

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



**DESALINIZACIÓN DE AGUA DE MAR CON NANOFILTRACIÓN Y ENERGÍA  
FOTOVOLTAICA: UN ESTUDIO DE CASO EN CALETA RUMENA**

**ANDRÉS IGNACIO QUEZADA GUTIÉRREZ**

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**  
**2024**

**DESALINIZACIÓN DE AGUA DE MAR CON NANOFILTRACIÓN Y ENERGÍA  
FOTOVOLTAICA: UN ESTUDIO DE CASO EN CALETA RUMENA**

Aprobado por:

David Lara Castells  
Ingeniero Civil Eléctrico Dr.  
Profesor Asociado

---

Profesor Guía

Roberto Medina Correa  
Ingeniero Agrícola, Mg.  
Evaluador Externo

---

Profesor Asesor

Gabriel Merino Coria  
Licenciado en Ciencias, Física Ph.-D.  
Profesor Asociado

---

Profesor Asesor

Christian Correa Farias.  
Ingeniero Civil Industrial, Mg  
Profesor Asociado

---

Director de Departamento

María González Rodríguez  
Ingeniero Agrónomo, Ph.-D.  
Profesor Asociado

---

Decana

## ÍNDICE DE MATERIAS

|  | Página |
|--|--------|
| RESUMEN.....   | 1      |
| SUMMARY .....  | 3      |
| 1. INTRODUCCIÓN.....   | 5      |
| 2. OBJETIVOS.....  | 7      |
| 2.1. Objetivo general .....  | 7      |
| 2.2. Objetivos específicos.....  | 7      |
| 3. ANTECEDENTES GENERALES.....   | 8      |
| 3.1. Área de estudio .....   | 8      |
| 3.2. Consideraciones del estudio .....   | 8      |
| 3.3. Agua potable .....  | 8      |
| 3.4. Desalinización con sistemas fotovoltaicos <i>off grid</i> .....                     | 10     |
| 3.5. Consideraciones banco de baterías. ....   | 12     |
| 4. METODOLOGÍA .....   | 14     |
| 4.1. Descripción de planta .....   | 14     |
| 4.1.1. Sistema de filtración.....  | 15     |
| 4.1.2. Sistema de generación de energía. ....  | 17     |
| 4.2. Caracterización de la energía.....  | 20     |
| 4.2.1. Demanda energética. ....  | 20     |
| 4.2.2. Energía disponible.....   | 23     |
| 4.3. Configuraciones de funcionamiento para la planta.....                               | 28     |
| 4.3.1. Efecto de los escenarios de operación sobre los estanques de<br>acumulación. .... | 28     |
| 4.3.2. Secuencia de operación de la planta. ....   | 30     |
| 4.4. Producción estimada de agua potable. ....   | 33     |
| 4.4.1. Implementación en Excel para la simulación. ....                                  | 33     |
| 4.4.2. Ajustes de operación.....   | 39     |
| 5. RESULTADOS .....  | 42     |

|   |    |
|---|----|
| 5.1. Resultados de estimación estándar.....           | 42 |
| 5.2. Resultados de estimación ajustada. ....          | 42 |
| 5.3. Análisis de producción estándar y ajustada. .... | 43 |
| 5.4. Problemas detectados en la planta. ....          | 48 |
| 6. CONCLUSIONES .....                                 | 49 |
| 7. LITERATURA CITADA .....                            | 50 |
| 8. ANEXOS Y APENDICES.....                            | 54 |

## ÍNDICE DE TABLAS

| En el texto  | Página |
|--|--------|
| Tabla 1. Configuración de encendido y apagado de los cinco motores en cada etapa. ....   | 15     |
| Tabla 2. Especificaciones de motores implicados en la desalación.....  | 15     |
| Tabla 3. Configuración de encendido y apagado de etapas para cada uno de los 7 escenarios. ....                                    | 21     |
| Tabla 4. Registro de datos en cuadro de operación y desempeño de ET1 y ET2 distintos escenarios.....                               | 23     |
| Tabla 5. Información ingresada en la opción “Monofacial Modelo Avanzado”.....  | 25     |
| Tabla 6. Funciones fotovoltaicas definidas para el mes “m” a la hora “t”. ....   | 25     |
| Tabla 7. Flujos de agua en los estanques de acumulación ( $L \text{ min}^{-1}$ ) para los diferentes escenarios de operación. .... | 29     |

## ÍNDICE DE FIGURAS

| En el texto   | Página |
|---|--------|
| Figura 1. Ficha técnica de batería de ciclo profundo GEL Aokly ( <a href="https://www.renova-energia.com/wp-content/uploads/2020/04/BT134.pdf">https://www.renova-energia.com/wp-content/uploads/2020/04/BT134.pdf</a> )..... | 13     |
| Figura 2. Vista externa del sistema desalador modular fotovoltaico. (Fuente: Elaboración propia) .....  | 14     |
| Figura 3. Componentes del sistema de procesamiento de agua de mar. (Fuente: Elaboración propia). .....  | 16     |
| Figura 4. Esquema general sistema fotovoltaico (absorción, almacenamiento, transformación y control), motores impulsados y sistema de transmisión de datos (Fuente: Elaboración propia). .....                                | 17     |
| Figura 5. Esquema SFV. a) Arreglo fotovoltaico, b) String, c) Regulador de carga, c) Modulo fotovoltaico (Fuente: Elaboración propia). .....  | 18     |
| Figura 6. Esquema SBE. a) Rama de baterías en serie, b) Batería (Fuente: Elaboración propia).....   | 19     |
| Figura 7. Esquema SAC. a) Inversor de corriente, b) Tablero de control y distribución de corriente alterna (Fuente: Elaboración propia). .....  | 19     |
| Figura 8. Esquema SSTD. a) Hardware del centro de comunicaciones CCGX, b) Modem (Fuente: Elaboración propia). .....   | 20     |
| Figura 9. Potencia de operación monitoreada en CCGX para cada escenario (Fuente: Elaboración propia).....   | 21     |
| Figura 10. Diagrama de flujo para la función de operación condicional (Fuente: Elaboración propia). .....   | 32     |
| Figura 11. Parámetros de entrada para la simulación fotovoltaica (Fuente: Elaboración propia). .....  | 34     |
| Figura 12. Parámetros limitantes de capacidad de estanques (Fuente: Elaboración propia). .....  | 34     |
| Figura 13. Parámetros de operación críticos para el banco de baterías (Fuente: Elaboración propia). .....   | 35     |

|                |  |    |
|----------------|--|----|
| Figura 14.     | Energía almacenable para simulación en enero (Fuente: Elaboración propia). .....   | 35 |
| Figura 15.     | Marco de operación resultante de simulación en enero (Fuente: Elaboración propia). .....   | 36 |
| Figura 16.     | Cambio de volumen producido en los estanques acumuladores EAM, EAI y EAP para cada escenario en un $\Delta t$ de 10 min (Fuente: Elaboración propia). .....              | 36 |
| Figura 17.     | Parámetros de almacenamiento al fin de la operación diaria (Fuente: Elaboración propia). .....   | 37 |
| Figura 18.     | Previsualización modelo de los parámetros dependientes del tiempo y secuencia de operación en enero (Fuente: Elaboración propia). .....                                  | 39 |
| Figura 19.     | Visualización de formato en caso de no cumplimiento de parámetros limitantes (Fuente: Elaboración propia). .....   | 39 |
| Figura 20.     | Comparación de configuraciones de operación (Fuente: Elaboración propia). .....  | 41 |
| Figura 21.     | Estimación estándar y ajustada de agua potable producida diaria entre enero y diciembre con el porcentaje de variación de producción (Fuente: Elaboración propia). ..... | 43 |
| Figura 22.     | Visualización de patrones en la operación. a) Ciclo de preparación. b) Ciclo de producción (Fuente: Elaboración propia). .....   | 44 |
| En el Anexo    |  |    |
| Figura A 1.    | Resumen de ciclos de generación de potencia fotovoltaica diaria-mensual. ....  | 54 |
| En el Apéndice |  |    |
| Figura A 2.    | Esquema de flujos de agua en las distintas etapas y estanques. ....  | 55 |
| Figura B 1.    | Configuración de operación bajo modelo estándar, ajustado y sus criterios de comparación para el mes de enero. ....  | 57 |
| Figura B 2.    | Configuración de operación bajo modelo estándar, ajustado y sus criterios de comparación para el mes de febrero. ....  | 58 |

|              |   |    |
|--------------|---|----|
| Figura B 3.  | Configuración de operación bajo modelo estándar, ajustado y sus criterios de comparación para el mes de marzo.....      | 58 |
| Figura B 4.  | Configuración de operación bajo modelo estándar, ajustado y sus criterios de comparación para el mes de abril.....      | 58 |
| Figura B 5.  | Configuración de operación bajo modelo estándar, ajustado y sus criterios de comparación para el mes de mayo.....       | 59 |
| Figura B 6.  | Configuración de operación bajo modelo estándar, ajustado y sus criterios de comparación para el mes de junio.....      | 59 |
| Figura B 7.  | Configuración de operación bajo modelo estándar, ajustado y sus criterios de comparación para el mes de julio.....      | 59 |
| Figura B 8.  | Configuración de operación bajo modelo estándar, ajustado y sus criterios de comparación para el mes de agosto.....     | 60 |
| Figura B 9.  | Configuración de operación bajo modelo estándar, ajustado y sus criterios de comparación para el mes de septiembre..... | 60 |
| Figura B 10. | Configuración de operación bajo modelo estándar, ajustado y sus criterios de comparación para el mes de octubre.....    | 61 |
| Figura B 11. | Configuración de operación bajo modelo estándar, ajustado y sus criterios de comparación para el mes de noviembre.....  | 61 |
| Figura B 12. | Configuración de operación bajo modelo estándar, ajustado y sus criterios de comparación para el mes de diciembre.....  | 61 |

**Índice de ecuaciones**

|  | Página |
|--|--------|
| Ecuación [1]. Potencia inyectada al sistema.....                       | 23     |
| Ecuación 2. Tiempo equivalente.....                                    | 26     |
| Ecuación 3. Energía equivalente acumulable.....                        | 26     |
| Ecuación 4. Hora de inicio del margen de operación.....                | 27     |
| Ecuación 5. Hora de fin del margen de operación.....                   | 27     |
| Ecuación 6. Corriente eléctrica de descarga del banco de baterías..... | 38     |
| Ecuación 7. Capacidad de carga del banco de baterías.....              | 38     |
| Ecuación 8. Balance de flujo en ET1.....                               | 55     |
| Ecuación 9. Balance de flujo en ET2.....                               | 55     |
| Ecuación 10. Balance de flujo en EAM.....                              | 55     |
| Ecuación 11. Balance de flujo en EAI.....                              | 56     |
| Ecuación 12. Flujo en EAP.....   | 56     |
| Ecuación 13. Flujo de efluente de planta.....                          | 56     |

## **DESALINIZACIÓN DE AGUA DE MAR CON NANOFILTRACIÓN Y ENERGÍA FOTOVOLTAICA: UN ESTUDIO DE CASO EN CALETA RUMENA**

SEAWATER DESALINATION WITH NANOFILTRATION AND PHOTOVOLTAIC  
ENERGY: A CASE STUDY IN CALETA RUMENA

**Palabras clave:** Planta desaladora modular, Móvil, Agua potable, Comunidades aisladas.

### **RESUMEN**

El objetivo del presente proyecto fue estudiar la producción de agua potable de una planta desaladora modular de nanofiltración alimentada con energía fotovoltaica *off grid* en la localidad de Caleta Rumena, Región del Biobío, Chile. A partir de este estudio se caracterizó la demanda energética y la energía disponible de la planta, se definió para cada mes una configuración de funcionamiento diaria y se estimó su producción de agua potable. La metodología consistió en plantear una secuencia de operación basada en la variación de los niveles de los estanques que producía cada escenario de consumo. A partir de esta secuencia, con una planilla Excel programada con una serie de funciones simultáneas y codependientes se modeló el promedio de producción de agua potable diaria para cada mes (modelo estándar). Finalmente, con el fin de maximizar la producción se modificaron los marcos de operación según condiciones del banco de baterías (modelo ajustado). La

demanda energética de los cinco escenarios posibles que operaron en la planta fue 1,1 kW, 5,0 kW, 6,1 kW, 6,3 kW y 7,5 kW. Por otra parte, la energía disponible en Caleta Rumena osciló entre 3,2 kW y 7,4 kW peak diario desde junio a enero, respectivamente. Con las condiciones promedio de radiación de Rumena se obtuvo una operación de 6 – 8 h día<sup>-1</sup>, produciendo entre 2400 y 4200 L diarios en el periodo de necesidad hídrica (septiembre y abril), cubriendo entre 12 y 21% del volumen recomendado al día por persona (100 L). Se consideró injustificada la operación de la planta entre mayo y agosto ya que la operación sobrepasa los criterios perjudicando la vida útil del banco de baterías. Se obtuvo un consumo específico de 12,4 – 13,4 kWh m<sup>-3</sup>.

## SEAWATER DESALINATION WITH NANOFILTRATION AND PHOTOVOLTAIC ENERGY: A CASE STUDY IN CALETA RUMENA

**Keywords:** Modular desalination plant, Mobile, Drinking water, Isolated communities.

### SUMMARY

The objective of this project was to study the production of drinking water from a modular desalination of nanofiltration plant, powered by off-grid photovoltaic energy in the town of Caleta Rumena, Región del Bío-Bío, Chile. From this study, the energy demand and available energy of the plant were characterized, a daily operating configuration was defined for each month, and its production of drinking water was estimated. The method consists in setting an operation sequence based on the variation of the water tanks levels, depending on the consumption requirement. Apart from this sequence, on an Excel spreadsheet programmed with a variety of simultaneous and codependent functions, the average daily water production for each month was modeled (standard model). Finally, in order to maximize production, the operating frameworks were modified according to the conditions of the battery bank (adjusted model). The energy demand of the five possible scenarios that operated in the plant was 1,1 kW, 5,0 kW, 6,1 kW, 6,3 kW and 7,5 kW. Furthermore, the energy available in Caleta Rumena, fluctuate between 3,2

kW and 7,4 kW daily peak from June to January respectively. With the average radiation conditions of Rumena, an operation of 6 - 8 h day<sup>-1</sup> was obtained, producing between 2400 and 4200 L per day in the period of water need (September and April), covering between 12 and 21% of the recommended daily volume per person (100 L). The operation of the plant between May and August was considered unjustified since the operation exceeds the criteria, damaging the useful life of the battery bank. A specific consumption of 12,4 – 13,4 kWh m<sup>-3</sup> was obtained.

## 1. INTRODUCCIÓN

Durante los últimos años en Chile, más específicamente en la región del Biobío, tanto la escasez como la inadecuada gestión de los recursos hídricos han tomado especial relevancia. Donde las localidades costeras, como Caleta Rumena (IX Región), no se han visto excluidas de esta situación. Una de las soluciones a la escasez de agua en el sector costero ha sido el abastecimiento por camiones aljibe, los cuales actualmente no dan abasto a la demanda poblacional. Por ejemplo, en la zona del presente proyecto, solo se cuenta con un único camión para abastecer Punta Lavapié, Rumena y otros sectores afectados por la misma situación (Contreras J. & Baeza A., 2022).

De acuerdo con la OMS, son necesarios entre 50 y 100 litros de agua por persona por día para garantizar que se cubran las necesidades más básicas. Los sistemas desaladores de agua de mar han estado en uso durante décadas y su método ha demostrado ser efectivo para crear fuentes de agua potable de alta calidad, segura y confiable (Arreguín F. & Domínguez A., 2000), representando una alternativa para las localidades costeras de Chile. Esta tecnología funciona convencionalmente por separación de sales mediante sistemas de filtración, impulsados por bombas de alta necesidad energética, siendo este el principal costo de la desalinización (Riveros, 2021).

En este marco se ha puesto en marcha un proyecto financiado por el Fondo de Fomento al Desarrollo Científico y Tecnológico (FONDEF IT19I0021, 2022),

que consta de un plan piloto modular desalador de agua con tecnología de nanofiltración alimentadas con energía fotovoltaica de tipo *off grid*, con el propósito de abastecer a las localidades costeras con agua potable.

Estas plantas, a pesar de su pequeño tamaño, siguen demandando altas cantidades de energía por el conjunto de bombas, por lo que, para estos sistemas accionados por el sol se necesita una gran cantidad de paneles fotovoltaicos y un banco de baterías, en el caso de que se necesite mayor tiempo de autonomía, lo cual implica un alto costo económico (Elboshy et al., 2022) y ambiental asociados a la no reutilización de su desecho (Dupouy, 2021).

Con el fin de garantizar el acceso a agua potable para las personas, es fundamental explorar alternativas para el abastecimiento de este recurso, mediante el uso optimizado de recursos disponibles como el agua de mar mediante desalinización y la energía solar.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. Objetivo general**

Estimar la producción de agua potable de la planta desaladora de agua de mar con sistema de nanofiltración impulsada con energía fotovoltaica *off grid* instalada en la localidad de Caleta Rumena, región del Biobío.

### **2.2. Objetivos específicos**

- Caracterizar la demanda energética y la energía disponible para la planta de tratamiento de agua de Caleta Rumena.
- Determinar configuraciones de funcionamiento para la planta.
- Estimar a partir del modelo de configuración, la disponibilidad hídrica para la comunidad de Caleta Rumena.

### **3. ANTECEDENTES GENERALES**

#### **3.1. Área de estudio**

La planta de desalinización de agua de mar modular *off grid* estudiada se localizó en localidad de Caleta Rumena, Provincia de Arauco en la Región del Biobío, en las coordenadas 37° 10' 0,1" y 73° 34' 59,9" (UTM Norte 5885695,20 y Este 625780,20), la cual estaba destinada a proveer agua potable a la población de dicha localidad durante un periodo determinado.

#### **3.2. Consideraciones del estudio**

Durante los meses estivales, Rumena enfrenta una demanda crítica de abastecimiento hídrico debido a la reducción de disponibilidad en sus fuentes superficiales y subterráneas, como los ríos y los pozos, respectivamente. Como consecuencia, la localidad tiene un régimen establecido por el municipio que limita el consumo de agua a ciertas horas del día y a una cantidad específica.

#### **3.3. Agua potable**

En Chile, la Norma Chilena 409 establece que el agua potable es “agua que cumple con los requisitos microbiológicos, de turbiedad, químicos, radiactivos, organolépticos y de desinfección descritos en NCh409/1, que aseguran su inocuidad y aptitud para el consumo humano” (Norma Chilena 409, 2005). Desde 2010, la Organización de las Naciones Unidas reconoce el derecho

humano al abastecimiento de agua y al saneamiento, indicando que todas las personas tienen derecho a disponer de forma continuada de cantidades suficientes de agua salubre, físicamente accesible, asequible y de una calidad aceptable para el uso personal y doméstico (OMS, 2023).

La falta de acceso a este recurso tiene implicancias graves en la salud. Los contaminantes presentes pueden incluir bacterias, virus, parásitos y químicos provenientes de desechos industriales, agrícolas y residenciales, conduciendo a diversas enfermedades como diarrea y hepatitis A (OMS, 2023). Una emergencia sanitaria ocurrida en Chile en 2019, en la ciudad de Osorno, por contaminación de agua potable con Diesel, da cuenta de las consecuencias de la contaminación del agua en la salud humana, donde se registró un aumento de un 46% de casos diagnosticados como diarrea (Gallardo, 2021). En Chile, la cobertura urbana de agua potable es del 99,9% (SiSS, 2019). A pesar de esto, a inicios de 2022 en la Región del Biobío había 32.000 personas que carecían de acceso a agua potable y que para ello el Gobierno de Chile implementó hace más de una década una solución de distribución de agua potable mediante vehículos aljibes, financiándolo con fondos del presupuesto de la Subsecretaría del Interior destinados a emergencias de la nación (Parra, 2023), destinando 50 litros diarios por persona según la ley de presupuesto (trimestral). La Provincia de Arauco corresponde al gasto más alto de la región (39% del total), alcanzando los 900 millones de pesos el primer trimestre del

2022, con una tendencia alcista. Estos antecedentes refuerzan desde distintas perspectivas la necesidad de desarrollar una alternativa para garantizar el acceso al agua potable a toda la población.

Para abordar esta brecha existente, en el caso de las localidades costeras, se han propuesto soluciones variadas, entre las cuales se encuentra la desalinización de agua de mar.

Localidades como Caleta Rumena en la Provincia de Arauco, ubicada a 125 km de Talcahuano, son asentamientos agrícolas y recolectores, marcados por su relativo aislamiento de los centros urbanos y han desarrollado la agricultura familiar y pesca artesanal, principalmente la recolección de orilla (algas), rodeados principalmente por plantaciones forestales (Mohor, 2013). Caleta Rumena es una de las localidades del sector donde existe una mayor proporción de familias en condiciones de vulnerabilidad, con una población de entre 200 y 250 habitantes en total, según datos de fichas socioeconómicas (Mohor, 2013). En este contexto, la falta de una solución a largo plazo contribuye a la precarización de las condiciones de vida de la población de esta localidad.

#### **3.4. Desalinización con sistemas fotovoltaicos *off grid***

La desalinización es definida por la Asociación Internacional de Desalación (IDA, por sus siglas en inglés), como “el proceso de eliminación de sales disueltas del agua, produciendo de este modo el agua dulce a partir del agua

de mar o agua salobre” (Vivanco, 2016). En Chile y el mundo, la ósmosis inversa es el método más utilizado para la desalinización de agua de mar, sin embargo, requiere de alta presión para el funcionamiento, y, por lo tanto, de alta energía. Las presiones de operación de las membranas de osmosis inversa varían entre 10 a 28 bar para el tratamiento de aguas salobres, y entre 55 y 70 bar para agua de mar, mientras que las de nanofiltración funcionan con presiones entre 20 y 40 bar para agua de mar y salobre, lo que se traduce inmediatamente en un menor costo de producción, con el añadido que el agua producida ya posee una cantidad importante de minerales necesarios para el consumo humano (Neira, 2016).

Por este motivo, las membranas de nanofiltración son una buena alternativa a la osmosis inversa, las cuales han sido estudiadas como pretratamiento para obtención de agua potable a partir de agua de mar (Yadav *et al.*, 2022), sin embargo, han sido poco estudiadas como método principal de filtración. Asimismo, la tecnología de generación de energía solar fotovoltaica, que ha demostrado ser una alternativa ideal y limpia a los combustibles fósiles, especialmente en áreas remotas y aisladas, sin acceso a redes eléctricas o de difícil acceso a ella (Gorjian *et al.*, 2020). La radiación se define como cantidad de energía solar que incide por unidad de área y tiempo ( $\text{kWh m}^{-2}$  al día), y la cantidad captable por los paneles fotovoltaicos depende tanto de factores meteorológicos (nubosidad, precipitación) como de establecimiento del

sistema (disposición respecto al sol, características de las placas fotovoltaicas).

En los sistemas de desalinización fotovoltaicos, es fundamental el almacenamiento de energía o un sistema de respaldo eléctrico para garantizar un funcionamiento sostenido (Gorjian *et al.*, 2020). Sin embargo, la continuidad del sistema de desalinización puede verse afectada por varios factores, entre los cuales se encuentra la sincronización en los volúmenes de llenado de estanques, ya que una gestión adecuada de estos estanques implica coordinar el proceso de desalinización con la capacidad de almacenamiento y distribución de agua. Además de un sistema de monitoreo para controlar tanto la sincronización del llenado de estanques como el rango horario de funcionamiento.

### **3.5. Consideraciones banco de baterías.**

El banco de baterías no solo es el componente más costoso del sistema eléctrico, sino que también es su núcleo fundamental. Su papel dual, como almacén de energía y fuente de alimentación, lo convierte en un elemento crucial para la viabilidad económica y la eficiencia del proyecto.

Este banco de batería tiene un número estudiado de ciclos de carga y descarga, lo cual está relacionado principalmente por la profundidad de descarga (DoD), a su vez una temperatura baja y corriente de descarga elevada reducen la capacidad, lo que implica menor vida útil como indica la

Figura 1, por lo que se debe tener especial cuidado con estos valores críticos de operación.

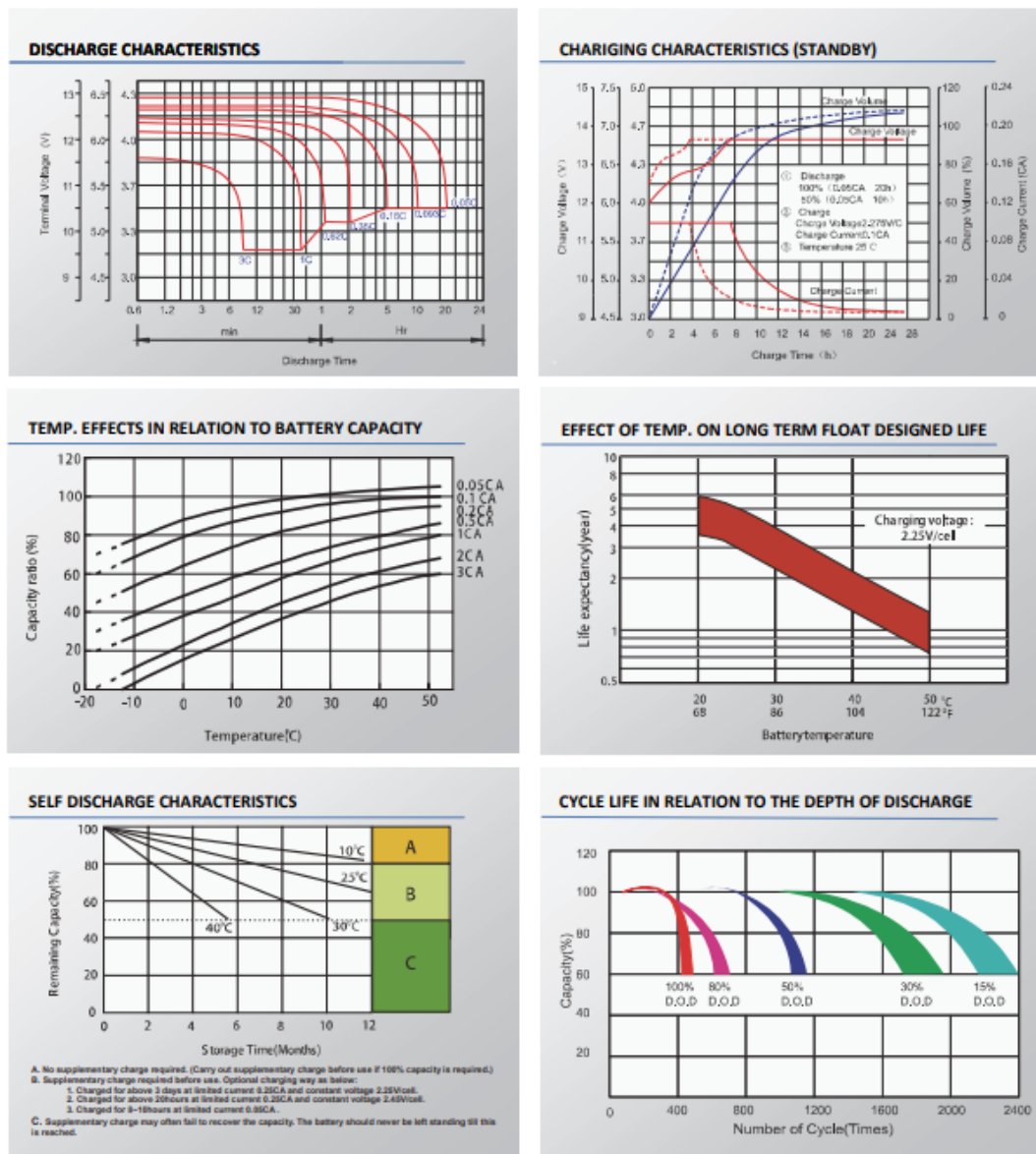


Figura 1. Ficha técnica de batería de ciclo profundo GEL Aokly (<https://www.renova-energia.com/wp-content/uploads/2020/04/BT134.pdf>).

## 4. METODOLOGÍA

### 4.1. Descripción de planta

Se utilizó como objeto de estudio una planta desaladora de agua de tipo modular impulsada por un sistema fotovoltaico de tipo off grid (desconectado de la red), en la que los componentes de filtración, bombeo, almacenamiento y transformación de energía, control y transmisión de datos están insertos en un contenedor de 6 x 2,4 x 2,6 metros. Como se ilustra en la Figura 2, en la parte superior del contenedor se encuentra adosada una estructura metálica que soporta el sistema de captación fotovoltaica, mientras que a un lado del contenedor se ubican tres estanques para la acumulación de agua, y la bomba de alimentación de agua de mar.

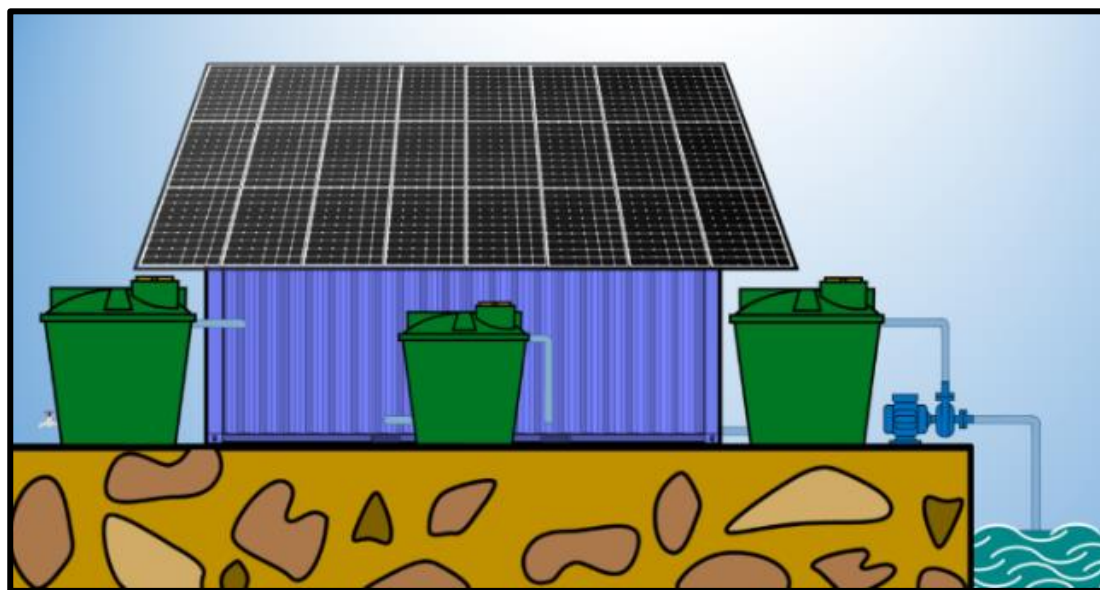


Figura 2. Vista externa del sistema desalador modular fotovoltaico.  
(Fuente: Elaboración propia)

#### 4.1.1. Sistema de filtración.

El funcionamiento de la planta se definió en tres etapas; etapa de alimentación “ET0”, primera etapa de nanofiltración “ET1” y segunda etapa de nanofiltración “ET2” (Tabla 1). Estas etapas están asociadas al llenado del estanque de agua de mar “EAM”, estanque de agua intermedia “EAI” y estanque de agua producto “EAP”, respectivamente. Los motores implicados en cada etapa se muestran en la Tabla 1 y sus funciones se detallan en la Tabla 2.

Tabla 1. Configuración de encendido y apagado de los cinco motores en cada etapa.

|     | M1                                  | M2                                  | M3                                  | M4                                  | M5                                  |
|-----|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| ET0 | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            |
| ET1 | <input type="checkbox"/>            | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            |
| ET2 | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> |

Tabla 2. Especificaciones de motores implicados en la desalación.

| Motor | Marca    | Modelo         | P (kW) | Tipo     | Función                          |
|-------|----------|----------------|--------|----------|----------------------------------|
| M1    | BESTFLOW | 4SPM 5-8       | 0,75   | 1 $\phi$ | Alimentación EAM                 |
| M2    | VOGES    | B 90           | 2,20   | 3 $\phi$ | Prefiltración y alimentación ET1 |
| M3    | ABB      | M2BAX 160MLA 6 | 7,50   | 3 $\phi$ | Filtración ET1                   |
| M4    | PEDROLLO | PK 60          | 0,37   | 1 $\phi$ | Alimentación ET2                 |
| M5    | HOYER    | 5AZA 112M-2    | 4,00   | 3 $\phi$ | Filtración ET2                   |

Los motores se esquematizan junto con los componentes de filtración en la Figura 3 y su funcionamiento se describe a continuación. El agua de mar es impulsada por M1 al EAM. Luego, ésta se filtra a través de un filtro de arena

(FA) y dos módulos de microfiltración (FM). El agua filtrada se impulsa por M3 a través de dos módulos de nanofiltración (FN1), que eliminan la mayoría de las sales disueltas del agua. El agua permeada de los módulos FN1 se almacena en el EAI. El agua rechazada de los módulos FN1 se envía al mar, circulando por el recuperador de energía (M5).

El agua filtrada del EAI se impulsa a través del módulo de nanofiltración (FN2), que elimina las sales restantes del agua. El agua permeada de los módulos FN2 se almacena en el EAP. El agua rechazada de los módulos FN2 se recircula al EAM.

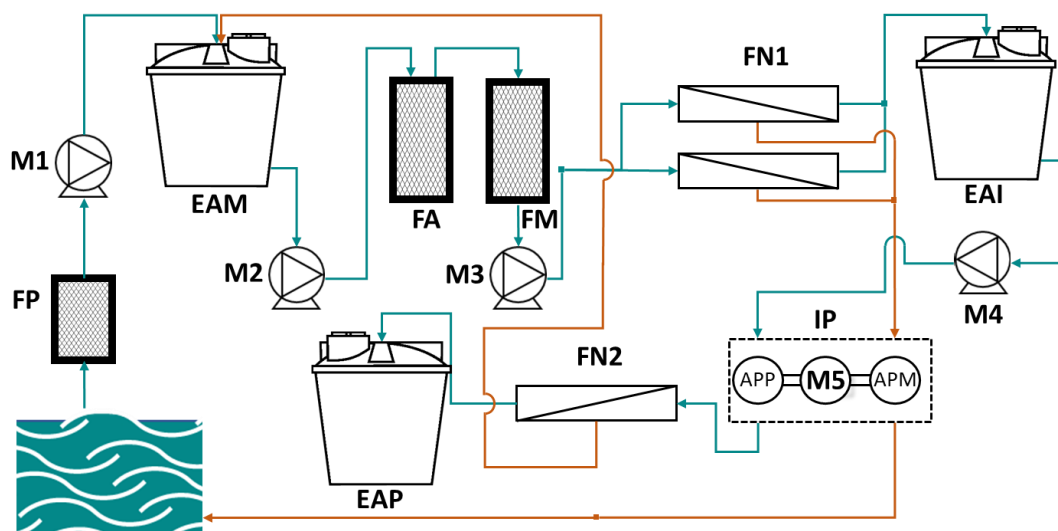


Figura 3. Componentes del sistema de procesamiento de agua de mar. (Fuente: Elaboración propia).

#### 4.1.2. Sistema de generación de energía.

El sistema fotovoltaico empleado consta de: 24 módulos fotovoltaicos monocristalinos ZNSHINESOLAR® de 430 W de potencia máxima en condición estándar (10320 Wp en total), dos controladores de carga SmartSolar® MPPT 250/85, un banco de baterías o BB, de 16 unidades, AOKLY® 6GFM200G de 200 Ah y 12 V cada una, tres inversores Multiplus II 48/3000/35, dos variadores de frecuencia (Delta® MS300 11 kW y ABB® ACS355 de 4 kW), y el sistema de supervisión, control y adquisición de datos VICTRON® Color Control GX. Un esquema simplificado del sistema se muestra en la Figura 4.

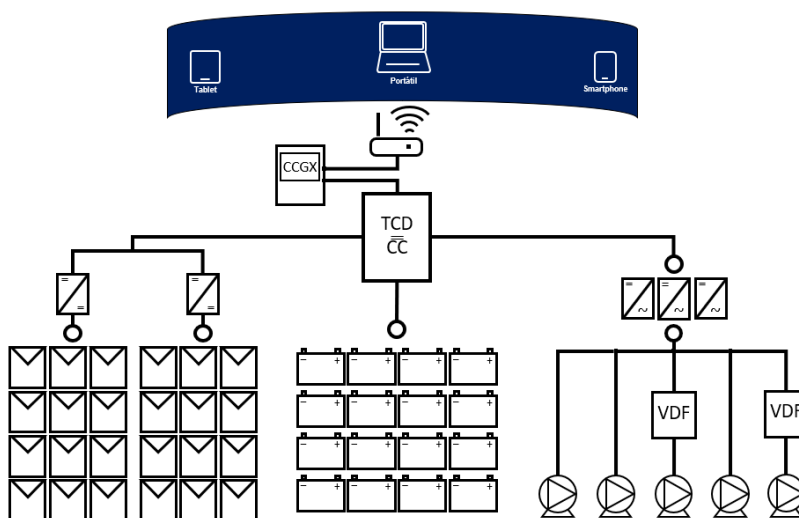


Figura 4. Esquema general sistema fotovoltaico (absorción, almacenamiento, transformación y control), motores impulsados y sistema de transmisión de datos (Fuente: Elaboración propia).

Este sistema de generación de energía se describe en cuatro secciones:

### 1. Sección de captación fotovoltaica (SFV):

Consta dos reguladores de carga, cada uno encargado de un arreglo fotovoltaico de tres strings con cuatro módulos cada uno, captando en condiciones estándar hasta 10,32 kW de potencia (Figura 5).

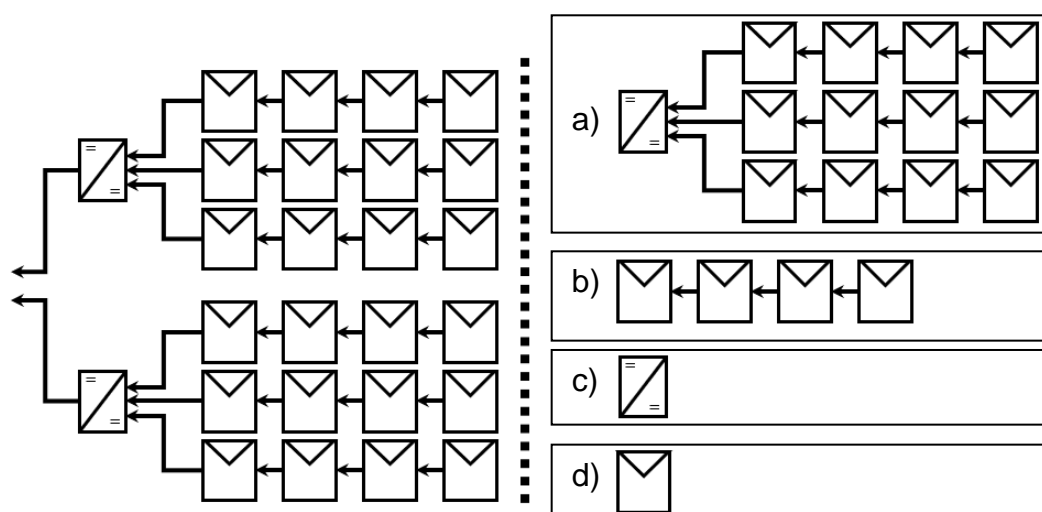


Figura 5. Esquema SFV. a) Arreglo fotovoltaico, b) String, c) Regulador de carga, c) Modulo fotovoltaico (Fuente: Elaboración propia).

### 2. Sección banco de energía (SBE):

Consta de cuatro ramas paralelas de cuatro baterías conectadas en serie, almacenando en plena carga hasta 800 Ah o 38,4 kWh de energía (Figura 6).

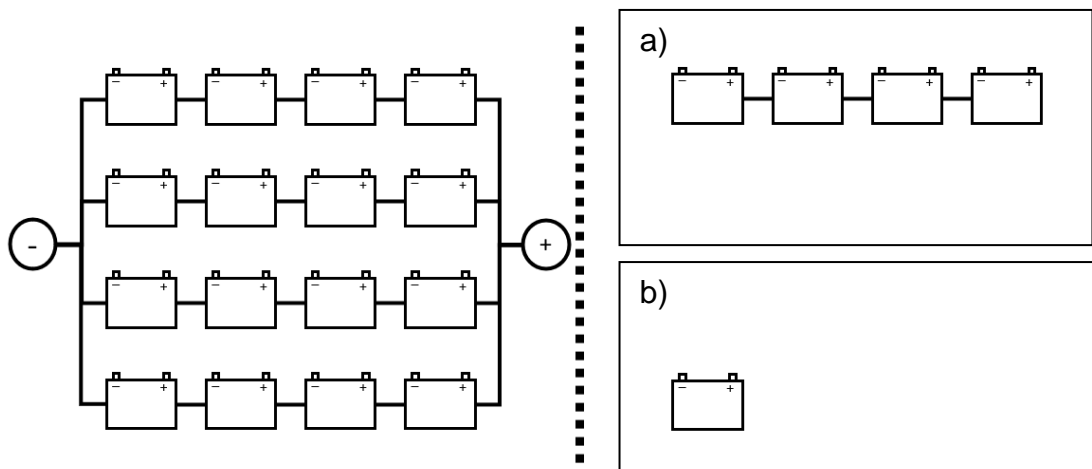


Figura 6. Esquema SBE. a) Rama de baterías en serie, b) Batería (Fuente: Elaboración propia).

### 3. Sección de alimentación de cargas (SAC):

Consta de tres inversores de corriente de hasta 3 kW, alimentan una fase eléctrica cada uno, capaces de suplir a plena carga 9 kW trifásicos desde el tablero de control y distribución de corriente alterna (TCD AC) (Figura 7).

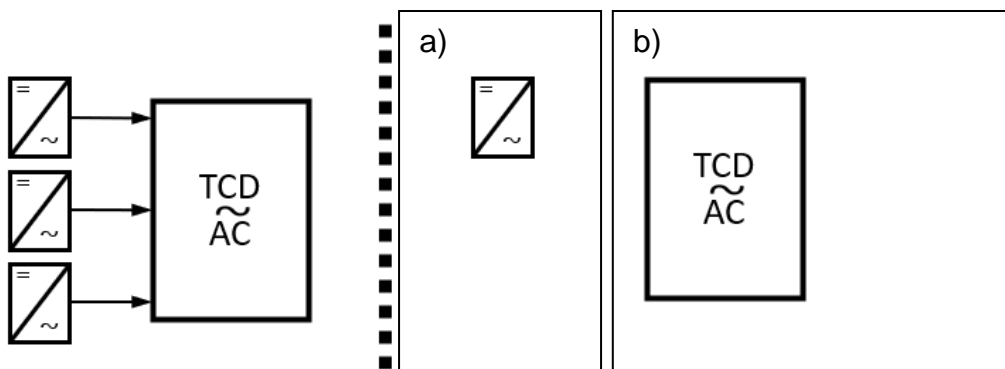


Figura 7. Esquema SAC. a) Inversor de corriente, b) Tablero de control y distribución de corriente alterna (Fuente: Elaboración propia).

#### 4. Sección de supervisión y transmisión de datos (SSTD):

Compuesta por el centro de comunicaciones Color Control GX (CCGX), y la plataforma Virtual Remote Management (VRM), los cuales dependen de sensores localizados en cada controlador de carga del SFV, en la caja de combinación de CC de la SBE, en cada fase de la SAC y dentro de cada estanque de agua. Focalizando corriente, voltaje, potencia, SOC y nivel del estanque principalmente (Figura 8).

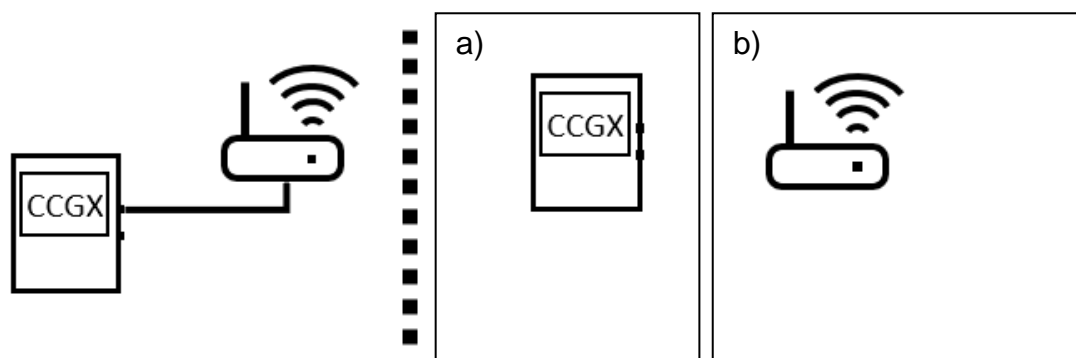


Figura 8. Esquema SSTD. a) Hardware del centro de comunicaciones CCGX, b) Modem (Fuente: Elaboración propia).

### 4.2. Caracterización de la energía

#### 4.2.1. Demanda energética.

Para operar la planta caso por caso de manera independiente se definieron siete escenarios de funcionamiento (E1, E2, E3, E4, E5, E6 y E7) a partir de la combinación de las ET0, ET1 y ET2 (Tabla 3).

Tabla 3. Configuración de encendido y apagado de etapas para cada uno de los 7 escenarios.

|     | E1                                  | E2                                  | E3                                  | E4                                  | E5                                  | E6                                  | E7                                  |
|-----|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| ET0 | <input checked="" type="radio"/> ON | <input checked="" type="radio"/> ON | <input checked="" type="radio"/> ON | <input type="radio"/> OFF           | <input type="radio"/> OFF           | <input type="radio"/> OFF           | <input checked="" type="radio"/> ON |
| ET1 | <input type="radio"/> OFF           | <input checked="" type="radio"/> ON | <input checked="" type="radio"/> ON | <input checked="" type="radio"/> ON | <input type="radio"/> OFF           | <input checked="" type="radio"/> ON | <input type="radio"/> OFF           |
| ET2 | <input type="radio"/> OFF           | <input type="radio"/> OFF           | <input checked="" type="radio"/> ON | <input checked="" type="radio"/> ON | <input checked="" type="radio"/> ON | <input type="radio"/> OFF           | <input checked="" type="radio"/> ON |

Para ello, el dispositivo CCGX registró los parámetros potencia, y se descargaron datos de potencia suministrada por la SAC desde la plataforma VRM, elaborando perfiles patrón de demanda eléctrica para cada escenario a partir de estos datos. Se consideró que la potencia demandada podía aumentar en el tiempo por ensuciamiento de los filtros, por lo que a los perfiles patrones se les fijó una potencia media  $P_{E1}$ ,  $P_{E2}$ ,  $P_{E3}$ ,  $P_{E4}$ ,  $P_{E5}$ ,  $P_{E6}$  y  $P_{E7}$ , como se ejemplifica en la Figura 9.

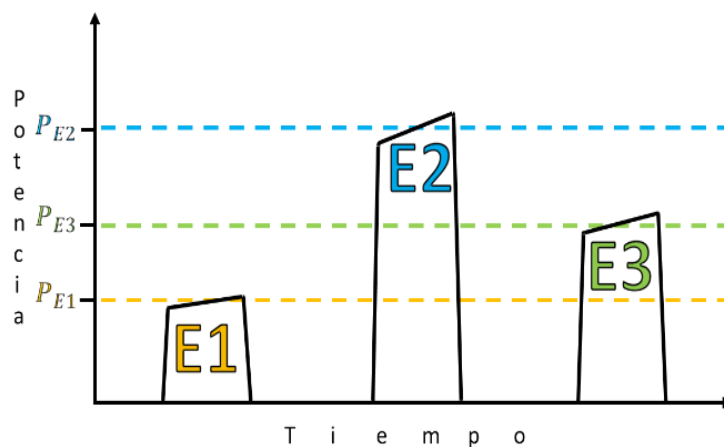


Figura 9. Potencia de operación monitoreada en CCGX para cada escenario (Fuente: Elaboración propia).

Todas las mediciones mencionadas previamente se rigieron por las recomendaciones de los ingenieros químicos que diseñaron la planta (Neira, 2016) con el propósito de garantizar una calidad óptima del agua producida. Dicho lo anterior, para establecer las potencias de operación la recomendación de presión máxima de operación por membrana para ET1 fue de 40 bar y para ET2 de 17 bar.

Para registrar las lecturas en los distintos escenarios de funcionamiento, se utilizó una combinación de instrumentos de medición: variadores de frecuencia (para medir la presión y frecuencia), rotámetros (para medir caudal) y el monitor Color Control GX (para medir la potencia de consumo). Los datos obtenidos a través de los rotámetros se utilizaron para determinar los flujos de permeado y rechazo por filtración (Ver APÉNDICE A). Sin embargo, el rechazo de ET2 no se pudo medir con rotámetro, por lo que se utilizó el método volumétrico (midiendo el tiempo de llenado de un bidón de 6 litros) para determinar el flujo correspondiente. Los registros mencionados se ordenaron en la Tabla 4.

Tabla 4. Registro de datos en cuadro de operación y desempeño de ET1 y ET2 distintos escenarios.

| 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         |               |      |                 |      |              |                |           |           |           |

Mientras que los datos correspondientes a los escenarios E2, E3 y E7 se obtuvieron a partir de la concatenación de los escenarios E4, E5 y E6 con E1. Para ello, se sumaron las potencias de cada combinación de tal manera que se completaron los espacios en blanco de la Tabla 4. Con ello se obtuvo la caracterización de la demanda energética en los siete escenarios.

#### 4.2.2. Energía disponible

##### 4.2.2.1 Funciones fotovoltaicas.

Son funciones cuadráticas (Ecuación 1) que modelan la potencia administrada al banco de baterías diariamente (Tabla 6).

$$P_{FV}(m, t) = a(t - b)^2 + c \quad [1]$$

Donde:

- $P_{FV}$  = Función fotovoltaica, modela de la potencia suministrada al banco de baterías en Watt.
- $a$  = Constante canónica que representa la concavidad de la parábola, abre hacia arriba ( $a > 0$ ) o hacia abajo ( $a < 0$ ).
- $b$  = Constante canónica que representa la hora del punto máximo de la función fotovoltaica.
- $c$  = Constante canónica que representa el valor máximo alcanzado por la función fotovoltaica.
- $m$  = Variable temporal discreta entre 1 y 12 que representa el mes del año.
- $t$  = Variable temporal continua entre 0 y 24 que representa la hora del día.

Estas funciones corresponden a la tendencia de los ciclos diario-mensual otorgados por la plataforma de base de datos de radiación de Chile “Explorador Solar”. Esta plataforma nos solicita ingresar la ubicación en el mapa y las características del sistema fotovoltaico (Tabla 5), entregando como resultado una tabla de resumen en una planilla Excel con datos de generación fotovoltaica y sus factores de modelación para un año meteorológico típico en caleta Rumena, como se indica en la Figura A 1; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.** (detallado en el ANEXO A), de la cual se recompilan los datos de 0:00 a 23:00 horas entre enero y diciembre, extrayendo así los ciclos diario-mensual.

Tabla 5. Información ingresada en la opción “Monofacial Modelo Avanzado”.

| Componente           | Característica     | Valor              |
|----------------------|--------------------|--------------------|
| Panel fotovoltaico   | N° celdas          | 156                |
| Panel fotovoltaico   | Vmp                | 44,8 V             |
| Panel fotovoltaico   | Imp                | 9,6 A              |
| Panel fotovoltaico   | Voc                | 53,6 V             |
| Panel fotovoltaico   | Ics                | 10,14 A            |
| Panel fotovoltaico   | $T_k(Voc)$         | -0,29 %/°C         |
| Panel fotovoltaico   | $T_k(Isc)$         | 0,05 %/°C          |
| Arreglo fotovoltaico | N° paneles         | 24                 |
| Arreglo fotovoltaico | Tipo de montaje    | Estructura aislada |
| Arreglo fotovoltaico | Inclinación        | 29 °               |
| Arreglo fotovoltaico | Azimut             | -10 °              |
| Inversor             | Capacidad          | 9 kW               |
| Inversor             | Eficiencia         | 96 %               |
| Sistema              | Pérdidas generales | 14 %               |

Tabla 6. Funciones fotovoltaicas definidas para el mes “m” a la hora “t”.

| Mes        | $P_{FV}(t, m)$            |
|------------|---------------------------|
| Enero      | $-250(t - 13,1)^2 + 7400$ |
| Febrero    | $-260(t - 13,2)^2 + 7300$ |
| Marzo      | $-235(t - 13,2)^2 + 6700$ |
| Abril      | $-190(t - 13,0)^2 + 5200$ |
| Mayo       | $-150(t - 13,0)^2 + 3800$ |
| Junio      | $-140(t - 13,1)^2 + 3200$ |
| Julio      | $-150(t - 12,9)^2 + 3300$ |
| Agosto     | $-165(t - 13,1)^2 + 3900$ |
| Septiembre | $-200(t - 13,1)^2 + 5300$ |
| Octubre    | $-250(t - 12,8)^2 + 6700$ |
| Noviembre  | $-220(t - 12,8)^2 + 6900$ |
| Diciembre  | $-230(t - 13,0)^2 + 7000$ |

#### 4.2.2.2 Margen de operación.

Una vez determinadas las funciones fotovoltaicas se obtuvo el margen de operación, compuesto por tres valores: hora inicio, tiempo equivalente y hora fin.

El tiempo de equivalente se definió como “Cantidad de horas que la planta puede funcionar a consumo máximo”, y se calcula como la relación entre la energía almacenable del sistema fotovoltaico “ $E(m)$ ” sobre el consumo máximo “ $C_{max}$ ” como se muestra en la Ecuación 2.

$$t_{eq}(m) = E(m)/C_{max} \quad [2]$$

Donde:

$t_{eq}(m)$  = Tiempo equivalente de operación para la planta en el mes “m”.

$E(m)$  = Energía acumulable diaria del sistema fotovoltaico en el mes “m”.

$C_{max}$  = Potencia de consumo máximo al que la planta puede operar.

La energía acumulable corresponde a integración de la función fotovoltaica entre las horas de inicio y fin de generación, como indica la Ecuación 3.

$$E(m) = \int_{t_0}^{t_1} P_{FV}(m, t) dt \quad [3]$$

$$t_0 = b - \sqrt{c/a} \quad [3.1]$$

$$t_1 = b + \sqrt{c/a} \quad [3.2]$$

Donde:

$P_{FV}$  = Función fotovoltaica del mes “m” correspondiente.

$t_0$  = Hora de inicio de generación (raíz 1) de la función fotovoltaica.

$t_1$  = Hora de fin de generación (raíz 2) de la función fotovoltaica.

Las horas de inicio y fin del margen de operación se calcularon centrando el tiempo equivalente en la hora de generación peak del mes analizado como muestra la Ecuación 4 y Ecuación 5. Para ello se centró el  $t_{eq}(m)$  en la constante “b” de la  $P_{FV}(m, t)$ , que representa la hora peak de potencia.

$$t_i(m) = b - t_{eq}(m) \quad [4]$$

$$t_f(m) = b + t_{eq}(m) \quad [5]$$

Donde:

$t_i$  = Hora de inicio del margen de operación.

$t_f$  = Hora de fin del margen de operación.

$b$  = Constante canónica de la función fotovoltaica del mes correspondiente.

$t_{eq}$  = Amplitud temporal del margen de operación.

### **4.3. Configuraciones de funcionamiento para la planta.**

Corresponde a la secuencia final diaria-mensual en que se presentan los distintos escenarios para mantener un flujo continuo de agua en la planta, y está condicionada por tres factores principales: los escenarios objetivo, los niveles críticos de los estanques y el marco de operación. Se plantearon dos configuraciones diferentes, una para modelación estándar y otra modelación ajustada de funcionamiento.

#### **4.3.1. Efecto de los escenarios de operación sobre los estanques de acumulación.**

Se determinaron los escenarios objetivo, que se centran en la producción de agua potable, y los escenarios solución, que resuelven problemas generados por el continuo funcionamiento del escenario objetivo correspondiente. Para lograr esto, se calcularon los flujos de agua de cada escenario mediante un balance de materia del sistema, como se muestra en el APÉNDICE A.

La operación de cada escenario mostró un efecto distinto en los 3 estanques de acumulación como se muestra en la Tabla 7.

Tabla 7. Flujos de agua en los estanques de acumulación ( $L \text{ min}^{-1}$ ) para los diferentes escenarios de operación.

|    | EAM   | EAI   | EAP  |
|----|-------|-------|------|
| E1 | 60,0  | 0,0   | 0,0  |
| E2 | 1,8   | 18,2  | 0,0  |
| E3 | 34,4  | -17,2 | 20,0 |
| E4 | -25,6 | -17,2 | 20,0 |
| E5 | 10,6  | -30,6 | 20,0 |
| E6 | -58,2 | 18,2  | 0,0  |
| E7 | 70,6  | -30,6 | 20,0 |

Basado en la Tabla 7, se llevó a cabo un proceso de análisis para definir los escenarios objetivo:

Se clasificaron como escenarios objetivo todos aquellos que mostraron un flujo en el EAP, es decir, E3, E4, E5 y E7.

Cuatro de los siete escenarios descargan el EAI. De estos, E5 y E7 representarían un potencial problema al descargar un equivalente a por lo menos tres operaciones consecutivas de recarga de EAI (E2 o E6) para dejar agua disponible para la siguiente operación de escenario objetivo (E3 o E4).

Los escenarios restantes, E3 y E4, muestran la misma descarga en el EAI y el mismo flujo en el EAP. Sin embargo, en el escenario E3 se muestra una recarga en el EAM. Por lo tanto, justifica mantenerlo operativo por sobre E4, definiendo E3 como el escenario objetivo.

Una vez definido el escenario objetivo, se evaluaron los problemas que podían surgir durante su funcionamiento normal a partir de valores críticos, mínimo y

máximo, de volumen los estanques. Cada problema presentado se relaciona con una solución que acude a uno o dos escenarios específicos.

**Problemas potenciales:**

I. Volumen de EAM menor al mínimo:

Solución: Operar E1 para aumentar el volumen de EAM.

II. Volumen de EAI menor al mínimo:

Solución 1: Operar E2 para aumentar el volumen de EAI y EAM.

Solución 2: Operar E6 aumentando el volumen de EAI y disminuyendo el volumen de EAM.

III. Volumen de EAM mayor al máximo:

Solución 1: Operar E4 para disminuir el volumen de EAM y EAI.

Solución 2: Operar E6 para disminuir el volumen de EAM y aumentar el volumen de EAI.

**4.3.2. Secuencia de operación de la planta.**

Considerando lo anterior, se definió una función de operación condicional que considera dos factores principales: la hora del día y los niveles de los estanques EAI y EAM. En función de estos factores, se selecciona el escenario que garantice el funcionamiento adecuado de la planta.

Los criterios de esta función se muestran en el diagrama de flujo de la Figura 10 y en él se puede observar que la planta solo puede operar dentro de un marco de horas definido, correspondiente al marco de operación, que varió dependiendo de la disponibilidad fotovoltaica de cada mes. Si la hora actual no se encuentra dentro de este marco, la planta no se encenderá.

Si la planta está encendida (dentro del marco de operación) el sistema de secuenciación seleccionará E3 como escenario objetivo. Sin embargo, si los niveles de los estanques EAI o EAM alcanzan sus condiciones críticas, el sistema de secuenciación activará los escenarios de solución adecuados para cada situación.

**Secuencia de activación de escenarios:**

Condición 1:

Si el cambio de volumen producido por E3 traspasa simultáneamente los límites críticos de volumen de ambos estanques (Máximo de EAM: 5000 L y mínimo de EAI: 750 L), se activa E6.

Condición 2:

Si el cambio de volumen producido por E3 solo traspasa el límite crítico de volumen máximo de EAM, se activa E4.

Condición 3:

Si el cambio de volumen producido por E3 no traspasa ninguno de los límites críticos de volumen, se activa E3.

Condición 4:

Si el cambio de volumen producido por E3 disminuye por debajo del límite crítico de volumen mínimo de EAI, se analiza un último cuestionamiento:

¿El nivel de EAM es inferior al mínimo?

De ser cierto se activa E1, de lo contrario E2.

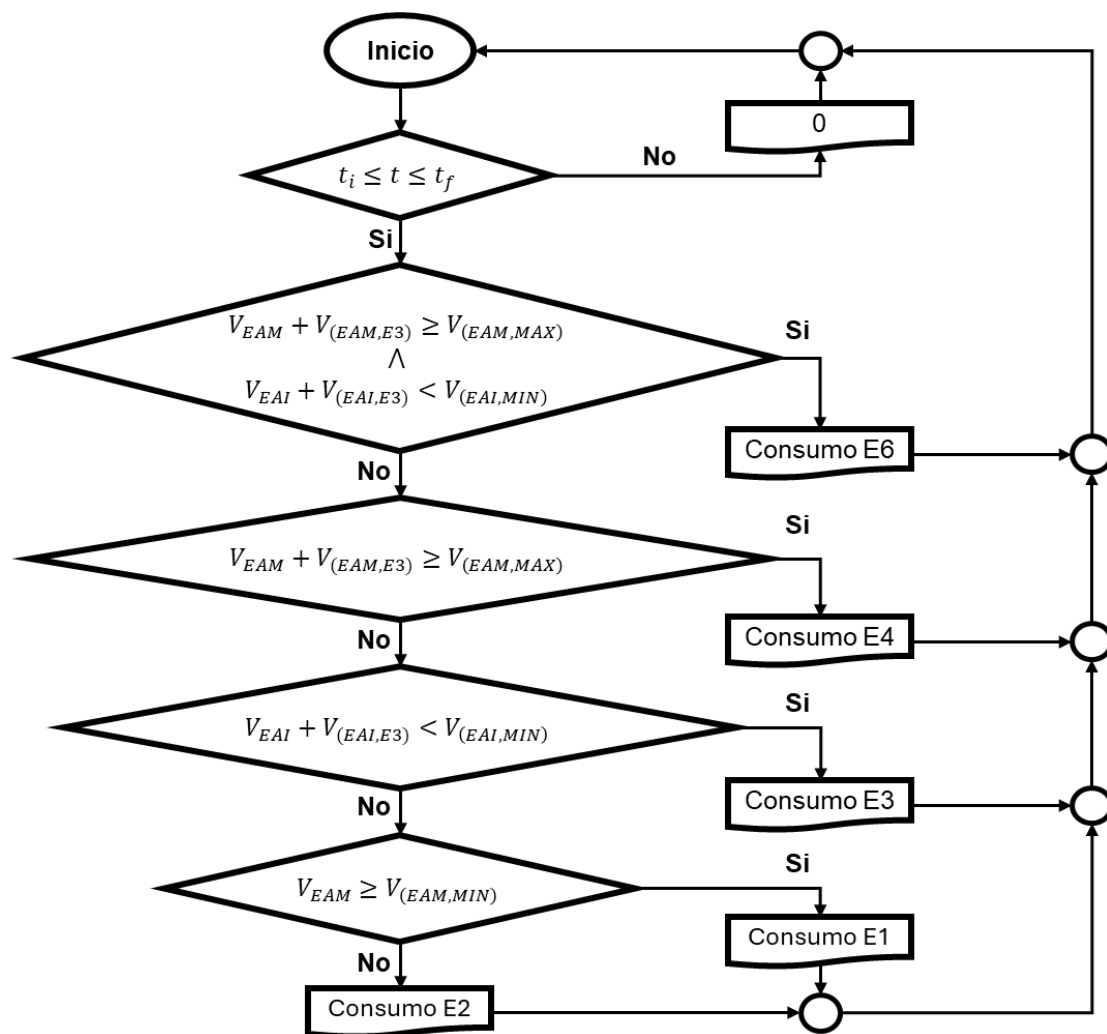


Figura 10. Diagrama de flujo para la función de operación condicional (Fuente: Elaboración propia).

#### **4.4. Producción estimada de agua potable.**

Una vez establecida la configuración, se realizaron dos tipos de estimaciones de producción de agua potable: una estimación estándar, que se guió solo por los niveles de estanque, escenario objetivo y marco de operación; y estimaciones ajustadas, cuyo ajuste contempló modificar el margen de operación usado en la estimación estándar, aproximándose lo más posible a los criterios límites de operación del BB, observando el efecto de este ajuste en el volumen de producción de agua potable, la corriente máxima de operación, capacidad del BB al final del día y el consumo específico asociado.

##### **4.4.1. Implementación en Excel para la simulación.**

Para realizar las estimaciones de producción de agua se empleó el software de cálculo Excel, organizando la información en tres secciones principales: datos de entrada, resultados y variables de operación. Todos los ejemplos mostrados son a partir de un  $\Delta t$  de 10 min y el mes de enero.

##### **I. Sección de datos de entrada**

Esta sección permite ingresar los datos que se muestran a continuación.

- El intervalo de tiempo “ $\Delta t$  [min]” a utilizar para evaluar los cambios en la planta (Figura 11).
- El mes de simulación “Mes” (Figura 11). Al seleccionar el mes se autocompletan las constantes fotovoltaicas (“Constantes pv”) a, b y c, que

permiten obtener las “Raíces Pv”. Éstas se formulan para entregar las horas transcurridas desde las 00:00 horas en que el sistema fotovoltaico empieza y termina de suministrar potencia a la planta (“ $t_0$ ” y “ $t_1$ ” respectivamente).

- Los límites superiores e inferiores de cada estanque (Figura 12).
- La capacidad del banco de baterías, el voltaje entre sus terminales, la tasa máxima de descarga y la profundidad de descarga permitida (Figura 13). El conjunto “Banco de Baterías” permite ingresar la capacidad del banco de baterías “Cap”, el voltaje entre los terminales de este “Volt”, la tasa máxima de descarga del banco “I.Max” y la profundidad de descarga permitida “DoD” en el banco de baterías.

|                  |                            |                   |      |      |
|------------------|----------------------------|-------------------|------|------|
| $\Delta t$ [min] | 10                         |                   |      |      |
| Constantes pv    | Mes                        | a                 | b    | c    |
|                  | Enero <input type="text"/> | -250              | 13.1 | 7400 |
| Raíces Pv        | $b - \sqrt{-c/a}$          | $b + \sqrt{-c/a}$ |      |      |
|                  | 7.7                        | 18.5              |      |      |

Figura 11. Parámetros de entrada para la simulación fotovoltaica (Fuente: Elaboración propia).

| Estanques | Limites      | EAM  | EAI  |
|-----------|--------------|------|------|
|           | Superior [L] | 5000 | 5000 |
|           | Inferior     | 15%  | 15%  |

Figura 12. Parámetros limitantes de capacidad de estanques (Fuente: Elaboración propia).

| Banco de Baterías | Cap [Ah] | Volt [V] | I.Max [A] | Dod |
|-------------------|----------|----------|-----------|-----|
|                   | 800      | 48       | 80        | 0.3 |

Figura 13. Parámetros de operación críticos para el banco de baterías (Fuente: Elaboración propia).

## II. Sección de resultados

Una vez ingresados los datos de entrada, se autocompletan los siguientes grupos de casillas:

- **Cálculo Energía:** Estas casillas proporcionan la energía acumulada entre las horas de generación. El resultado son tres datos: la energía evaluada en  $t_0$ , la energía evaluada en  $t_1$  y la energía acumulada entre las horas de generación (Figura 14).

| Calculo Energia | $c \cdot t + b \cdot (t - b)^3 / 3$ | E [Wh] |
|-----------------|-------------------------------------|--------|
|                 | 70100                               | 123780 |
|                 |                                     | 53680  |

Figura 14. Energía almacenable para simulación en enero (Fuente: Elaboración propia).

- **Margen de operación:** La duración del margen de operación se define como "Horas eq". Este tiempo se distribuye entre "Hora inicio" y "Hora fin", aproximándose al valor más cercano de  $\Delta t / 60$ . Además, se muestra "Horas ON", que es la cantidad real de horas a las que se ajusta el margen de operación.

Las casillas de "Ajustes" permiten modificar manualmente la "Hora inicio" y "Hora fin" en una cantidad determinada de  $\Delta t$ , mediante los controladores representados por flechas de incremento (hacia arriba) y disminución (hacia abajo) como muestra la Figura 15.

|                           | Horas eq | Hora inicio | Hora fin | Horas ON |
|---------------------------|----------|-------------|----------|----------|
| <b>Marco de Operacion</b> | 7.2      | 9 1/2       | 16 2/3   | 7 1/6    |
| Ajustes                   |          | +0          | +0       |          |

Figura 15. Marco de operación resultante de simulación en enero (Fuente: Elaboración propia).

- **Consumo:** Se muestran los consumos correspondientes a cada escenario, así como los cambios de volumen de estanques cada  $\Delta t$ . Estos datos son importantes para el funcionamiento condicional de la planta (Figura 16).

| Consumo  | $\Delta V(t=10)$ | EAM      | EAI      | EAP     |
|----------|------------------|----------|----------|---------|
| 1132 [W] | E1               | 600 [L]  | 0 [L]    | 0 [L]   |
| 7474 [W] | E2               | 18 [L]   | 182 [L]  | 0 [L]   |
| 6141 [W] | E3               | 344 [L]  | -172 [L] | 200 [L] |
| 5009 [W] | E4               | -256 [L] | -172 [L] | 200 [L] |
| 1723 [W] | E5               | 106 [L]  | -306 [L] | 200 [L] |
| 6342 [W] | E6               | -582 [L] | 182 [L]  | 0 [L]   |
| 2855 [W] | E7               | 706 [L]  | -306 [L] | 200 [L] |

Figura 16. Cambio de volumen producido en los estanques acumuladores EAM, EAI y EAP para cada escenario en un  $\Delta t$  de 10 min (Fuente: Elaboración propia).

- **Almacenamiento:** Muestra en su parte superior el volumen final de la simulación al finalizar la operación de la planta (EAM.fin, EAI.fin y EAP.fin). Y en la fila inferior muestra la capacidad a la que llegó el banco de baterías (C.min), la capacidad con que llegó el banco al final de la simulación diaria (C.fin) y la tasa de descarga máxima de la simulación (I.max), como muestra la Figura 17.

|                       |          |          |          |
|-----------------------|----------|----------|----------|
| <b>Almacenamiento</b> | EAM.fin  | EAI.fin  | EAP.fin  |
|                       | 4563 [L] | 906 [L]  | 3800 [L] |
|                       | C.min    | C.fin    | I.max    |
|                       | 752 [Ah] | 800 [Ah] | -57 [A]  |

Figura 17. Parámetros de almacenamiento al fin de la operación diaria (Fuente: Elaboración propia).

### III. Sección de variables de operación

Muestra la evolución en el tiempo de los siguientes parámetros (Figura 18):

- Columna tiempo (Hora): Muestra el tiempo en formato digital (0 a 24 horas) cada “ $\Delta t$ ”.
- Columna función fotovoltaica (Pv): Muestra el valor de potencia en Watt de la función fotovoltaica cada “ $\Delta t$ ”.
- Columna función operación (Demanda): Muestra la potencia en Watt del escenario resultante cada “ $\Delta t$ ” detallado en la Figura 10.

- Columnas función registro de volumen (EAM, EAI y EAP): Cada columna tiene una función que visualiza el valor de la columna Demanda, la cual se asocia a los valores de cambio de volumen de estanque mostrada en la Figura 16, sumando el valor a cada estanque de forma acumulativa cada “ $\Delta t$ ”.
- Columna corriente operación ( $I_{BB}$ ): Función que calcula la corriente de operación como muestra la Ecuación 10 cada “ $\Delta t$ ”.

$$I_{BB}(t) = \frac{P_{FV}(t) - P_{Demanda}(t)}{V_{BB}} \quad [6]$$

Donde:

$P_{Demanda}$  = Potencia demandada por el escenario resultante de la función operación.

$V_{BB}$  = Voltaje de operación del BB.

- Columna capacidad banco de baterías ( $C_{BB}$ ): Función que calcula la capacidad del banco de baterías como muestra la Ecuación 11 cada “ $\Delta t$ ”.

$$C_{BB}(t) = C_{BB}(t - \Delta t) + I_{BB}(t) \cdot \Delta t \quad [7]$$

Donde:

$C_{BB}(t - \Delta t)$  = Capacidad del BB el  $\Delta t$  anterior.

| Hora | Pv | Demanda | EAM | EAI | EAP | $I_{BB}$ | $C_{BB}$ |
|------|----|---------|-----|-----|-----|----------|----------|
| 7:40 | 20 | 0       | 0   | 0   | 0   | 0        | 800      |

|       |      |      |      |     |      |    |     |
|-------|------|------|------|-----|------|----|-----|
| 13:10 | 7399 | 7474 | 4174 | 802 | 1600 | -2 | 766 |
| 18:30 | 110  | 0    | 4563 | 906 | 3800 | 2  | 800 |

Figura 18. Previsualización modelo de los parámetros dependientes del tiempo y secuencia de operación en enero (Fuente: Elaboración propia).

#### 4.4.2. Ajustes de operación.

Una vez seleccionado el mes, la programación en Excel completó la secuencia de operación de escenarios. A continuación, se verificaron los indicadores de control para asegurarse de que se respetaron los parámetros de operación del BB, que en el caso de la Figura 19 no se alcanzó a recuperar por completo al final del día (C.fin menor a 800 Ah) y la corriente de descarga excedió los 80 A (I.max menor a -80A), por lo que se resaltaron los valores fuera del límite.

|                        |          |          |          |
|------------------------|----------|----------|----------|
| Indicadores de Control | EAM.fin  | EAI.fin  | EAP.fin  |
|                        | 3449 [L] | 783 [L]  | 1200 [L] |
|                        | C.min    | C.fin    | I.max    |
|                        | 586 [Ah] | 702 [Ah] | -93 [A]  |

Figura 19. Visualización de formato en caso de no cumplimiento de parámetros limitantes (Fuente: Elaboración propia).

En este contexto, se identificaron tres situaciones que justifican un ajuste de

operación:

**I. Cuando la corriente de descarga excedió el límite.**

Para ello el ajuste fue estrechar el margen de operación modificando la “Hora inicio” y/o “Hora fin” hasta que la corriente demandada disminuyera por debajo de los 80 A. Esto se logra gracias a la compensación de potencia que el sistema fotovoltaico aporta.

**II. Cuando el banco no se recargaba en su totalidad al final del día.**

Para lo cual el ajuste fue desplazar el margen de operación a horas más tempranas, lo suficiente para permitir que la energía fotovoltaica recargara el banco al final del día en su totalidad.

**III. Cuando el margen de operación tenía posibilidades de ser ampliado en los meses de mayor disponibilidad.**

En cuyo caso el ajuste correspondió a ampliar el margen de operación. En los meses de mayor disponibilidad, fue posible ampliar el margen de operación hasta que se alcanzaran los casos limitantes mencionados anteriormente.

En la Figura 20 se muestra un ejemplo donde la corriente de descarga máxima es de 57 A, por lo que se puede ajustar la hora de inicio, hasta que dicha corriente sea lo más cercana al límite de 80 A sin llegar a esta, caso que ocurrió cuando se adelantó 30 min al inicio de operación (ajuste -3). Luego, se modificó la Hora fin al punto más cercano al momento en que el banco no

alcanzó a recuperarse al 100%, esto ocurrió cuando se postergó 10 min el final de operación (ajuste +1).

Dichos ajustes permitieron aumentar la producción de agua potable como se muestra comparativamente en el ejemplo de la Figura 20.

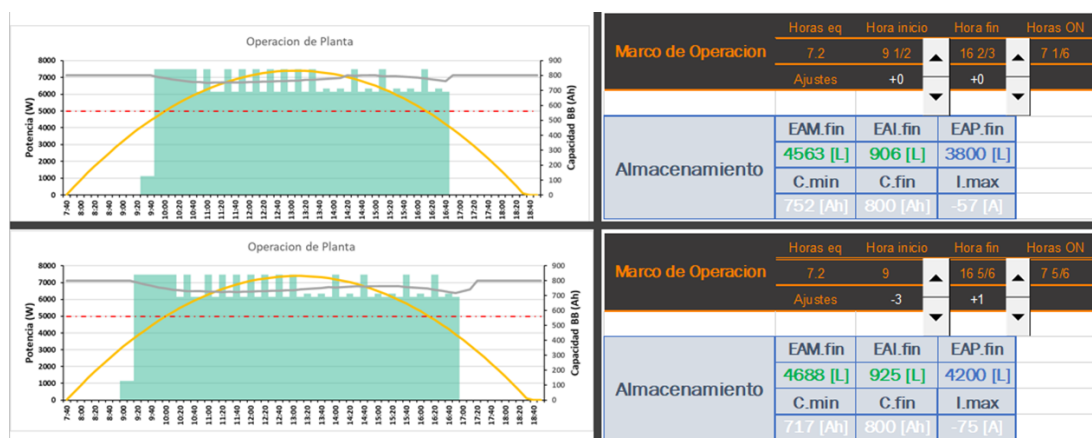


Figura 20. Comparación de configuraciones de operación (Fuente: Elaboración propia).

## **5. RESULTADOS**

### **5.1. Resultados de estimación estándar.**

Bajo una configuración para estimación estándar se registraron los siguientes resultados. En todos los meses no se excedió la profundidad de descarga (DOD). Desde octubre hasta marzo se logró una recuperación total del BB (800 Ah), mientras que de abril a septiembre el banco no se recargó en su totalidad al final del día. La corriente de descarga máxima (80 A) se excedió entre mayo y agosto, implicando una reducción de la vida útil de las baterías. En consecuencia, las producciones estimadas de agua potable con una configuración estándar variaron entre 1200 L en junio y 4000 L en enero. (Véase valores asociados al eje vertical positivo en figuras del APÉNDICE B).

### **5.2. Resultados de estimación ajustada.**

Al ajustar el margen de operación usado previamente en la estimación estándar, aproximándose lo más posible a los criterios límites de operación del BB, se observaron los siguientes resultados.

En ningún mes se excedió la DOD. Desde septiembre hasta abril se logró una recuperación total del BB (800 Ah). La corriente de descarga máxima se excedió solo en el mes de diciembre, insignificadamente. Los valores que se obtuvieron con una configuración ajustada oscilaron entre 600 L en julio hasta

4200 L en enero, visualizados en la Figura 21 y su configuración detallada en los valores asociados al eje vertical negativo de las figuras del APÉNDICE B.

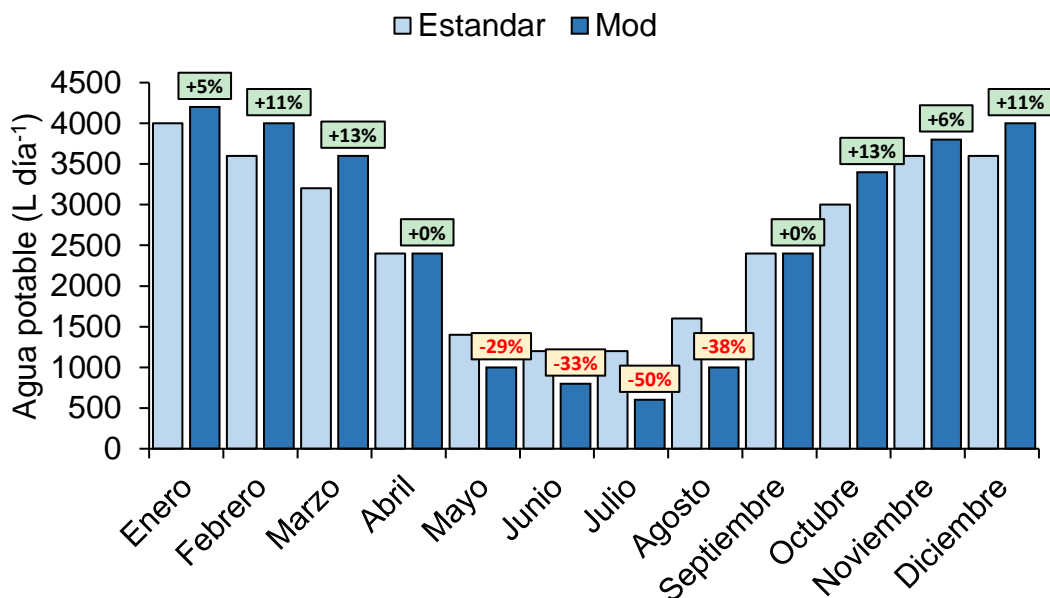


Figura 21. Estimación estándar y ajustada de agua potable producida diaria entre enero y diciembre con el porcentaje de variación de producción (Fuente: Elaboración propia).

Se observó que la producción se redujo entre mayo y agosto cuando se usó una configuración ajustada, por lo que se decidió mantener la configuración estándar en dichos meses.

### 5.3. Análisis de producción estándar y ajustada.

- Se observó un patrón repetitivo de 20 minutos todos los meses. En este patrón, se activaba un escenario solución de 10 minutos, preparando así el sistema para operar el escenario objetivo en los siguientes 10 minutos, A este

patrón se le denominó “ciclo de producción” (Figura 22 letra b) cada uno de los cuales produce 200 L de agua potable.

- Se identificó un patrón inicial en el que se necesitaban 80 minutos para alcanzar el volumen requerido para la operación de E3, seguido inmediatamente por la operación del escenario objetivo E3 (Figura 22 letra a).

A este patrón inicial se le dio el nombre de “ciclo de preparación” de la planta.

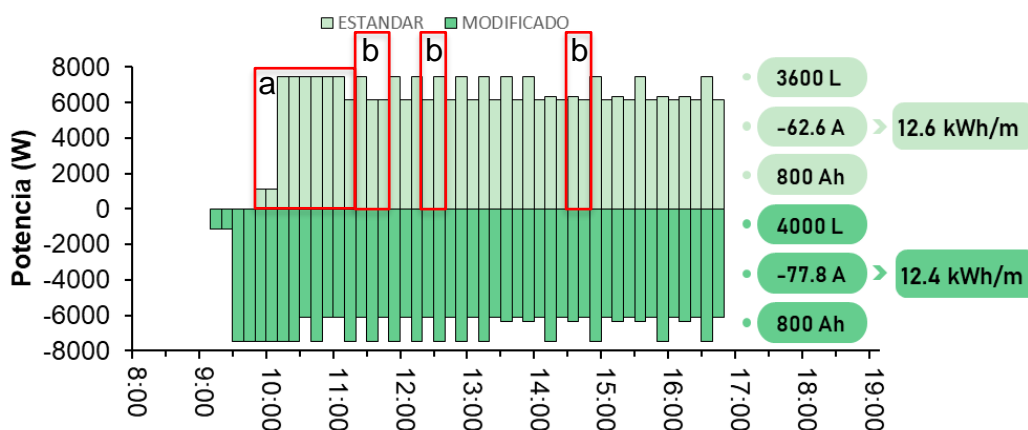


Figura 22. Visualización de patrones en la operación. a) Ciclo de preparación. b) Ciclo de producción (Fuente: Elaboración propia).

- Se presentaron las condiciones ideales de funcionamiento de la planta en los meses de alta disponibilidad energética (septiembre – abril), permitiendo maximizar la producción con los ajustes realizados en la mayoría de ellos (octubre – marzo).
- Asumiendo una población de 200 personas y un volumen de agua disponible entregada por los camiones aljibe a la población de Rumena de 50 litros por persona al día, se adicionaría con la producción de agua potable de

la planta modular estudiada un volumen estimado de 12 – 21 L por persona al día (entre septiembre y abril, respectivamente), resultando en un total de 62 – 71 L por persona al día.

- En los meses de marzo y octubre, a pesar de suministrar la misma potencia máxima, marzo tiene una capacidad de producción de agua potable mayor, notándose una diferencia significativa del parámetro “a” de la función fotovoltaica, concluyendo que entre mayor sea el parámetro “a” indicará una concavidad más abierta, y por lo tanto capacidad más alta de producción de agua.
- Basándose en los patrones observados donde se necesita 20 minutos para tener un ciclo completo de operación, para alcanzar la demanda de agua de la población de Rumena ( $20\ 000\ \text{L}\ \text{día}^{-1}$ ) se requerirían 33 h y 20 min de operación continua en promedio en un día. Por lo tanto, si se quisiera cubrir este volumen diario con la implementación de este sistema de desalinización fotovoltaico off grid autónomo, se deberían considerar a los menos cuatro de estas plantas para conseguir este volumen sin tener que recurrir a una fuente de energía complementaria.

**Subpunto de resultados y discusión: Consideraciones**

- Según el modelo aplicado, es esencial tener en cuenta que los resultados se derivan de un día promedio, lo que sugiere la posibilidad de variaciones en los parámetros de operación del sistema de baterías (BB) en condiciones reales (parámetros de la Figura 18). En situaciones desfavorables de radiación (Mayo a agosto), la corriente de operación puede exceder significativamente la máxima establecida durante un alto porcentaje de horas del día, lo cual conllevaría un riesgo de sobrecarga de las baterías y, en consecuencia, una reducción en su vida útil. Basándonos en esta información, y considerando que la población de la localidad de Rumena no requiere una solución durante este período debido a la alta disponibilidad de agua, se desaconseja la operación del sistema durante los meses en los que se exceden los criterios límites, es decir, entre mayo y agosto.
- Con las condiciones promedio de radiación en la localidad de Rumena se logró hacer un plan modelo en el cual abastece de agua potable entre 2400 y 4200 litros diarios en el periodo de necesidad hídrica (sequía en verano) lo que representa entre un 12 y 21% respecto al volumen recomendado.
- Al sumar el volumen producido por la planta estudiada en conjunto con el volumen proporcionado a la comunidad por los camiones aljibe, el agua potable disponible se aproxima a la cantidad recomendada por la OMS de 100 L día-1 por persona (equivalente a 20 000 L para una población de 200

personas) alcanzando en total entre un 62 y un 71% del requerimiento, revelando aún un déficit de disponibilidad de agua para dicha población.

- Se comprobó que en los meses de alta disponibilidad energética un ajuste de marco de operación permitió maximizar la producción de agua potable entre un 5 y un 13%. En cambio, para los meses de disponibilidad solar crítica no solo no se justifican los ajustes (ya que genera una disminución de producción), sino que no se recomienda una operación debido a que el sistema de BB opera excediendo los límites críticos, y a que la localidad no presenta un déficit de abastecimiento dichos meses.
- En el presente modelo se comenzó la operación con los estanques vacíos, lo que implicó una fase de estabilización inicial de 80 min. Si la operación de la planta comenzara con los estanques con el volumen mínimo de operación, se añadirían 80 min de funcionamiento donde podrían llevarse a cabo cuatro ciclos completos o incompletos, equivalentes a 800 - 600 L adicionales por día, respectivamente.
- Se mencionó previamente que se requerirían al menos cuatro plantas idénticas para cubrir la demanda de agua de la población total. Esto implicaría una descarga de efluentes de la planta de aproximadamente 4 veces el agua producida (80 000 L de agua con alta salinidad) al mar, por lo que se aconsejaría un estudio y gestión adecuados para evitar un potencial efecto en

los ecosistemas marinos, los que a su vez representan los recursos base del desarrollo de la localidad de Rumena.

#### **5.4. Problemas detectados en la planta.**

- Con fines de mejor monitoreo y estudio de planta, se recomienda adicionar un rotámetro para ET0 ( $P_{ET0}$ ) y en el rechazo de ET1 ( $R_{ET1}$ ).
- Para la selección de escenarios se detectó que la operación del escenario 3 constantemente disminuía el EAI, debido a que la producción de la ET1 era menor a la alimentación de la ET2, generando una necesidad de detenerse a recargar dicho estanque mediante la operación de escenarios con alta demanda de energía. Esto sugiere estudiar una operación en la que estos valores sean similares ( $P_{ET1}$  y  $A_{ET2}$ ), lo que permitiría un funcionamiento más continuo.

## 6. CONCLUSIONES

- La demanda energética de los cinco escenarios posibles que operaron en la planta fue 1,1 kW, 5,0 kW, 6,1 kW, 6,3 kW y 7,5 kW. Por otra parte, la energía disponible en Caleta Rumena osciló entre 3,2 kW y 7,4 kW peak diario desde junio a enero, respectivamente.
- Según lo observado en las configuraciones de funcionamiento estándar y ajustada, se considera recomendable operar desde septiembre a abril entre 6 y 8 horas al día bajo la configuración ajustada ya que maximiza la producción de agua (entre 5% y 13%) y a la vez respeta los criterios para prolongar la vida útil del banco de baterías. Además, la localidad no presenta un déficit de abastecimiento en los meses no mencionados.
- Estas configuraciones permitieron abastecer entre 2400 y 4200 litros diarios de agua potable en el periodo de necesidad hídrica (sequía en verano) lo que representa entre un 12% y 21% respecto al volumen recomendado.

## 7. LITERATURA CITADA

- Arreguín F. & Domínguez A. (2000). Desalinización del agua.
- Contreras J. & Baeza A., (2022). Diario el Resumen: Camiones aljibe no dan abasto: Comunidad de Llico sufre por falta de agua.
- Dupouy, F. (2021). Metodologías para la evaluación, caracterización y reutilización de baterías de litio en formato 18650 para aplicaciones de segunda vida.
- Elboshy B., Alwetaishi M., Aly R., & Zalhaf, A. S. (2022). A suitability mapping for the PV solar farms in Egypt based on GIS-AHP to optimize multi-criteria feasibility. *Ain Shams Engineering Journal*, 13(3), 101618.
- Gallardo, C. (2021). Incidencia de las consultas por diagnóstico de diarrea producto de la emergencia sanitaria por contaminación de agua potable en el mes de julio de 2019, en la ciudad de Osorno, Región de Los Lagos, Chile. Tesis de Magíster. Universidad de Oviedo, España.  
<https://digibuo.uniovi.es/dspace/bitstream/handle/10651/68328/TFM%20Carlos%20Gallardo%20Vargas.pdf?sequence=1>
- Gorjian, S., Ghobadian, B., Ebadi, H., Ketabchi, F., & Khanmohammadi, S. (2020, January 1). Chapter 8 - Applications of solar PV systems in desalination technologies (S. Gorjian & A. Shukla, Eds.). ScienceDirect; Academic Press.  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780128196106000089>
- Ibrahim K., Hassan A., AbdElrazek A., & Saleh, S. M. (2023). Economic analysis of stand-alone PV-battery system based on new power assessment configuration in Siwa Oasis–Egypt. *Alexandria Engineering Journal*, 62, 181-191.
- Mohor, S. (2013). INFORME: Arauco, las caletas y su gente. “Proyecto de apoyo al desarrollo socio-económico y organizacional de la pesquería artesanal” en la comuna de Arauco. (GCP/RLA/160/BR)  
[https://www.subpesca.cl/portal/618/articles-82430\\_recurso\\_1.pdf](https://www.subpesca.cl/portal/618/articles-82430_recurso_1.pdf)
- Neira, G. (2016). Alternativas de funcionamiento en planta de nanofiltración de aguas salobres. Informe de Memoria de Título, Ingeniero Civil

Químico. Facultad de Ingeniería, Universidad de Concepción. Concepción, Chile.

- Parra, A. (2023). La problemática jurídica y humana en la distribución de agua potable por aljibes. *EcoReflexiones*, III (1) <https://dacc.udec.cl/la-problematica-juridica-y-humana-en-la-distribucion-de-agua-potable-por-aljibes-parra-2023/>
- Renova Energía. (s.f.). Yingde Aokly Power Co., LTD 6GFM200G (12V/200Ah). <https://www.renova-energia.com/wp-content/uploads/2020/04/BT134.pdf>
- Riveros D. (2021). Evaluación de sistemas multiusuarios de desalinización e impulsión de agua en minería y propuestas de políticas públicas para su implementación.
- Stehr A, Álvarez C, Álvarez P, Arumí J y Baeza C. (2019). Recursos hídricos en Chile: Impactos y adaptación al cambio climático. Informe de la mesa Agua. Santiago: Comité Científico COP25; Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación.
- Superintendencia de Servicios Sanitarios. (2019). Informe de coberturas sanitarias 2019. [https://www.siss.gob.cl/586/articles-17972\\_recurso\\_1.pdf](https://www.siss.gob.cl/586/articles-17972_recurso_1.pdf)
- OMS. 2023. Agua para consumo humano. Disponible en: <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/drinking-water>
- Vivanco, E. (2016). Funcionamiento e Impacto Ambiental del Proceso de Desalinización de Agua de Mar. <https://obtienearchivo.bcn.cl/obtienearchivo?id=repositorio/10221/22399/3/Funcionamiento%20e%20Impacto%20Ambiental%20del%20Proceso%20de%20Desalinizaci%C3%B3n%20de%20Agua%20de%20Mar%20%20%202016.pdf>
- World Health Organization: WHO. (2019, June 14). Agua. Who.int; World Health Organization: WHO. <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/drinking-water>
- Yadav, D., Karki, S., & Ingole, P. G. (2022). Current advances and opportunities in the development of nanofiltration (NF) membranes in the area of wastewater treatment, water desalination, biotechnological and pharmaceutical applications. *Journal of Environmental Chemical*

Engineering, 10(4),  
<https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.108109>

108109.

## 8. ANEXOS Y APENDICES

### ANEXO A

|    | A                 | B             | C    | D    | E    | F    | G    | H    | I    | J    | K    | L    | M     | N     | O     | P     | Q     | R     | S     | T     | U     | V     | W     | X     | Y     | Z     |
|----|-------------------|---------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 2  | kWh               |               |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| 3  |                   |               |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| 4  |                   | 00:00 a 23:00 | 0:00 | 1:00 | 2:00 | 3:00 | 4:00 | 5:00 | 6:00 | 7:00 | 8:00 | 9:00 | 10:00 | 11:00 | 12:00 | 13:00 | 14:00 | 15:00 | 16:00 | 17:00 | 18:00 | 19:00 | 20:00 | 21:00 | 22:00 | 23:00 |
| 5  | Enero a Diciembre | 1.6           | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.1  | 0.4  | 2.2  | 3.5   | 4.5   | 5.2   | 5.6   | 5.3   | 4.9   | 3.7   | 2.2   | 0.7   | 0.1   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   |
| 6  | Enero             | 2.2           | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.1  | 0.4  | 3.0  | 4.7   | 6.0   | 7.0   | 7.4   | 7.2   | 6.4   | 5.0   | 3.2   | 1.5   | 0.2   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   |
| 7  | Febrero           | 2.1           | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.1  | 0.2  | 2.8  | 4.4   | 5.9   | 6.6   | 7.5   | 7.1   | 6.3   | 5.0   | 3.3   | 1.5   | 0.1   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   |
| 8  | Marzo             | 2.0           | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.2  | 2.7  | 4.1   | 5.5   | 6.2   | 6.7   | 6.5   | 6.0   | 4.8   | 3.2   | 1.1   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   |
| 9  | Abril             | 1.5           | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.1  | 2.1  | 3.5   | 4.5   | 4.8   | 5.1   | 4.8   | 4.8   | 3.5   | 1.8   | 0.5   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   |
| 10 | Mayo              | 1.0           | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 1.4  | 2.5   | 3.0   | 3.5   | 3.6   | 3.6   | 3.3   | 2.4   | 1.4   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   |
| 11 | Junio             | 0.8           | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 1.0  | 1.5   | 2.2   | 3.0   | 3.0   | 2.9   | 3.0   | 2.1   | 1.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   |
| 12 | Julio             | 0.9           | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 1.0  | 2.0   | 2.9   | 3.2   | 3.2   | 3.1   | 2.6   | 1.9   | 1.7   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   |
| 13 | Agosto            | 1.0           | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 1.1  | 2.2   | 2.9   | 3.4   | 4.0   | 3.9   | 3.7   | 2.4   | 1.4   | 0.3   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   |
| 14 | Septiembre        | 1.5           | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.2  | 2.2  | 3.3   | 4.2   | 4.6   | 5.3   | 5.2   | 5.2   | 3.8   | 2.1   | 0.6   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   |
| 15 | Octubre           | 1.9           | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.1  | 1.0  | 2.8  | 4.4   | 5.9   | 6.8   | 6.8   | 6.0   | 5.1   | 3.8   | 2.2   | 0.7   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   |
| 16 | Noviembre         | 2.1           | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.2  | 1.9  | 3.5  | 4.9   | 5.8   | 6.6   | 7.1   | 6.6   | 5.8   | 4.3   | 2.5   | 0.8   | 0.1   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   |
| 17 | Diciembre         | 2.1           | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.2  | 1.5  | 3.2  | 4.6   | 5.6   | 6.5   | 7.1   | 7.1   | 6.2   | 4.7   | 2.8   | 1.1   | 0.2   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   |
| 18 |                   |               |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |

Figura A 1. Resumen de ciclos de generación de potencia fotovoltaica diaria-mensual.

## APÉNDICE A

## Flujos de planta

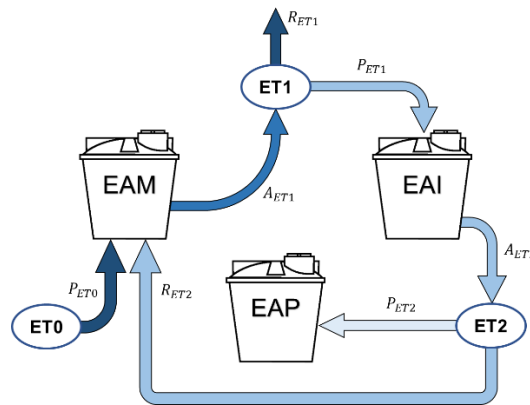


Figura A 2. Esquema de flujos de agua en las distintas etapas y estanques.

Se refirió a “A” como alimentación, a “P” como permeado y a “R” como rechazo, en las distintas etapas mencionadas en los subíndices (ET0, ET1 y ET2).

Balance de materia:

Balance en ET1:

$$A_{ET1} = P_{ET1} + R_{ET1} \quad [8]$$

Balance en ET2:

$$A_{ET2} = P_{ET2} + R_{ET2} \quad [9]$$

Flujo de EAM:

$$Q_{EAM} = P_{ET0} + R_{ET2} - A_{ET1} \quad [10]$$

$$Q_{EAM} = P_{ET0} + R_{ET2} - (P_{ET1} + R_{ET1}) \quad [10.1]$$

Flujo de EAI:

$$Q_{EAI} = P_{ET1} - A_{ET2} \quad [11]$$

$$Q_{EAI} = P_{ET1} - (P_{ET2} + R_{ET2}) \quad [11.1]$$

Flujo de EAP:

$$Q_{EAP} = P_{ET2} \quad [12]$$

Flujo al mar:

$$Q_{MAR} = R_{ET1} \quad [13]$$

## APÉNDICE B

Configuraciones de funcionamiento desde enero a diciembre, representándose en el eje vertical positivo el resultado de la función de operación estándar (Demanda de potencia de cada escenario seleccionado cada  $\Delta t$ ), y en el eje vertical negativo la función de operación ajustada (valor negativo de demanda de potencia de cada escenario seleccionado cada  $\Delta t$ ). Cada una exponiendo al costado derecho cuatro criterios de comparación; Volumen EAP al final del día, tasa de descarga de corriente máxima  $I_{max}$ , capacidad del BB al final del día  $C_{fin}$  y consumo de energía específico  $E$ .

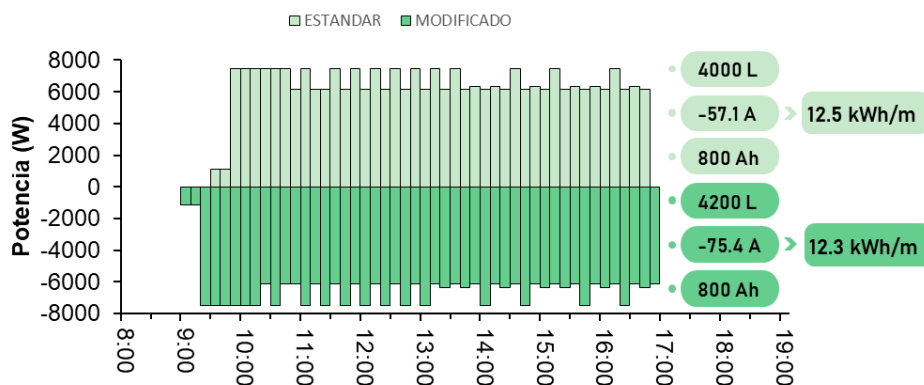


Figura B 1. Configuración de operación bajo modelo estándar, ajustado y sus criterios de comparación para el mes de enero.

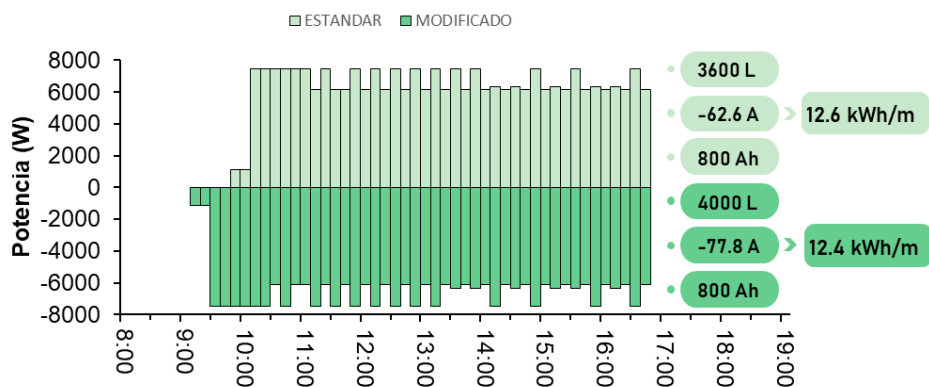


Figura B 2. Configuración de operación bajo modelo estándar, ajustado y sus criterios de comparación para el mes de febrero.

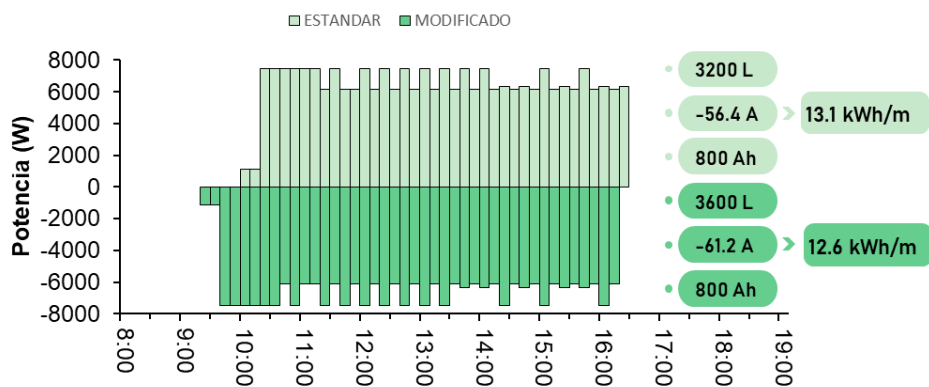


Figura B 3. Configuración de operación bajo modelo estándar, ajustado y sus criterios de comparación para el mes de marzo.

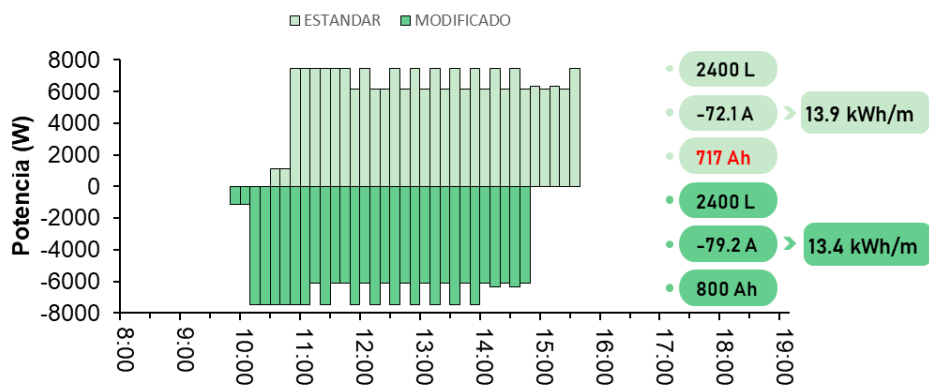


Figura B 4. Configuración de operación bajo modelo estándar, ajustado y sus criterios de comparación para el mes de abril.

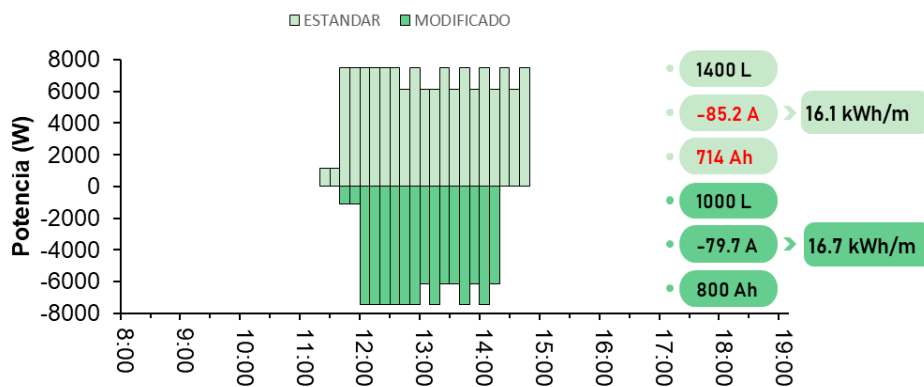


Figura B 5. Configuración de operación bajo modelo estándar, ajustado y sus criterios de comparación para el mes de mayo.

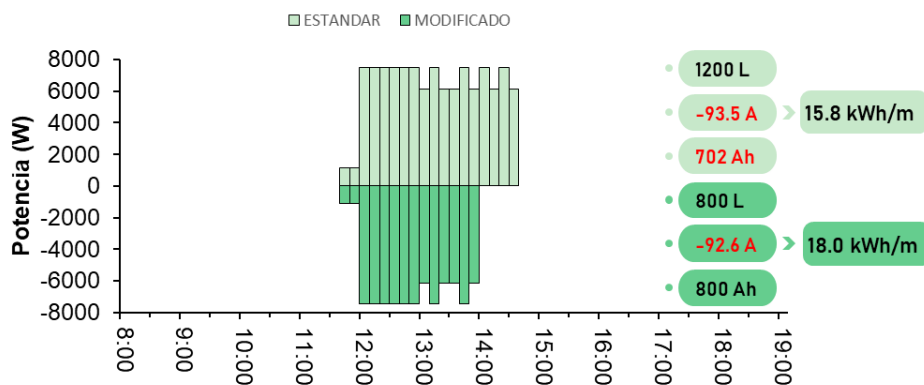


Figura B 6. Configuración de operación bajo modelo estándar, ajustado y sus criterios de comparación para el mes de junio.

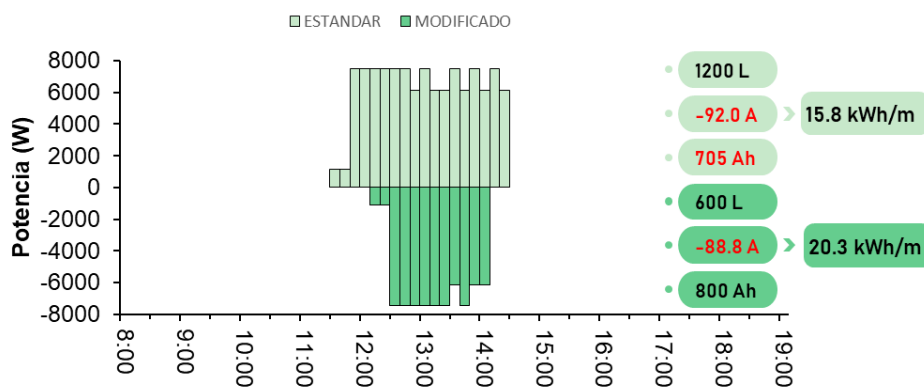


Figura B 7. Configuración de operación bajo modelo estándar, ajustado y sus criterios de comparación para el mes de julio.

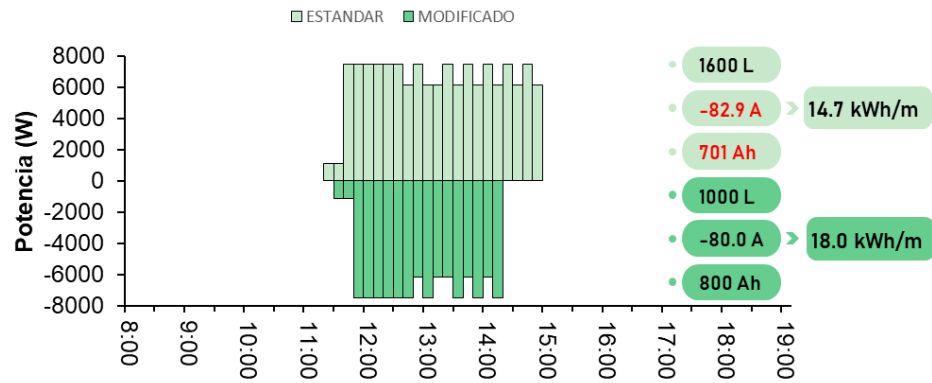


Figura B 8. Configuración de operación bajo modelo estándar, ajustado y sus criterios de comparación para el mes de agosto.

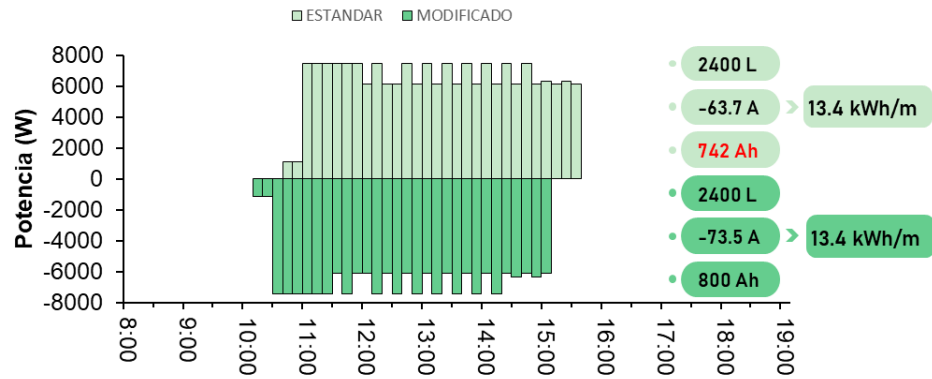


Figura B 9. Configuración de operación bajo modelo estándar, ajustado y sus criterios de comparación para el mes de septiembre.

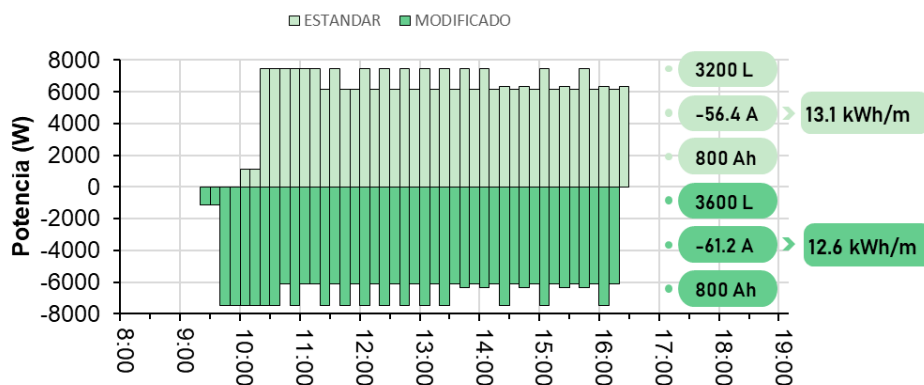


Figura B 10. Configuración de operación bajo modelo estándar, ajustado y sus criterios de comparación para el mes de octubre.

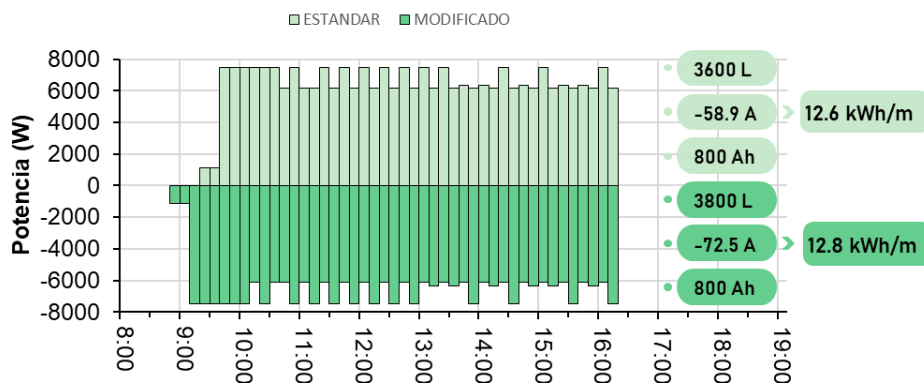


Figura B 11. Configuración de operación bajo modelo estándar, ajustado y sus criterios de comparación para el mes de noviembre.

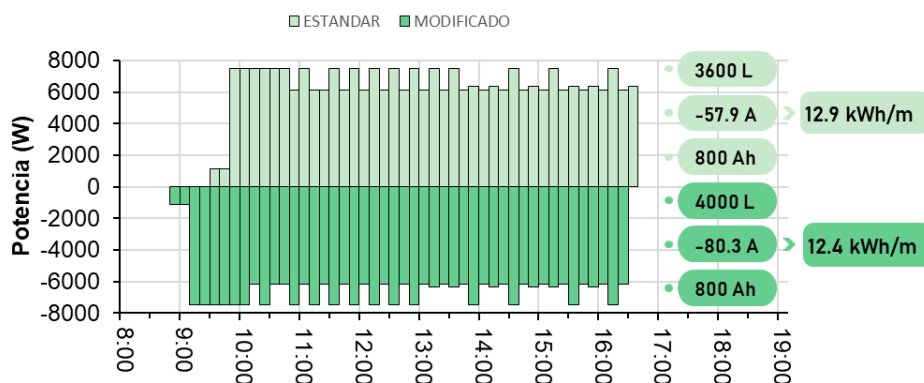


Figura B 12. Configuración de operación bajo modelo estándar, ajustado y sus criterios de comparación para el mes de diciembre.