 10. Generación y potencia utilizada en la ET0 – Escenario B. (Fuente: Elaboración propia.)

En la Figura 11, correspondiente a la ET1, se observa la operación coordinada de la BAP y B2. Esta coordinación permite un funcionamiento eficiente de la primera etapa de nanofiltración.

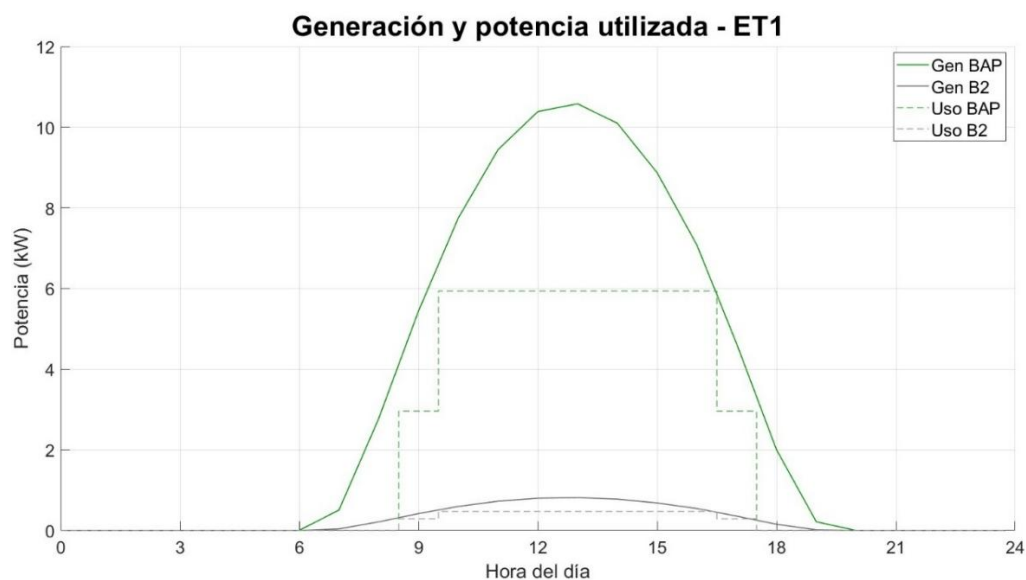


Figura 11. Generación y potencia utilizada en la ET1 – Escenario B. (Fuente: Elaboración propia.)

En la Figura 12, correspondiente a la ET2, se observa un periodo de operación estable para la BAP2 y la B3 durante las horas de mayor irradiación, favorecido por la disponibilidad previa de volumen en el EAI (968 L al inicio de la jornada).

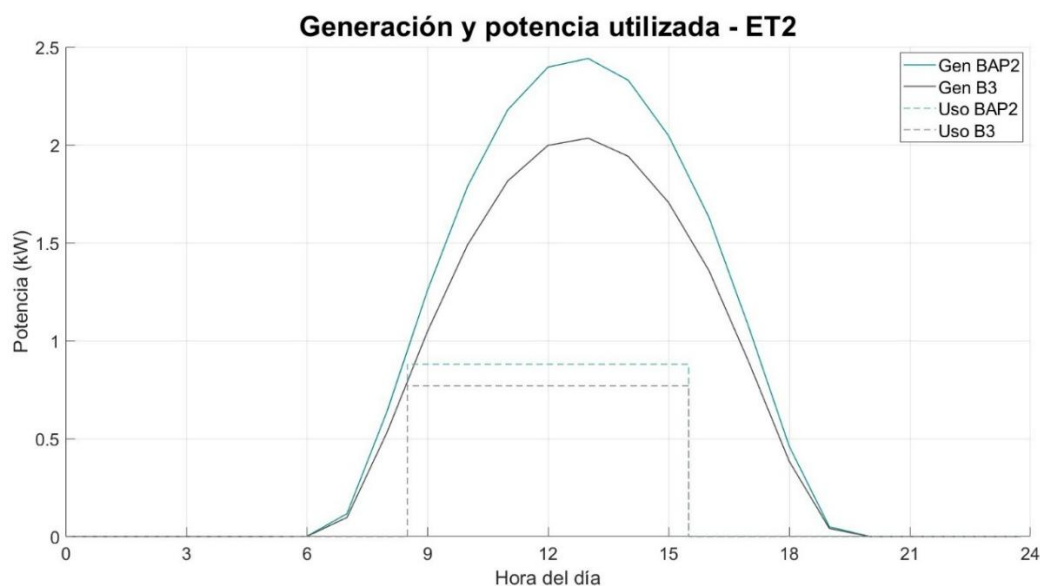


Figura 12. Generación y potencia utilizada en la ET2 – Escenario B. (Fuente: Elaboración propia.)

Tabla 12. Energía fotovoltaica generada y utilizada por el sistema - Escenario B.

Bomba	Generación (kWh)	Energía usada (kWh)
B1	36,8	8,1
B2	6,1	3,9
BAP	79,8	47,5
B3	15,3	5,4
BAP2	18,4	6,2

(Fuente: Elaboración propia.)

En conjunto, los resultados muestran que la BAP concentra la mayor fracción del consumo energético diario, mientras que las bombas B1, B2, B3 y BAP2 cumplen funciones de soporte dentro de la secuencia de filtración. La

disponibilidad inicial de agua en el EAM y el EAI permitió que todas las bombas alcanzaran tiempos efectivos de operación más tempranos y estable.

### 5.3.2.2 Evolución de estanques

En la Figura 13 se muestra la evolución horaria de los volúmenes en los estanques EAM, EAI y EAP durante el Escenario B. Al iniciar con EAM = 5.000 L y EAI = 968 L, la ET1 se habilita desde las primeras horas de la jornada, permitiendo que el EAI supere rápidamente su umbral operativo de 500 L y se active de forma anticipada la ET2. El EAP, en consecuencia, presenta un crecimiento sostenido a lo largo del día hasta completar su capacidad nominal de 5.000 L, momento a partir del cual la gráfica no refleja aumentos adicionales debido a la limitación de almacenamiento.

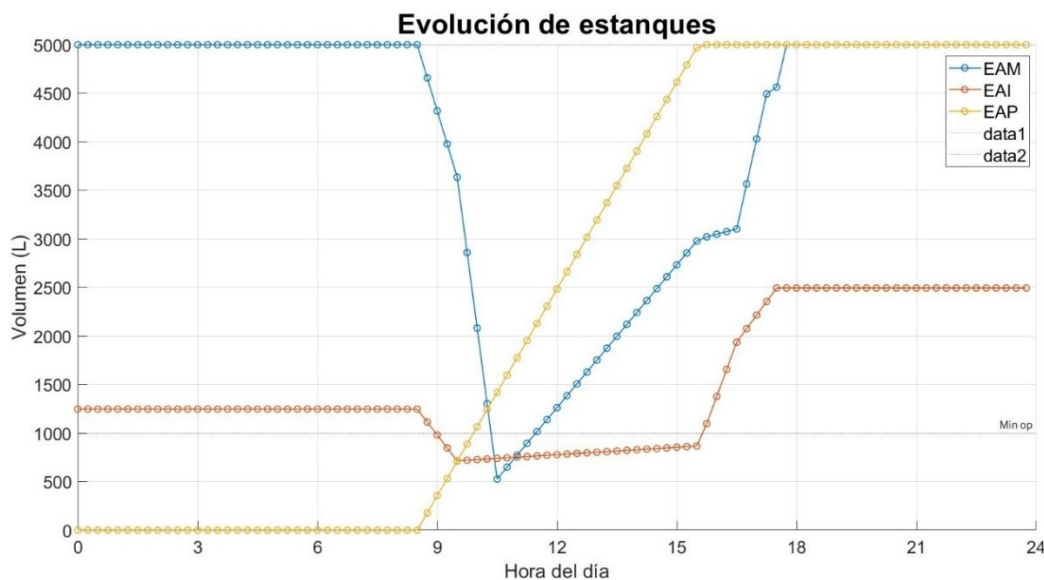


Figura 13. Evolución horaria de los volúmenes en los estanques EAM, EAI y EAP - Escenario B. (Fuente: Elaboración propia.)

La Figura 14 muestra los volúmenes almacenados al término de la jornada: EAM = 5.000 L (100%), EAI = 2.494 L (50%) y EAP = 5.000 L (100%). Al igual que en el Escenario A, los gráficos se limitan a mostrar la capacidad máxima de los estanques, por lo que el EAP aparece como lleno sin reflejar la producción adicional registrada por el modelo.

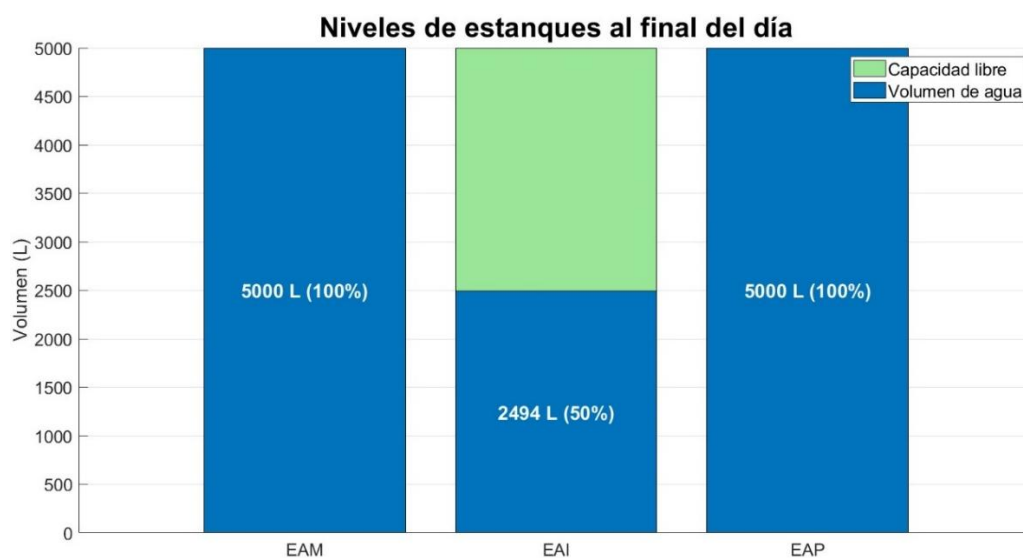


Figura 14. Volumen final de los estanques al cierre de la jornada - Escenario B. (Fuente: Elaboración propia.)

En este escenario, la simulación contabilizó una producción total diaria de 6.211 L de agua permeada, lo que implica un excedente de aproximadamente 1.211 L por sobre la capacidad del EAP. Este volumen adicional, que no puede acumularse, se iría utilizando progresivamente durante la jornada en condiciones reales de operación.

Con volúmenes iniciales favorables y habilitación temprana de las etapas ET1 y ET2, el sistema mantuvo un flujo continuo hacia el EAP, alcanzando su

capacidad máxima y generando una producción diaria superior a la capacidad nominal del estanque de almacenamiento. Este resultado evidencia que, bajo condiciones iniciales más ventajosas, la planta puede superar los 6,2 m<sup>3</sup> diarios de agua tratada.

### 5.3.2.3 Producción horaria de permeado (EAP)

En la Figura 15 se presenta la evolución horaria de la producción de agua permeada durante el Escenario B. Se observa que la producción inicia de manera más temprana en comparación con el Escenario A, concentrándose principalmente entre las 8:00 y 16:00 horas, en coincidencia con el periodo de mayor irradiación solar y con la disponibilidad anticipada de agua en los estanques intermedios.

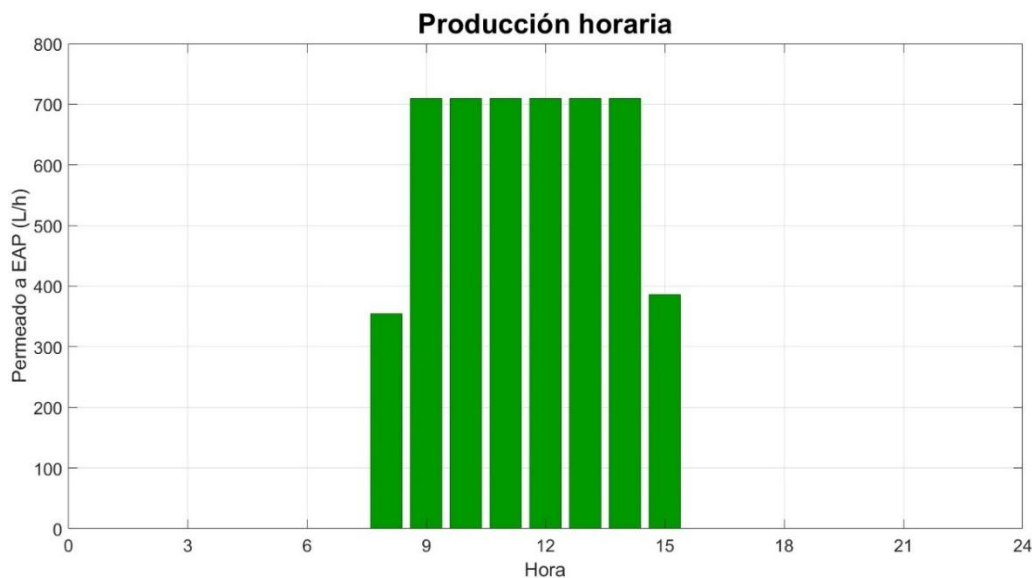


Figura 15. Producción horaria y acumulada de agua permeada en el estanque EAP - Escenario B. (Fuente: Elaboración propia.)

El comportamiento es más estable y continuo, lo que refleja un mejor acoplamiento entre la generación fotovoltaica y la secuencia hidráulica de las etapas de filtración. La operación sostenida BAP2 permitió mantener un caudal regular durante la mayor parte de la jornada, asegurando que el EAP alcanzara su capacidad máxima de 5.000 L.

Este resultado confirma que, bajo condiciones iniciales favorables (EAM lleno y EAI por sobre el mínimo operativo), la planta no solo logra completar el estanque de permeado, sino que también es capaz de producir más de 6 m<sup>3</sup> de agua tratada en un día, evidenciando su potencial para abastecer mayores demandas si se ampliara la capacidad de almacenamiento disponible.

#### **5.3.2.4 Tiempo efectivo de operación por bomba y etapa**

La Tabla 13 presenta la cantidad de paneles asignados y el tiempo efectivo de operación por equipo en el Escenario B. Es importante destacar que el número de paneles se mantiene igual que en la simulación A, ya que se conservan las condiciones de la simulación anterior, modificando únicamente las condiciones iniciales de los estanques (que corresponden a los volúmenes finales del Escenario A). En este caso, el dimensionamiento de paneles obtenido en MATLAB se mantuvo constante entre escenarios, con el fin de evaluar exclusivamente el efecto de las condiciones iniciales de los estanques sobre la continuidad operativa de las bombas. Los valores de tiempo reflejan las horas de funcionamiento acumuladas durante la jornada simulada.

Tabla 13. Cantidad de paneles asignados y tiempo efectivo de operación de las bombas - Escenario B.

Bomba	N° paneles	Tiempo de operación (horas)
B1	12	7
B2	2	9
BAP	26	9
B3	5	7
BAP2	6	7

(Fuente: Elaboración propia.)

En este escenario, las BAP y BAP2 registraron tiempos de operación de 9,0 h y 7,0 h, respectivamente. La B2 también alcanzó 9,0 h, destacándose como la centrífuga de mayor continuidad diaria. En contraste, B1 redujo su tiempo efectivo a 7,0 h, mientras que la B3 se mantuvo en torno a 7,0 h.

Este reparto de tiempos es coherente con el rol de cada equipo dentro de la secuencia de captación, transferencia y filtración: la BAP concentra la mayor demanda energética y asegura la producción de permeado, mientras que la B2 garantiza el flujo hacia el EAI, permitiendo la operación estable de la segunda etapa.

#### **5.4. Comparación del modelo**

Con el fin de verificar la consistencia del modelo de simulación desarrollado en MATLAB, se realizó una comparación con los resultados reportados en la planta piloto de desalinización modular implementada en Caleta Rumena, Región del Biobío, documentada por Quezada (2024).

#### **5.4.1. Condiciones operativas comparativas entre sistemas**

En primer lugar, es importante señalar que los datos de caudal, presión y potencia de las principales bombas fueron obtenidos a partir de mediciones reales realizadas en la planta piloto. Esto significa que los valores utilizados en este estudio son reales y confiables, reflejando las condiciones operativas efectivas de la planta desaladora en su funcionamiento habitual.

Por otro lado, la bomba que fue cambiada en el sistema original fue sustituida por las bombas Hydra-Cell G25-E y G10-S, que operan bajo un modelo diferente al de las bombas anteriores. Para calcular el rendimiento y la potencia de estas bombas, se utilizó la ecuación modelo del fabricante, lo que garantiza que los valores obtenidos son confiables y están basados en las especificaciones técnicas proporcionadas por Hydra-Cell, una marca reconocida por su precisión en los datos de rendimiento. A continuación, se presentan las condiciones de trabajo que definieron tanto el diseño como la alimentación de los sistemas de las bombas, comparando el sistema original con el nuevo sistema modificado. En la Tabla 14 se puede apreciar una comparación detallada de las condiciones operativas, lo que permite visualizar las diferencias en cuanto al tipo de alimentación, número de paneles fotovoltaicos y estrategias de sincronización entre ambos sistemas.

Tabla 14. Comparación de las condiciones de trabajo entre planta piloto (A. Quezada, 2024) y el sistema actual.

Condición		Planta piloto (Andrés Quezada, 2024)	Sistema actual (Simulación)
Fuente de alimentación	de	Baterías + Energía Fotovoltaica	Alimentación directa (Energía fotovoltaica)
Número de Paneles Fotovoltaicos		24 paneles de 430 W	51 paneles de 700 W
Banco de Baterías		16 baterías de 12 V – 200 Ah (38,4 kWh total)	No se utilizan baterías, solo energía fotovoltaica
Estrategia de Sincronización	de	Uso de baterías como almacenamiento de energía	Sincronización directa con la generación fotovoltaica
Tipo de Sistema Fotovoltaico		Off-grid (conectado solo a las bombas y a las baterías)	Directo (alimentación exclusiva de las bombas)
Paneles Fotovoltaicos por Bomba		24 paneles totales	B1 → 13 paneles B2 → 2 paneles BAP → 26 paneles B3 → 5 paneles BAP2 → 6 paneles
Capacidad Total de Almacenamiento		38,4 kWh en baterías	No aplica (sin almacenamiento electroquímico)
Estrategia de Operación	de	Sincronización con las baterías, optimización de la carga de las baterías	Sincronización directa con la energía solar generada sin almacenamiento adicional

(Fuente: Elaboración propia.)

#### 5.4.2. Producción de agua permeada

La planta piloto reporta una producción promedio de aproximadamente 2.500 L/día, operando con apoyo de baterías para extender la jornada.

En la simulación:

- Escenario sin sincronización: no calcula directamente la producción de agua (al no incorporar dinámica de estanques), pero a partir de los

consumos estimados podría alcanzar valores superiores a los observados en la planta piloto.

- Escenario A (arranque en seco): alcanzó 5.885 L, lo que representa el llenado completo del EAP y duplica la producción observada en la planta piloto.
- Escenario B (EAM lleno y EAI parcial al inicio): logró 6.211 L, superando tanto la capacidad del estanque EAP, como la producción observada en la planta piloto. Esto evidencia el potencial de la planta para aumentar la entrega de agua bajo condiciones iniciales favorables.

#### **5.4.3. Tiempos efectivos de operación**

En la planta piloto, los tiempos efectivos de operación de las bombas oscilan entre 4 y 6 h/día, dependiendo de la disponibilidad energética.

En la simulación:

- Escenario sin sincronización: asigna el tiempo posible de 10 h, sin considerar limitaciones de caudal o estanques.
- Escenario A: los tiempos efectivos estuvieron entre 6,5 y 9,0 h, reflejando que, pese al arranque en seco, el sistema logró sostener operación continua durante gran parte de la jornada.
- Escenario B: los tiempos fueron similares, aunque con una mejor distribución horaria gracias a los volúmenes iniciales favorables.

#### **5.4.4. Consumo energético**

En la planta piloto, el consumo energético diario se estima entre 80 y 90 kWh/día (FV + baterías).

En la simulación:

- Escenario sin sincronización: sobreestimó los consumos (>60 kWh/día), al no considerar las restricciones operativas.
- Escenario A: registró 72,7 kWh/día
- Escenario B: alcanzó 71,1 kWh/día

#### **5.4.5. Comparación Global**

La comparación de los resultados permite identificar diferencias claras entre los tres enfoques evaluados. El modelo sin sincronización entrega valores de referencia elevados, al asumir tiempos teóricos de operación cercanos a 10 h por bomba y sin considerar las restricciones de caudal ni de capacidad de estanques. Esto se traduce en consumos energéticos sobrestimados (>60 kWh/día) y en producciones de agua que, aunque superiores a la planta piloto, no representan condiciones operativas realistas.

En contraste, los escenarios sincronizados reproducen de manera más fiel la dinámica de la planta, al integrar simultáneamente la disponibilidad energética fotovoltaica y los mínimos hidráulicos de los estanques (EAM, EAI y EAP). En la Tabla 15 se resumen los resultados comparativos entre la planta piloto y los

diferentes escenarios de simulación, lo que permite visualizar las diferencias clave en términos de producción de agua, tiempos de operación y consumo energético.

- El Escenario A (arranque en seco) alcanzó una producción de 5.855 L, superando la capacidad diaria de la planta piloto, con un consumo de 72,7 kWh/día.
- El Escenario B (condiciones iniciales favorables) superó ese desempeño, logrando 6.211 L y un consumo ligeramente inferior (71,1 kWh/día), lo que refleja un uso más eficiente de la energía generada.

En términos comparativos, estos resultados demuestran que la estrategia de sincronización no solo garantiza la continuidad de operación de las bombas, sino que además optimiza la relación agua producida/energía consumida, aspecto crítico en sistemas autónomos sin baterías. La planta piloto de Rumena alcanza apenas 2.500 L/día con consumos de 80–90 kWh/día, mientras que el modelo sincronizado propuesto duplica o incluso supera esa producción, reduciendo al mismo tiempo el consumo eléctrico.

Tabla 15. Comparación entre la planta piloto y los escenarios de simulación.

Indicador	Planta piloto (Quezada,2024)	Sin sincronización	Escenario A	Escenario B
Producción EAP (L/día)	~2.500	N.d.	5.855	6.211
Tiempo de operación (h)	4–6	10 (teóricos)	6,5–9,0	6,5–9,0
Consumo energético (kWh/día)	80–90	>60	73,7	71,1

(Fuente: Elaboración propia.)

Nota: *N.d.* corresponde a “No determinado”, ya que en el escenario sin sincronización no se calculó directamente la producción de agua permeada.

#### 5.4.6. Consideraciones sobre la simulación

Es importante tener en cuenta que, si bien los resultados obtenidos en la simulación superan los valores de la planta piloto en términos de producción de agua y eficiencia energética, esta es solo una simulación. Si bien se trató de llevarla lo más cercano posible a la realidad, el modelo no reemplaza los valores reales, ya que hay muchas variables difíciles de predecir (como fluctuaciones climáticas, pérdidas de energía, mantenimiento de equipos, etc.) que no pueden ser completamente replicadas en una simulación.

A pesar de estas limitaciones, la simulación proporciona una estimación razonable del comportamiento de la planta desaladora en condiciones ideales. Esto es útil para entender mejor cómo operaría el sistema en condiciones de funcionamiento continuo y ayuda a optimizar la planificación futura de las operaciones de la planta. Por lo tanto, aunque no sustituye los valores reales,

el estudio realizado es un paso importante para mejorar la comprensión y el diseño del sistema de desalinización fotovoltaica modular.

## 6. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos a partir de las simulaciones y análisis desarrollados entregan una aproximación representativa del desempeño técnico y energético de la planta desaladora modular propuesta. Aunque el modelo se basó en parámetros y datos reales, su carácter simulado no considera todas las variaciones y pérdidas propias de la operación en terreno, por lo que los resultados deben entenderse como un escenario de comportamiento potencial más que como una condición real.

El presente trabajo cumplió el objetivo general de evaluar la operación de una planta desaladora modular de nanofiltración alimentada exclusivamente con energía solar fotovoltaica, demostrando su viabilidad técnica mediante la sincronización entre la generación fotovoltaica y los procesos de captación, bombeo y filtración.

En cuanto al primer objetivo específico, se logró caracterizar la demanda energética de cada etapa del sistema, identificando que las bombas de alta presión concentran la mayor proporción del consumo energético, representando más del 70% de la energía total diaria. Las bombas centrífugas presentaron consumos significativamente menores, permitiendo establecer prioridades claras en la gestión energética de la planta.

En relación con el segundo objetivo específico, el dimensionamiento del sistema fotovoltaico permitió definir el número óptimo de paneles requeridos

para cada bomba, alcanzando un total de 51 módulos de 700 Wp distribuidos según la demanda de cada etapa. Este dimensionamiento garantizó una operación completamente autónoma, sin necesidad de baterías, optimizando el aprovechamiento de la radiación solar y reduciendo las pérdidas por conversión y almacenamiento.

Respecto al tercer objetivo específico, se desarrolló un modelo en MATLAB que integró la generación fotovoltaica con los requerimientos energéticos y la dinámica de los estanques de la planta. Este modelo permitió simular el comportamiento horario del sistema y validar su funcionamiento bajo distintas condiciones de operación, evidenciando la consistencia entre la oferta energética y la demanda hidráulica.

En cuanto al cuarto objetivo específico, la estrategia de sincronización entre la operación de las bombas y la disponibilidad de energía solar mejoró significativamente el rendimiento global del sistema. En el Escenario A se obtuvo una producción de 5.855 L/día con un consumo de 72,7 kWh/día, mientras que en el Escenario B se alcanzaron 6.211 L/día con un consumo de 71,1 kWh/día. Estos valores duplican la producción observada en la planta piloto y reducen el consumo energético respecto a los sistemas que operan con baterías, lo que evidencia un mejor desempeño del modelo sincronizado propuesto en comparación con la planta piloto.

Finalmente, los resultados obtenidos confirman que la desalinización modular alimentada con energía solar directa es una alternativa viable, eficiente y replicable para comunidades costeras con alto potencial solar. La estrategia de sincronización propuesta permite maximizar la producción de agua y reducir los costos energéticos, consolidándose como una solución sostenible para mejorar la seguridad hídrica en zonas con limitaciones de acceso a agua potable.

Se recomienda, como proyección futura, evaluar configuraciones híbridas con almacenamiento, ampliar la capacidad de los estanques y analizar el desempeño estacional del sistema, con el fin de fortalecer su continuidad operativa y su aporte a la seguridad hídrica local.

## 7. BIBLIOGRAFIA

- Quezada, A. (2024). Desalinización de agua de mar con nanofiltración y energía fotovoltaica: un estudio de caso en Caleta Rumena. Tesis de pregrado en Ingeniería, Universidad de Concepción, Chillán, Chile.
- ACERA – Asociación Chilena de Energías Renovables. (2023). Informe anual de generación renovable en Chile. Santiago, Chile.
- Ahmed, S., Moustafa, R., Elsaid, K., & Elwardany, H. (2023). Energetic, exergetic, and economic analysis of an integrated solar–nanofiltration–advanced vapor compression desalination system. SSRN Electronic Journal. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4355041>
- Bouhadjar, F., Chai, M., Bundschuh, J., & Aljuboury, D. (2019). Solar powered nanofiltration for drinking water production from fluoride-containing groundwater: A pilot study towards developing a sustainable and low-cost treatment plant. *Desalination and Water Treatment*, 160, 74–84. <https://doi.org/10.5004/dwt.2019.24173>
- Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN). (2020). Atlas agroclimático de Chile. Santiago, Chile: Ministerio de Agricultura.
- Comisión Nacional de Energía (CNE). (2023). Explorador Solar. Santiago, Chile. Recuperado de <https://energia.gob.c>

- Cornejo-Ponce, L., Rebolledo, A., & Pérez, R. (2022). Technical-economic study of small-scale solar desalination plants for rural coastal zones in Chile. *Energies*, 15(23), 9245. <https://doi.org/10.3390/en15239245>
- Dirección General de Aguas (DGA). (2021). Informe de diagnóstico hídrico regional: Ñuble. Santiago, Chile: Ministerio de Obras Públicas.
- Duffie, J. A., & Beckman, W. A. (2013). *Solar engineering of thermal processes* (4th ed.). Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.
- Garreaud, R., Boisier, J. P., Rondanelli, R., Montecinos, A., Sepúlveda, H. H., & Veloso-Aguila, D. (2017). The central Chile mega-drought (2010–2015): A climate dynamics perspective. *International Journal of Climatology*, 37(S1), 82–99. <https://doi.org/10.1002/joc.4996>
- Gutiérrez, A., García, P., & Bravo, D. (2025). Cost determination of water production in a nanofiltration desalination plant powered by a hybrid renewable energy system: Case study of Cobquecura, Chile. *Clean Energy Systems*, 100, 176–189. <https://doi.org/10.1016/j.cesys.2025.100176>
- Hanersun. (2023). Catálogo técnico de paneles solares monocristalinos HN21N-66HT700W. Hanersun Solar Technology. <https://www.hanersun.com>

- International Electrotechnical Commission (IEC). (2019). IEC 60034-30-1: Efficiency classes of line operated AC motors (IE-code). Geneva: IEC.
- International Energy Agency (IEA). (2022). Solar PV tracking report. Paris: IEA.
- Karassik, I. J., Messina, J. P., Cooper, P., & Heald, C. C. (2017). Pump handbook (4th ed.). McGraw-Hill Education.
- Liponi, A., Rizzo, A. M., Deiana, P., & Cipollina, A. (2020). Performance assessment of a solar MED (multi-effect distillation) plant with thermal energy storage for small communities. *Energies*, 13(15), 3864. <https://doi.org/10.3390/en13153864>
- Neira, M. (2016). Manual de desalinización de agua de mar en Chile: Tecnologías y experiencias. Pontificia Universidad Católica de Chile.
- Nobre, A., Kalogirou, S., & Bazzo, E. (2020). Performance and degradation of solar photovoltaic modules in coastal areas. *Renewable Energy*, 147, 1545–1556. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.09.082>
- Nogueira, R., Marques, A., & Carvalho, P. (2021). Energy optimization of solar-powered water pumping systems with storage management. *Renewable Energy*, 163, 1443–1454. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.09.088>

Pedrollo S.p.A. (2022). Catálogo técnico de bombas centrífugas 2CP 25/14B.

Verona, Italia: Pedrollo.

Wanner Engineering Inc. (2022). Hydra-Cell G25 Series Pumps: Maximum flow

at designated pressure chart. Minneapolis, USA: Wanner Engineering.

Wanner Engineering Inc. (2022). Hydra-Cell G10 Series Pumps: Maximum flow

at designated pressure chart. Minneapolis, USA: Wanner Engineering.

WEG S.A. (2022). Catálogo de motores trifásicos y variadores de frecuencia

W22. Jaraguá do Sul, Brasil: WEG.

VOGES Motores Eléctricos. (2022). Catálogo técnico motor B90 y bombas

asociadas. Porto Alegre, Brasil.

World Health Organization (WHO). (2017). Guidelines for drinking-water quality

(4th ed.). Geneva: WHO.

Yadav, S., Ghosh, A., & Singh, S. (2022). Nanofiltration membranes for

seawater desalination: Progress, prospects, and challenges.

Desalination, 532, 115732.

<https://doi.org/10.1016/j.desal.2022.115732>

Zhang, X., Li, Y., & Wang, J. (2020). Energy efficiency improvement in

seawater desalination: The role of variable frequency drives and

inverter optimization. Desalination, 496, 114–122.

<https://doi.org/10.1016/j.desal.2020.114122>

## 8. ANEXOS Y APÉNDICES

### Anexo A

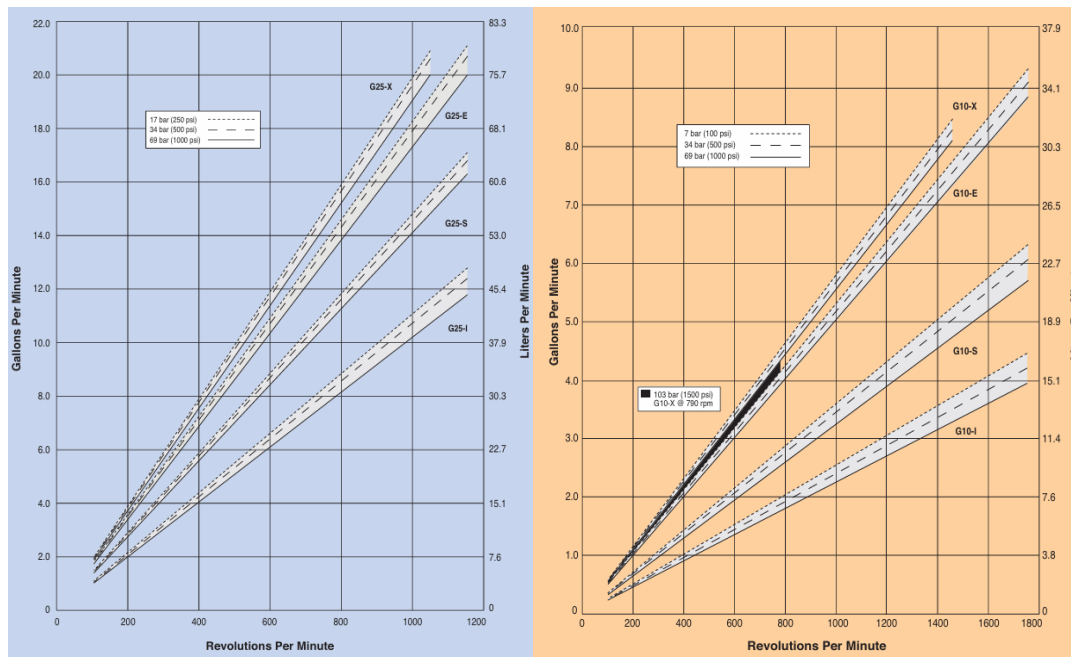


Figura A1. Flujo máximo a presión designada para bombas Hydra-Cell G25-E y G10-S (adaptado de Wanner Engineering Inc., 2016a, 2016b).

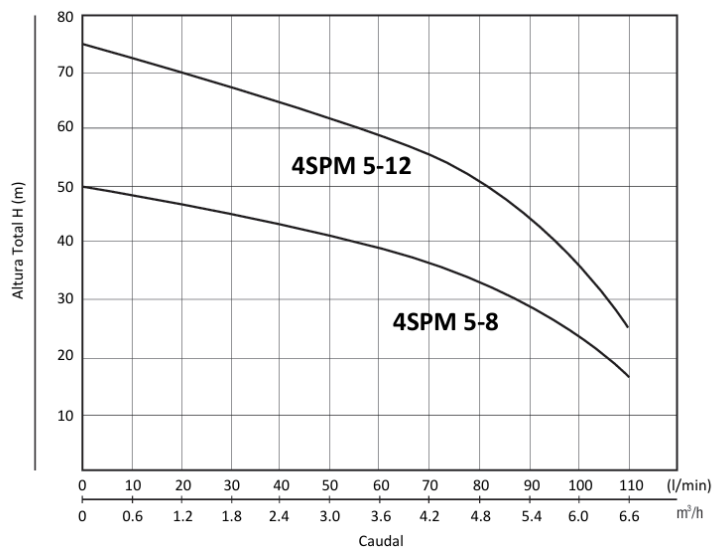


Figura A2. Curva a de funcionamiento de la bomba B1 Bestflow 5-12 (4SPM) (Fuente: adaptado de Bestflow, s.f.)

## 2CP 25/14

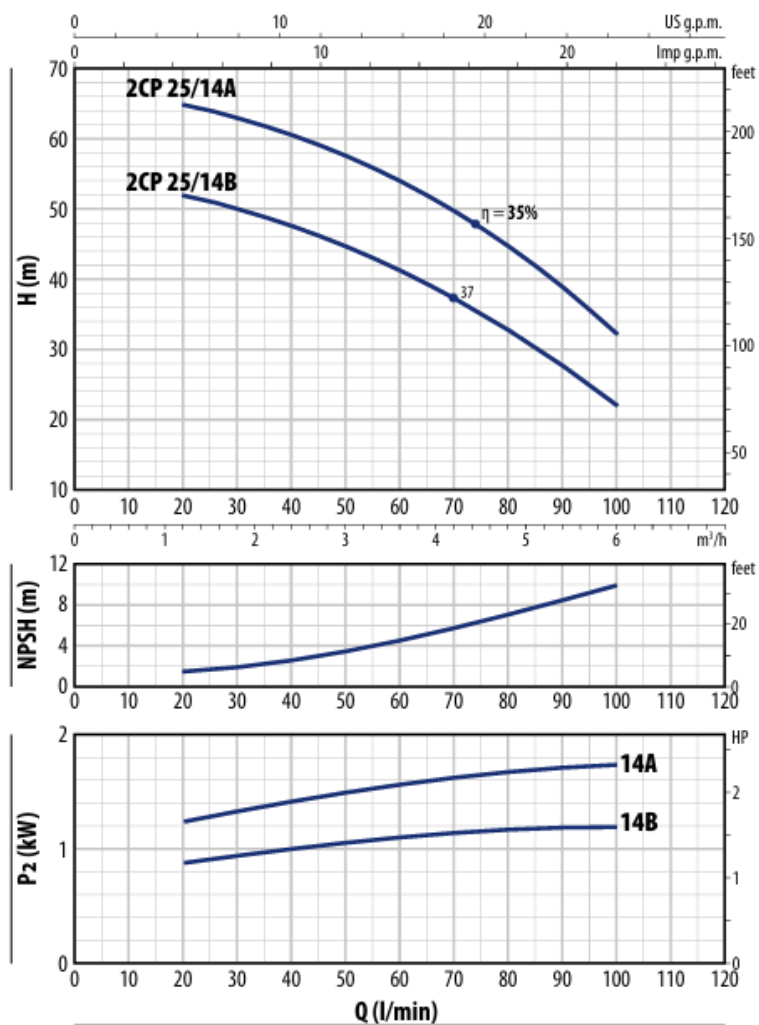


Figura A3. Curva de funcionamiento de la bomba B3 Pedrollo 2CP 25/14 (Fuente: Pedrollo, s.f.).

## Anexo B

Este anexo presenta, para cada mes del año y para los escenarios A (arranque condicionado) y B (arranque en seco), la generación fotovoltaica disponible, la potencia efectivamente utilizada y las horas de operación de las etapas ET0, ET1 y ET2. Los gráficos comparan generación vs. uso por equipo y las tablas resumen energía generada/consumida y tiempo operativo, permitiendo identificar variaciones estacionales y posibles cuellos de botella energéticos.

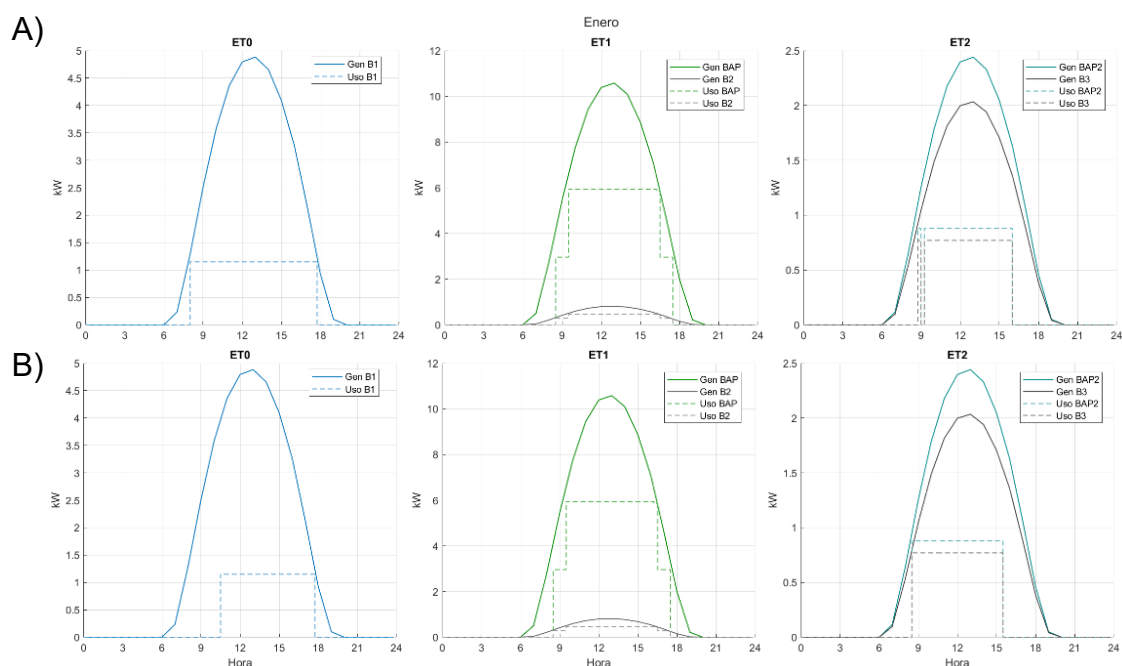


Figura B1. Energía generada/consumida y horas de uso en ET0, ET1 y ET2 para enero - Escenario A y B (Fuente: Elaboración propia.)

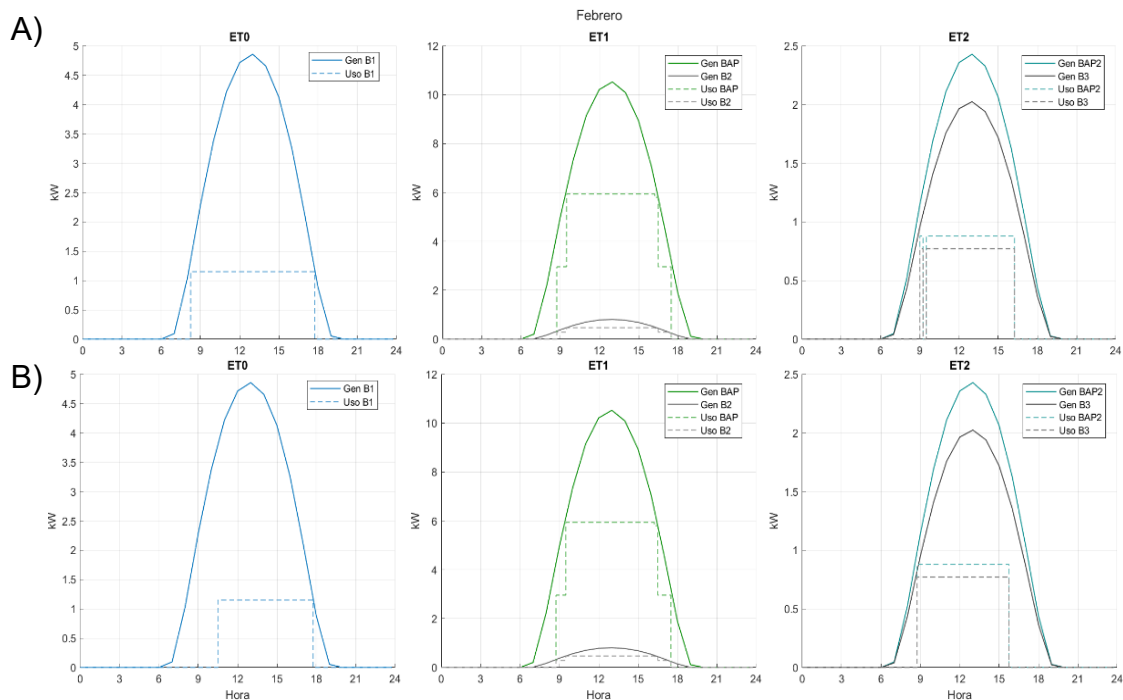


Figura B2. Energía generada/consumida y horas de uso en ET0, ET1 y ET2 para febrero - Escenario A y B (Fuente: Elaboración propia.)

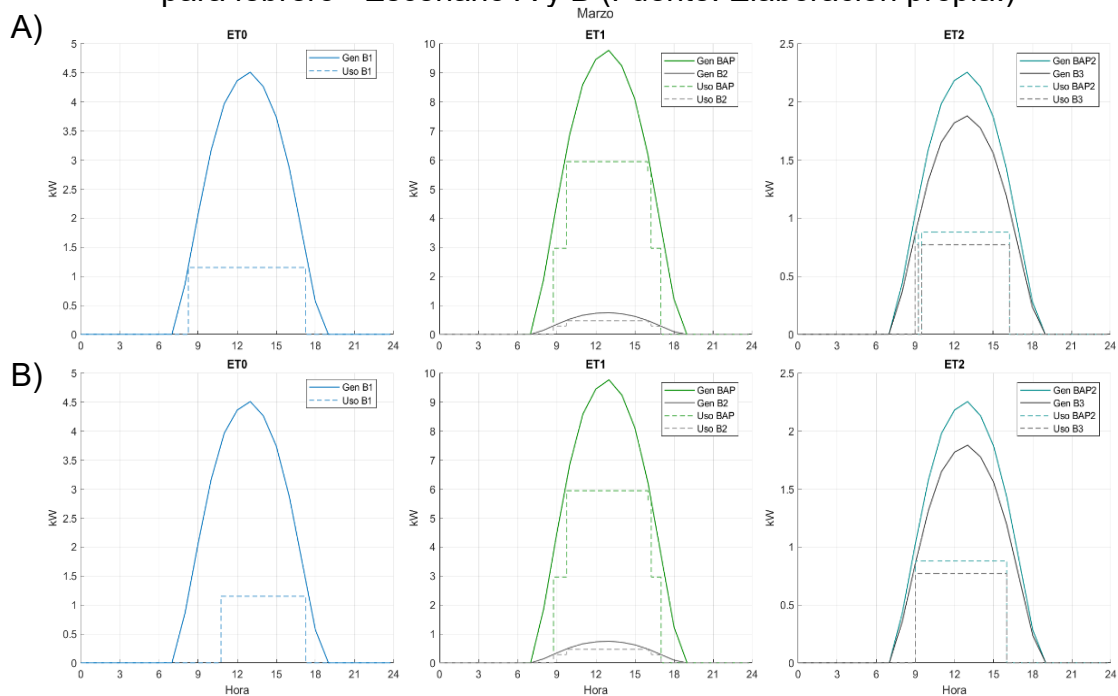


Figura B3. Energía generada/consumida y horas de uso en ET0, ET1 y ET2 para marzo - Escenario A y B (Fuente: Elaboración propia.)

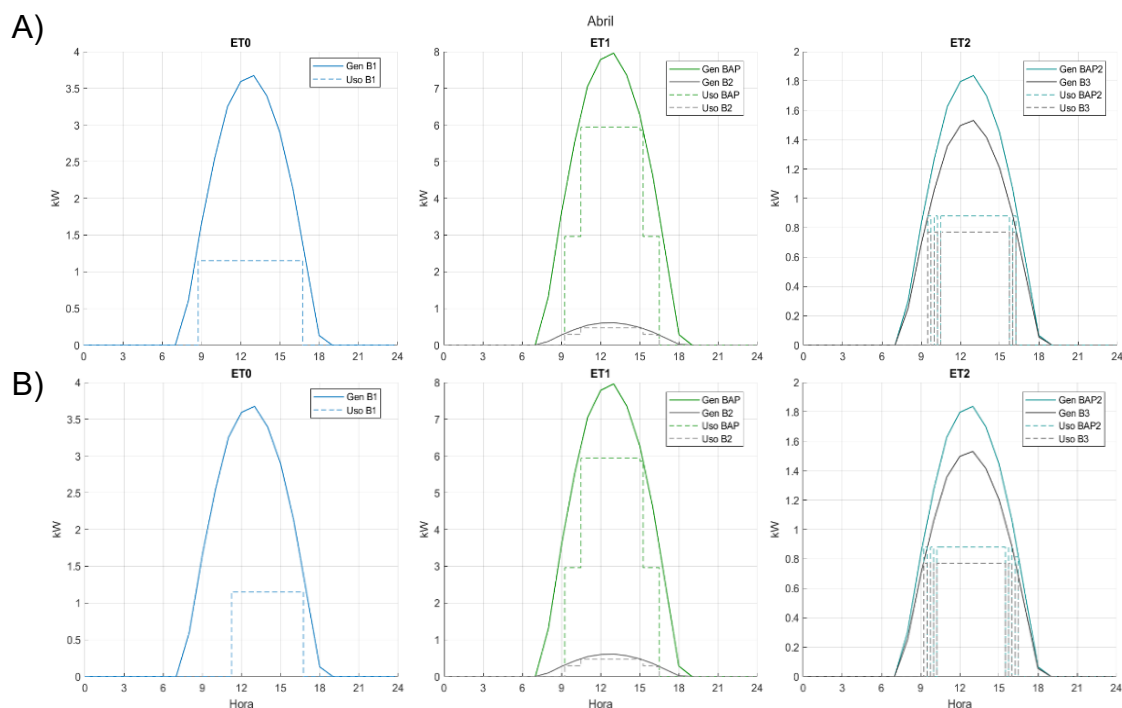


Figura B4. Energía generada/consumida y horas de uso en ET0, ET1 y ET2 para abril - Escenario A y B (Fuente: Elaboración propia.)

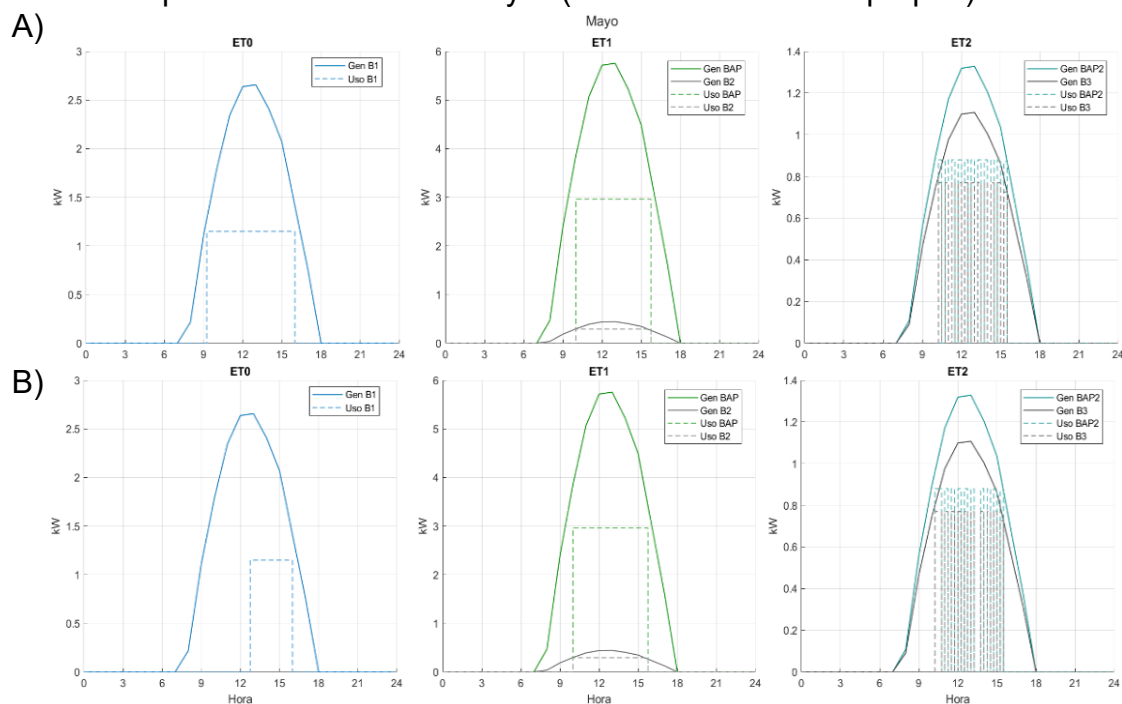


Figura B5. Energía generada/consumida y horas de uso en ET0, ET1 y ET2 para mayo - Escenario A y B (Fuente: Elaboración propia.)

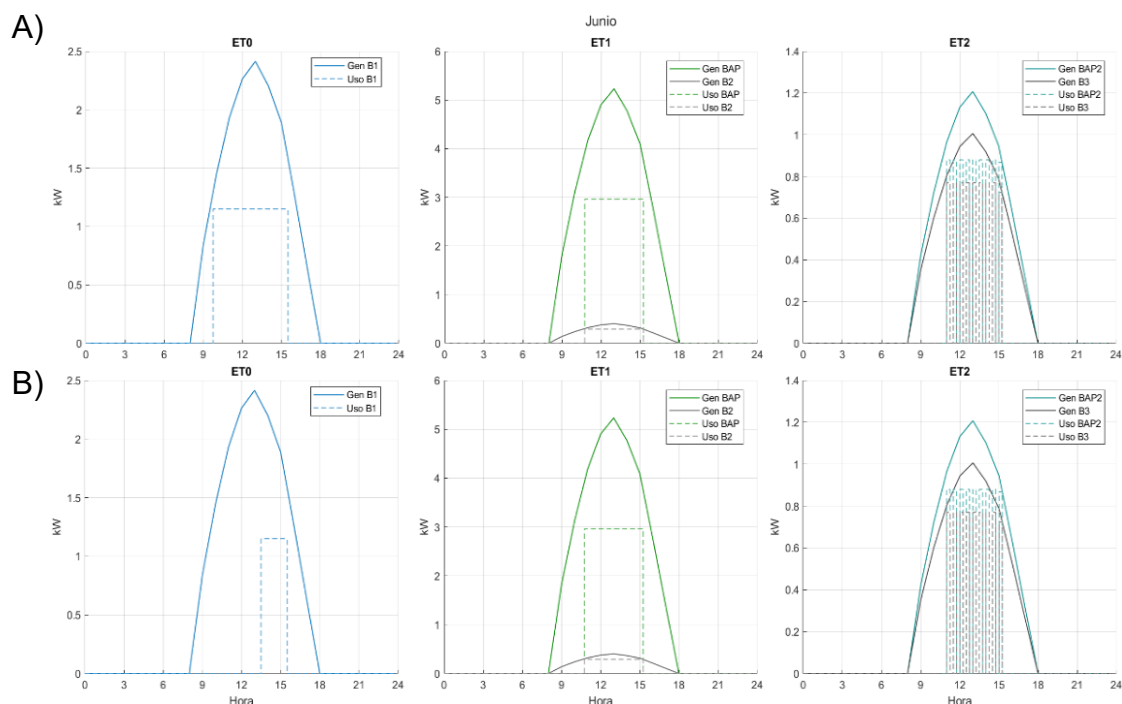


Figura B6. Energía generada/consumida y horas de uso en ET0, ET1 y ET2 para junio - Escenario A y B (Fuente: Elaboración propia.)

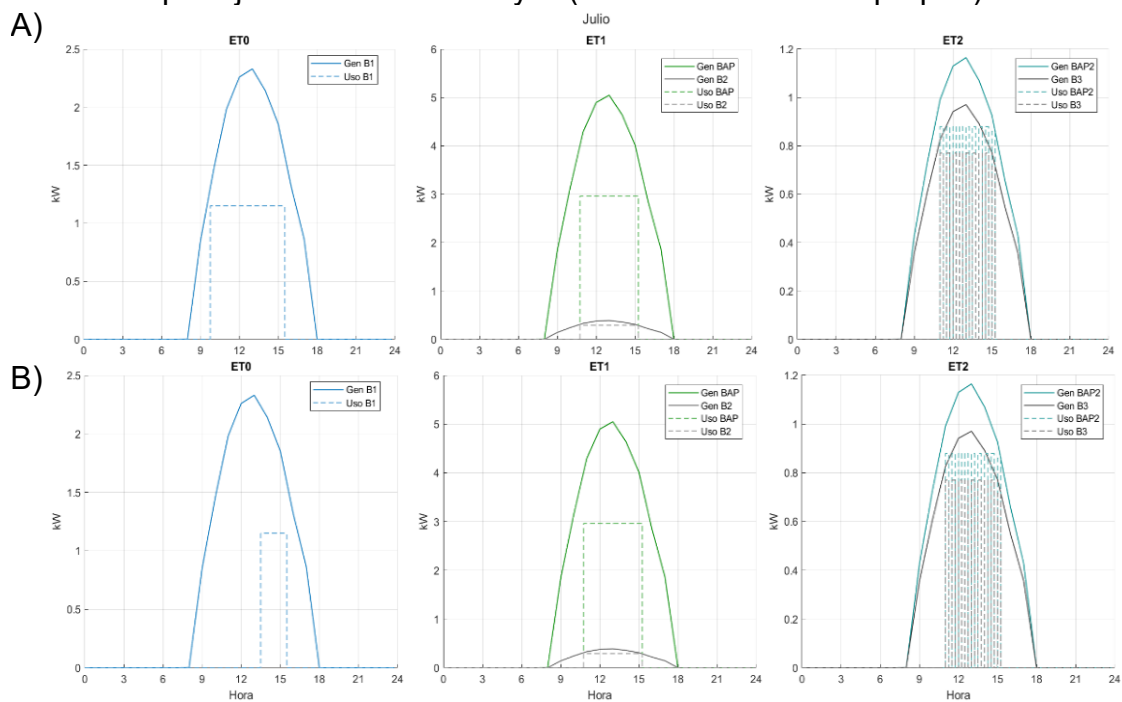


Figura B7. Energía generada/consumida y horas de uso en ET0, ET1 y ET2 para julio - Escenario A y B (Fuente: Elaboración propia.)

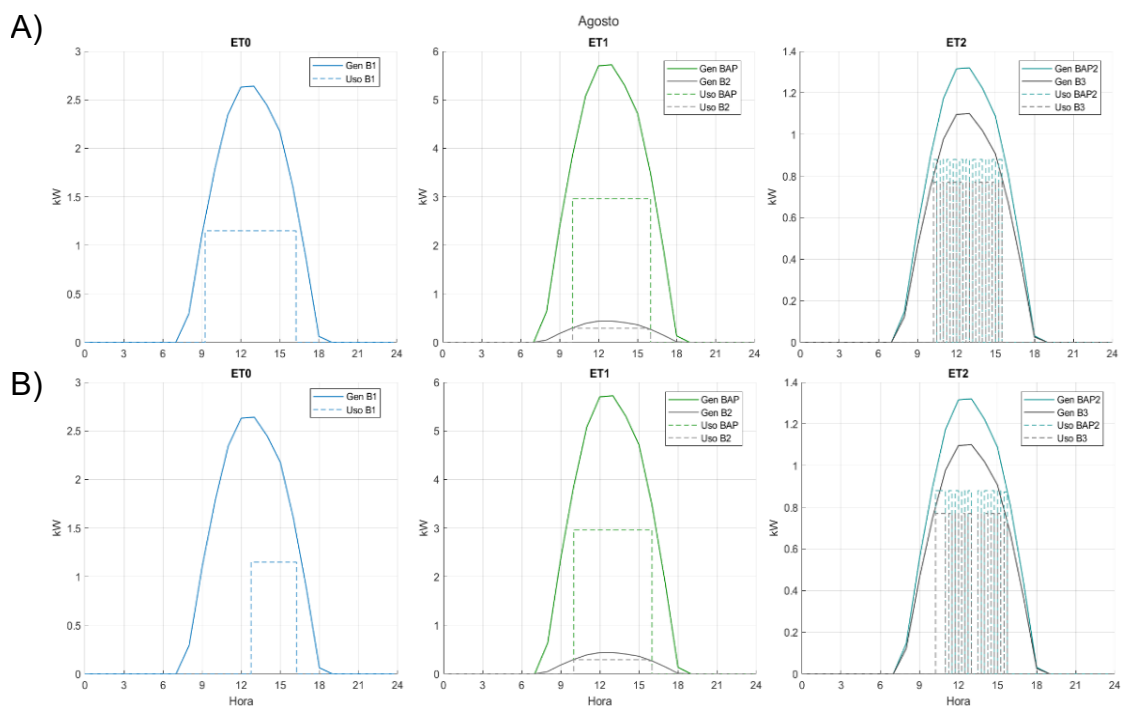


Figura B8. Energía generada/consumida y horas de uso en ET0, ET1 y ET2 para agosto - Escenario A y B (Fuente: Elaboración propia.)

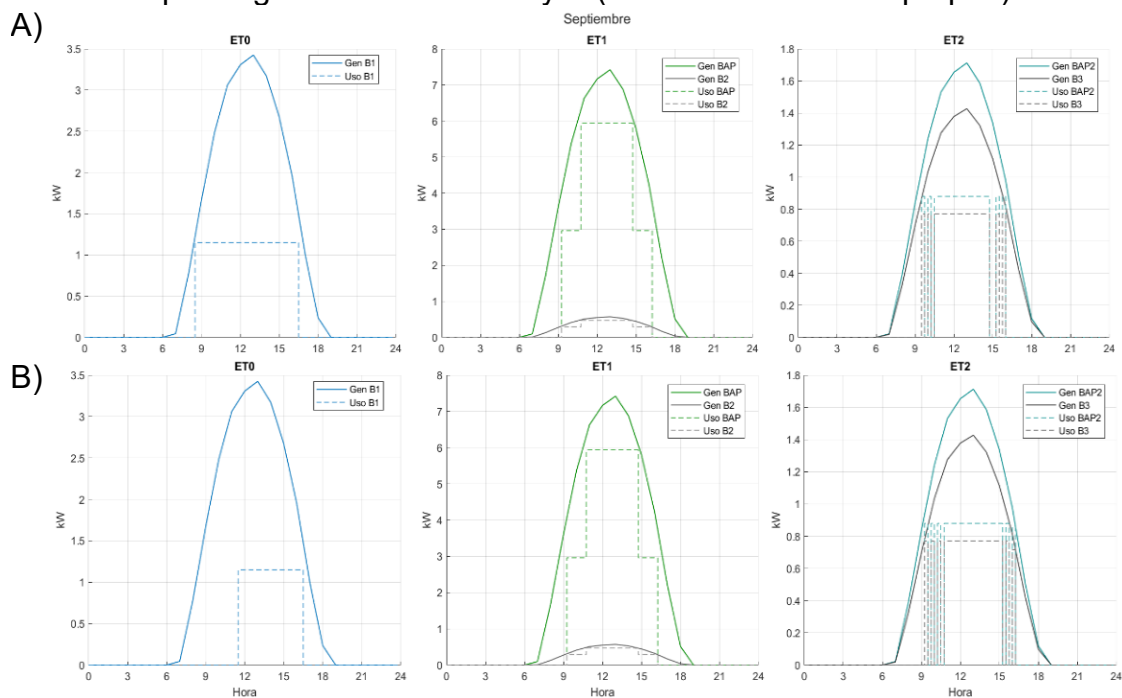


Figura B9. Energía generada/consumida y horas de uso en ET0, ET1 y ET2 para septiembre - Escenario A y B (Fuente: Elaboración propia.)

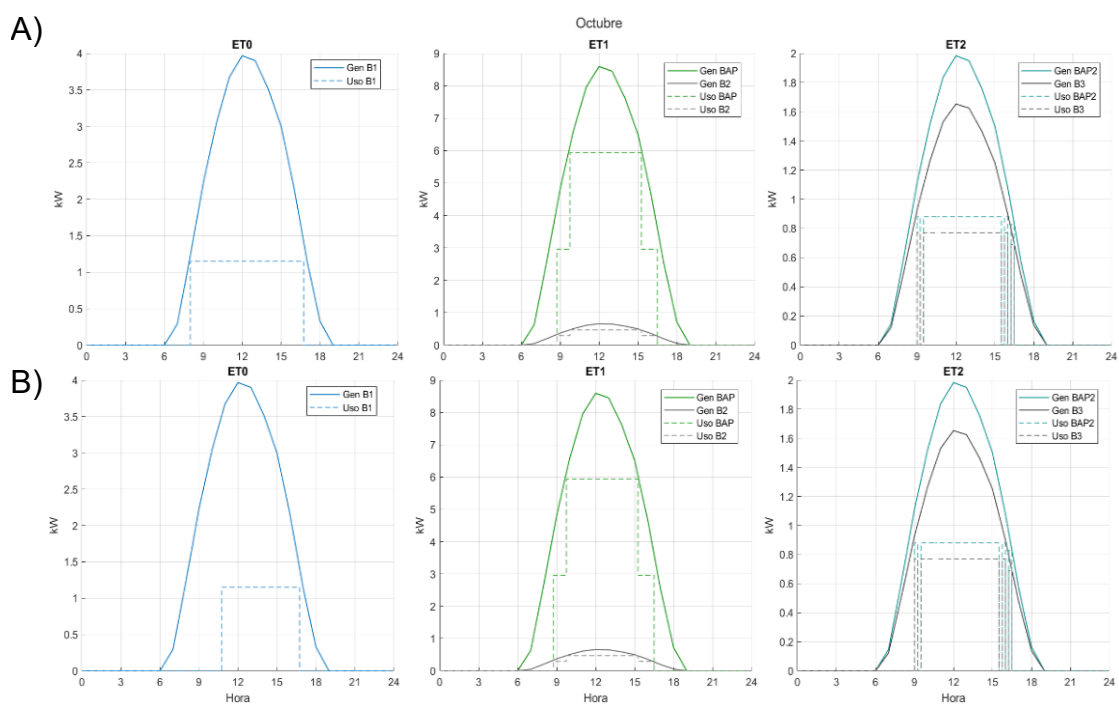


Figura B10. Energía generada/consumida y horas de uso en ET0, ET1 y ET2 para octubre - Escenario A y B (Fuente: Elaboración propia)

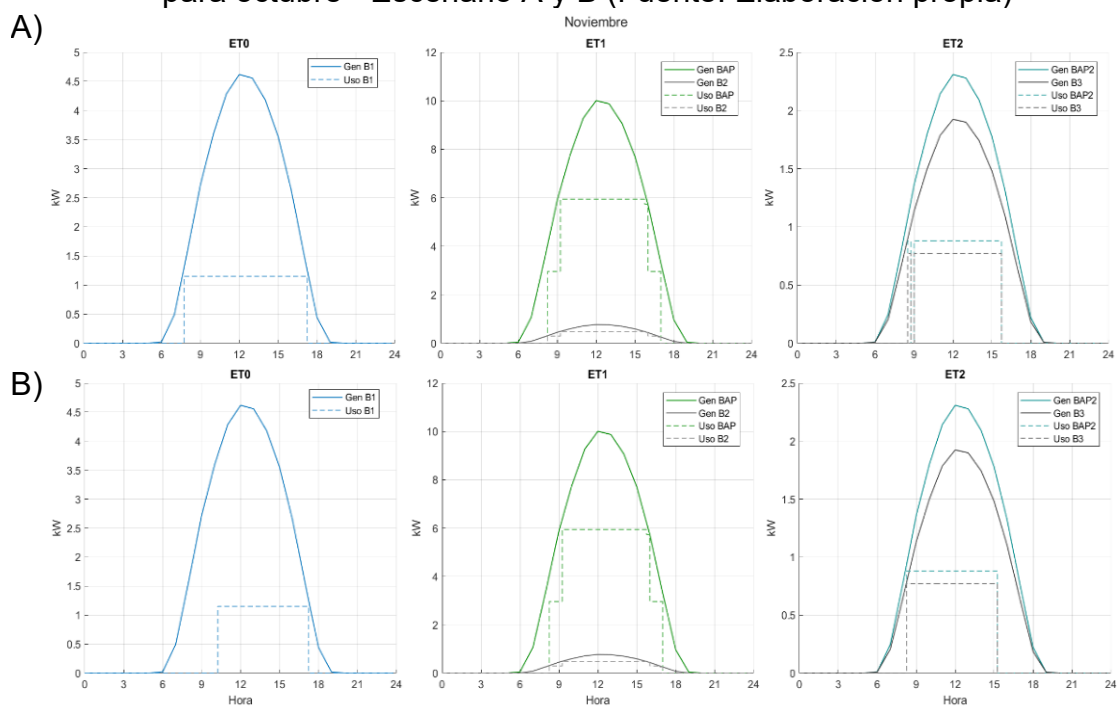
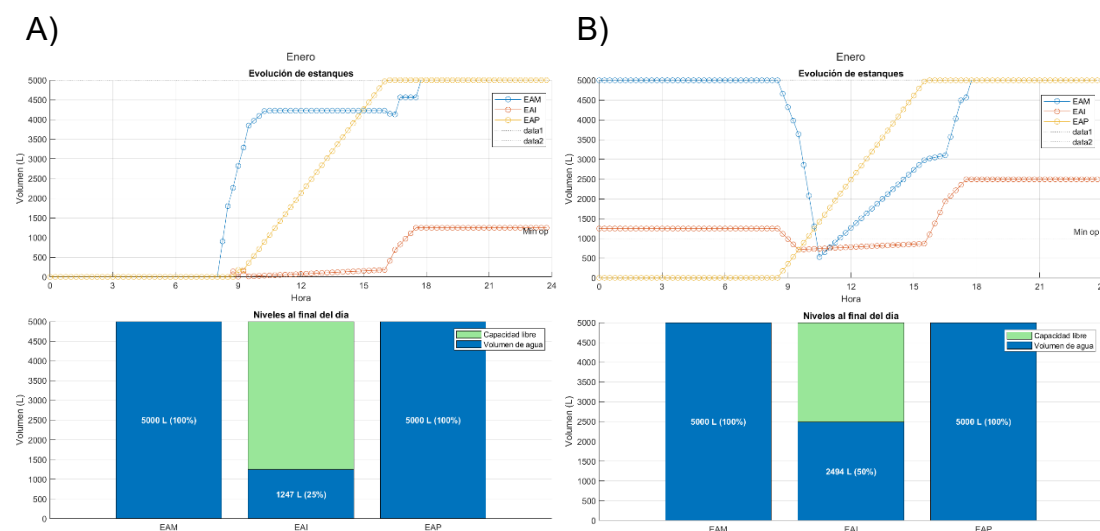


Figura B11. Energía generada/consumida y horas de uso en ET0, ET1 y ET2 para noviembre - Escenario A y B (Fuente: Elaboración propia).



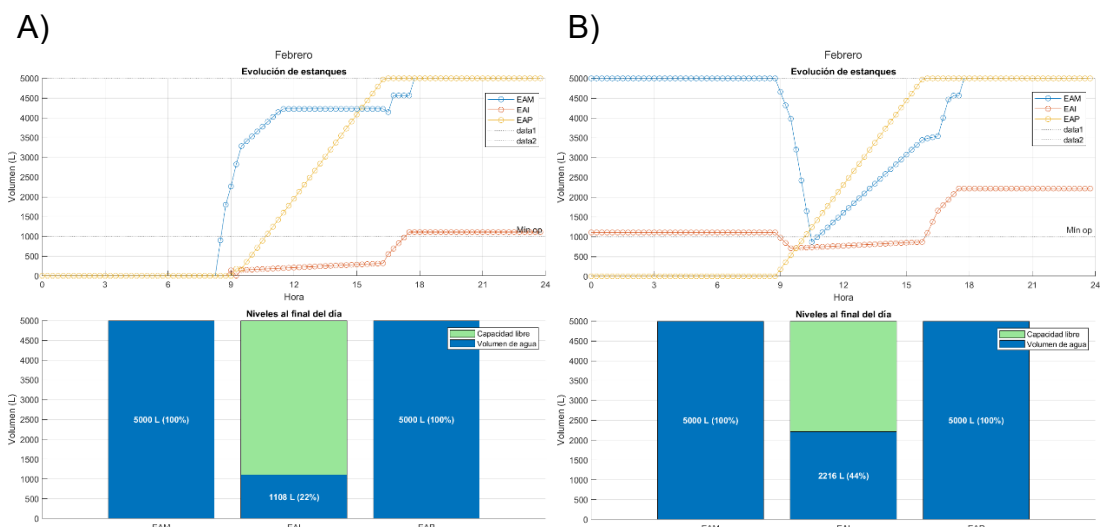
## Anexo C

Este anexo muestra la evolución horaria de los volúmenes en EAM (agua de mar), EAI (intermedia) y EAP (permeada) durante una jornada tipo por mes, junto con los niveles finales al cierre del día. Se incluyen referencias a capacidad máxima y mínimo operacional, lo que permite evaluar continuidad operativa, riesgos de vaciado/sobrellenado y su relación con la producción diaria.



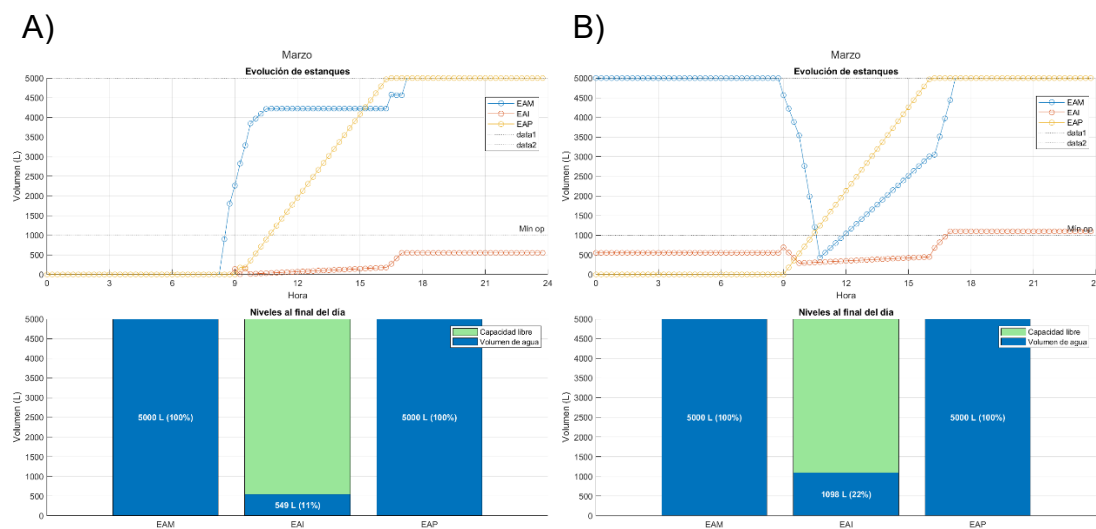
**Figura C1.** Evolución diaria y niveles al final del día de EAM, EAI y EAP para enero - Escenario A y B (Fuente: Elaboración propia).

\*Escenario A tuvo un excedente en EAP de 856 L y el escenario B de 1211 L.



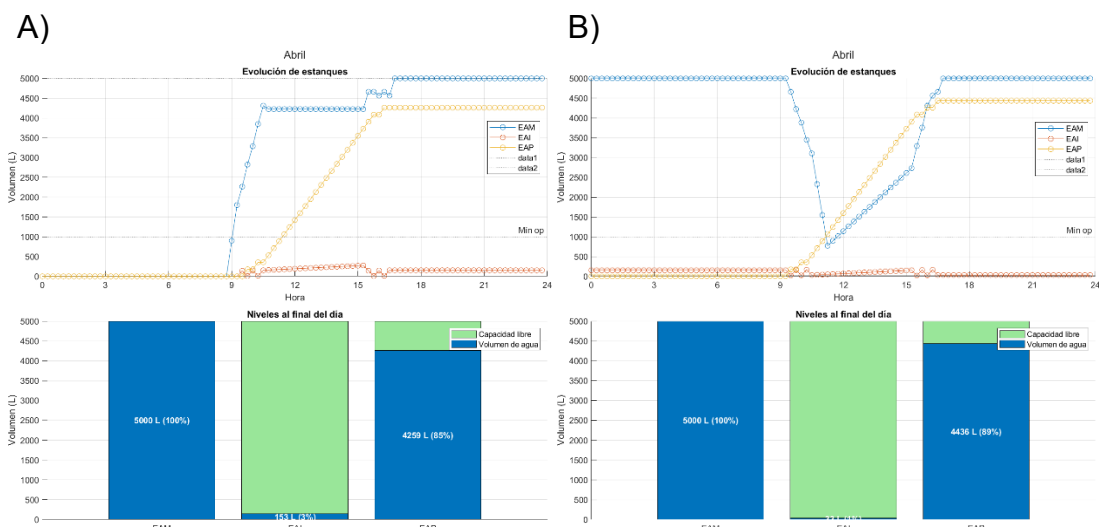
**Figura C2.** Evolución diaria y niveles al final del día de EAM, EAI y EAP para febrero - Escenario A y B (Fuente: Elaboración propia).

\*Escenario A tuvo un excedente en EAP de 678 L y el escenario B de 1033 L.

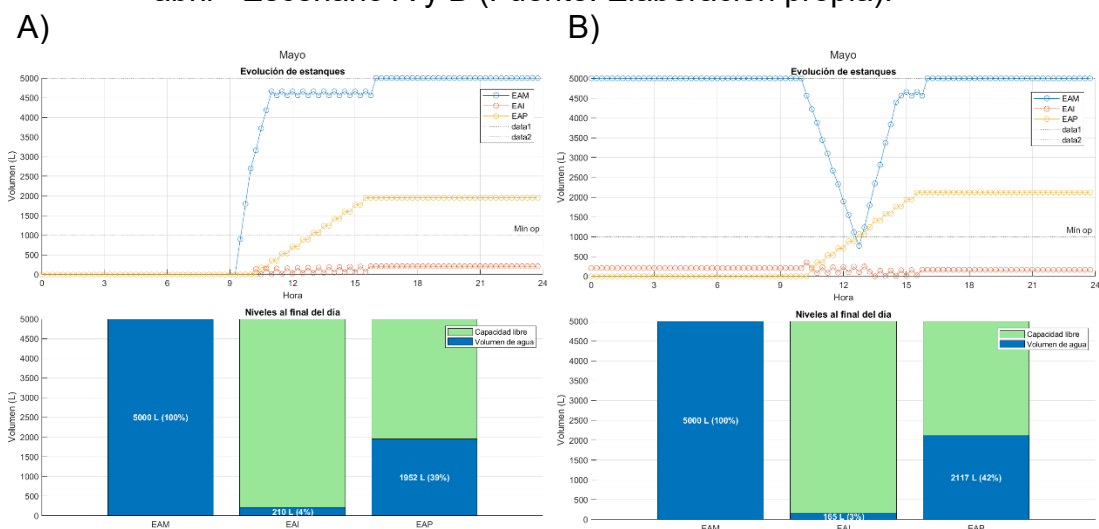


**Figura C3.** Evolución diaria y niveles al final del día de EAM, EAI y EAP para marzo - Escenario A y B (Fuente: Elaboración propia).

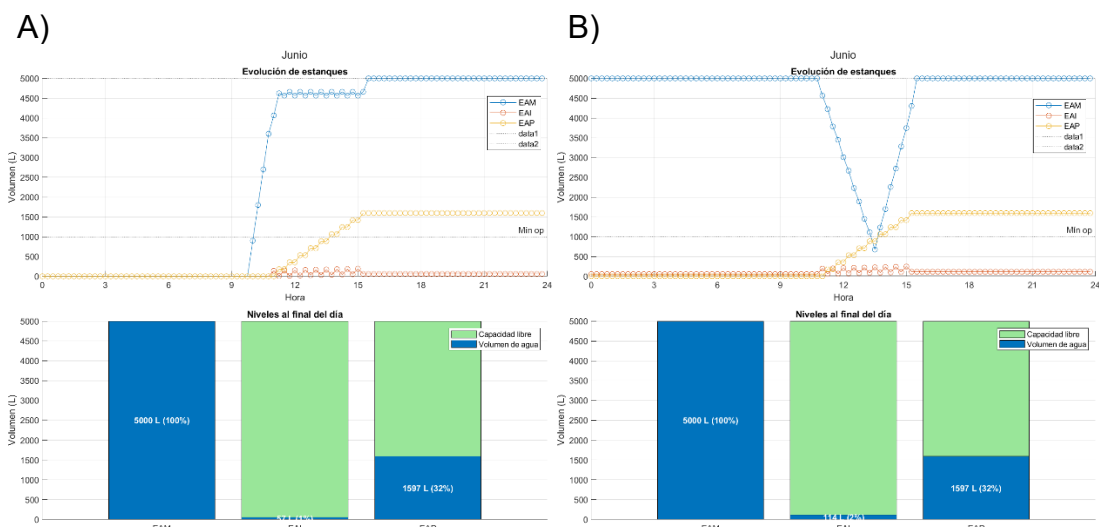
\*Escenario A tuvo un excedente en EAP de 501 L y el escenario B de 678 L.



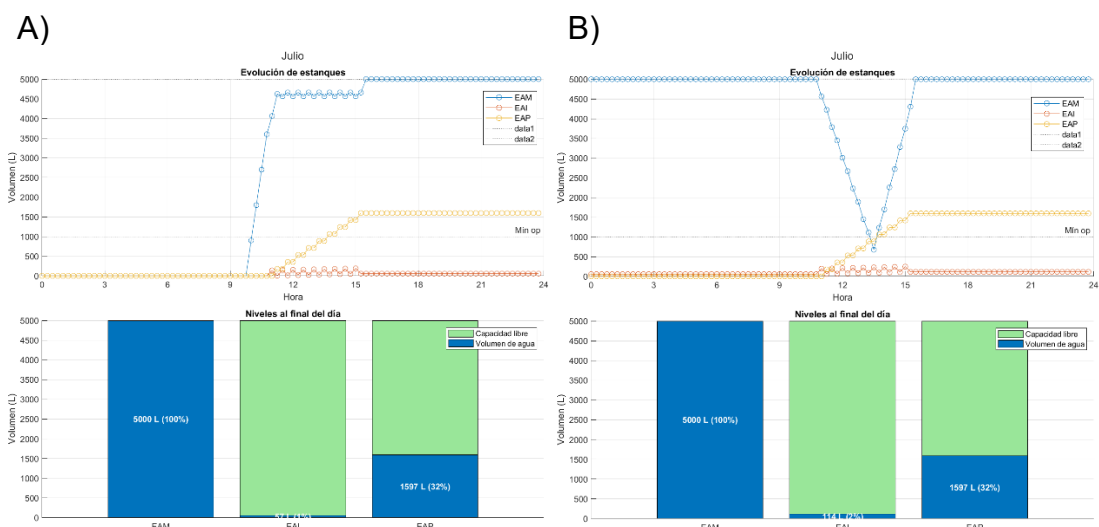
**Figura C4.** Evolución diaria y niveles al final del día de EAM, EAI y EAP para abril - Escenario A y B (Fuente: Elaboración propia).



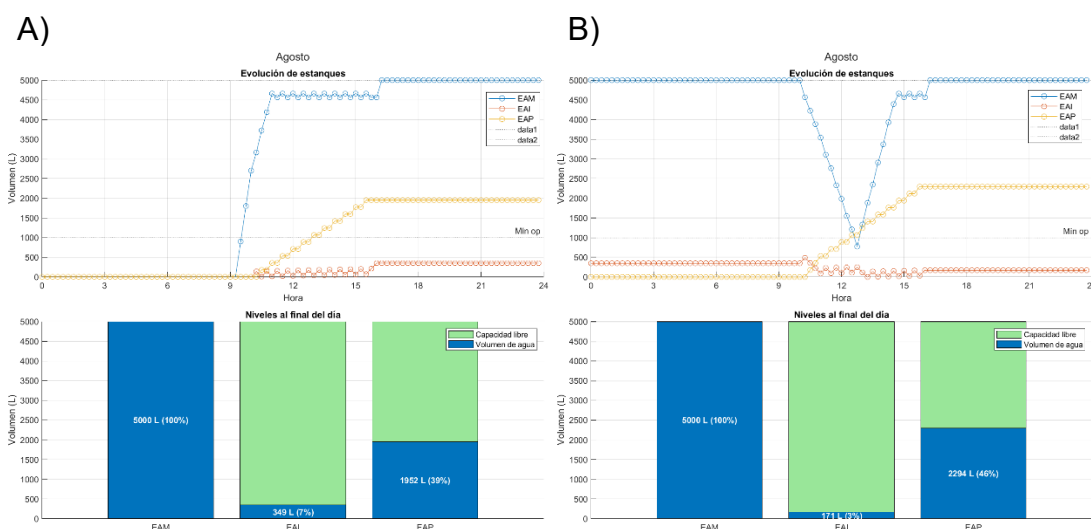
**Figura C5.** Evolución diaria y niveles al final del día de EAM, EAI y EAP para mayo - Escenario A y B (Fuente: Elaboración propia).



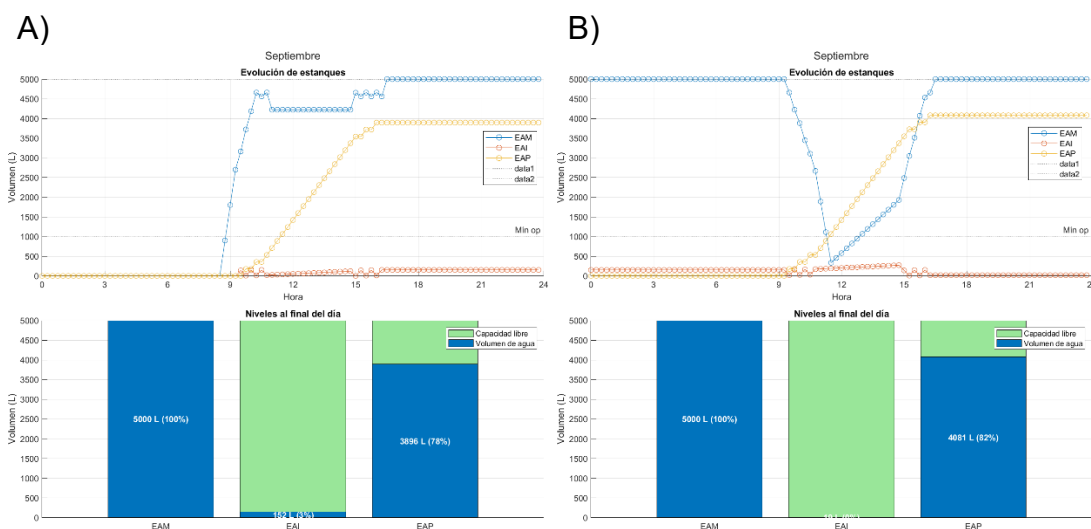
**Figura C6.** Evolución diaria y niveles al final del día de EAM, EAI y EAP para junio - Escenario A y B (Fuente: Elaboración propia).



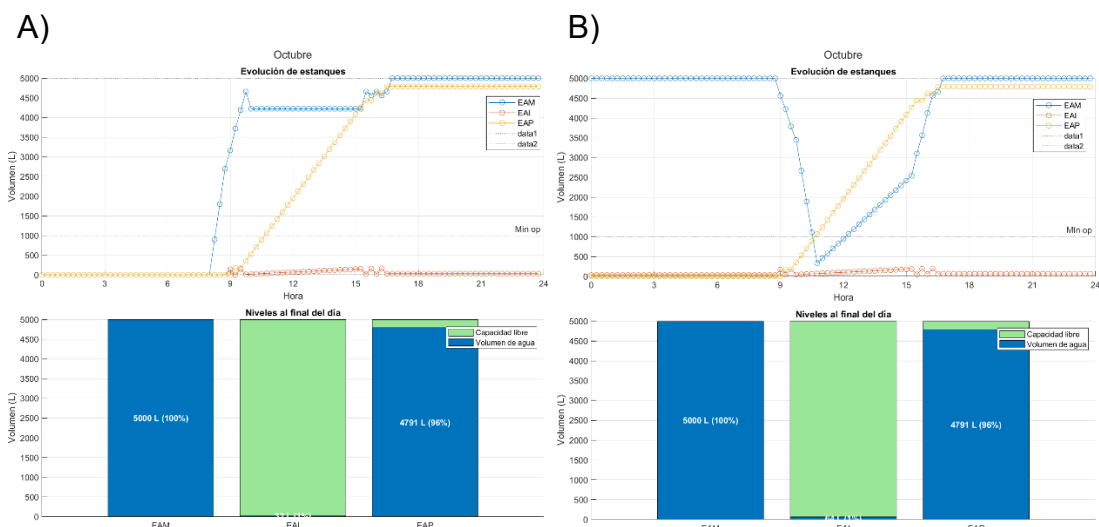
**Figura C7.** Evolución diaria y niveles al final del día de EAM, EAI y EAP para julio - Escenario A y B (Fuente: Elaboración propia).



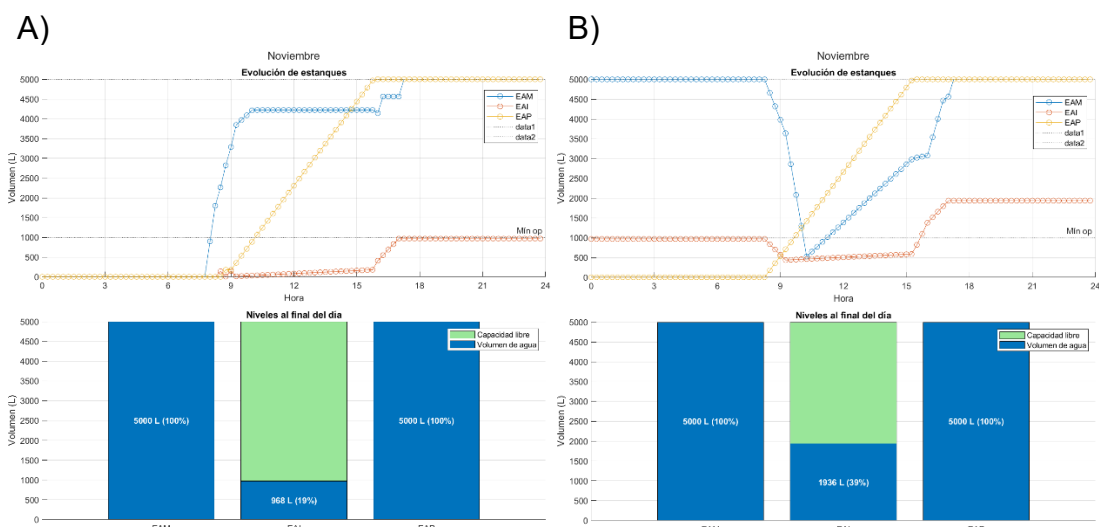
**Figura C8.** Evolución diaria y niveles al final del día de EAM, EAI y EAP para agosto - Escenario A y B (Fuente: Elaboración propia.)



**Figura C9.** Evolución diaria y niveles al final del día de EAM, EAI y EAP para septiembre - Escenario A y B (Fuente: Elaboración propia.)

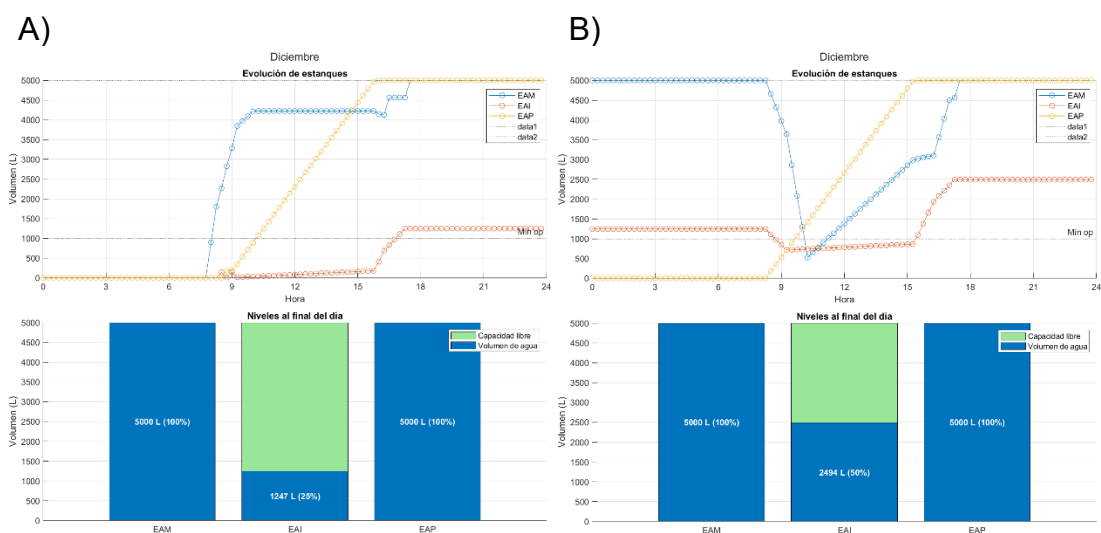


**Figura C10.** Evolución diaria y niveles al final del día de EAM, EAI y EAP para octubre - Escenario A y B (Fuente: Elaboración propia).



**Figura C11.** Evolución diaria y niveles al final del día de EAM, EAI y EAP para noviembre - Escenario A y B (Fuente: Elaboración propia).

\*Escenario A tuvo un excedente en EAP de 678 L y el escenario B de 1033 L.



**Figura C12.** Evolución diaria y niveles al final del día de EAM, EAI y EAP para diciembre - Escenario A y B (Fuente: Elaboración propia).

\*Escenario A tuvo un excedente en EAP de 1033 L y el escenario B de 1388L.

## Apéndice A

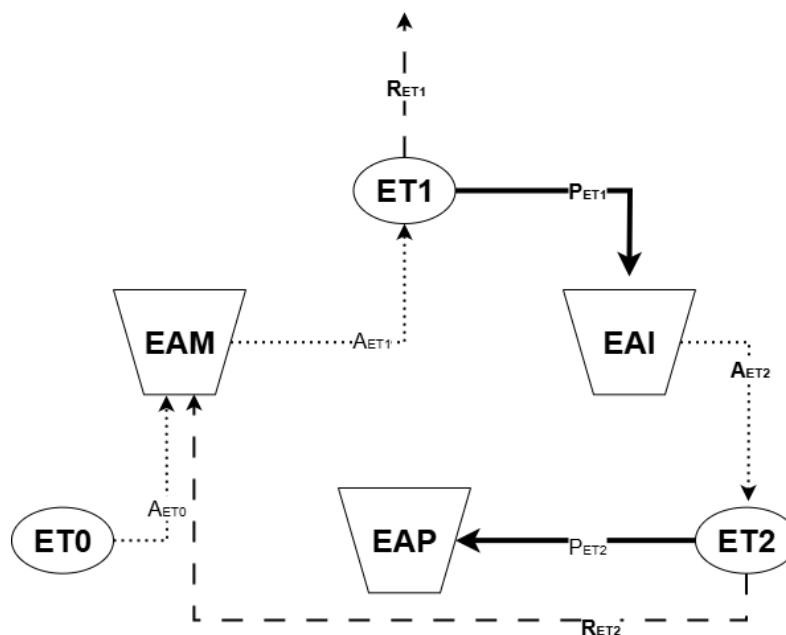


Figura A1. Esquema de los flujos de aguas en las etapas y estanques de las plantas (Fuente: Elaboración propia)

En la Figura A1 se presenta el esquema de flujos de la planta modular, donde se indican los caudales de alimentación ( $A$ ), permeado ( $P$ ) y rechazo ( $R$ ) en cada etapa (ET0, ET1, ET2), así como los flujos hacia los estanques EAM, EAI y EAP. Estas ecuaciones fueron implementadas en el código.

**Ecuaciones de balance de materia:**

- Balance en ET1:

$$A_{ET1} = P_{ET1} + R_{ET1} \quad [9]$$

- Balance en ET2:

$$A_{ET2} = P_{ET2} + R_{ET2} \quad [10]$$

- Flujo en el estanque de agua de mar (EAM):

$$Q_{EAM} = P_{ET0} + R_{ET2} - R_{ET1} \quad [11]$$

o expresado como:

$$Q_{EAM} = P_{ET0} + R_{ET2} - (P_{ET1} + R_{ET1}) \quad [12]$$

- Flujo en el estanque de agua intermedia (EAI):

$$Q_{EAI} = P_{ET0} + R_{ET1} - A_{ET2} \quad [13]$$

o:

$$Q_{EAM} = P_{ET1} - (P_{ET2} + R_{ET2}) \quad [14]$$

- Flujo en el estanque de agua permeada (EAP):

$$Q_{EAP} = P_{ET2} \quad [15]$$

Flujo de rechazo al mar:

$$Q_{MAR} = R_{ET1} \quad [16]$$