



COMILLAS
UNIVERSIDAD PONTIFICIA

ICAI

MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA
INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE MÁSTER

**DESPACHO ECONÓMICO DE SISTEMAS
ELÉCTRICOS INSULARES INCLUYENDO
PLANTAS DESALADORAS**

Autor: José Luis González Pizarro

Director: Lukas Sigrist

Madrid

Junio de 2019

AUTORIZACIÓN PARA LA DIGITALIZACIÓN, DEPÓSITO Y DIVULGACIÓN EN RED DE PROYECTOS FIN DE GRADO, FIN DE MÁSTER, TESINAS O MEMORIAS DE BACHILLERATO

1º. Declaración de la autoría y acreditación de la misma.

El autor D. **José Luis González Pizarro** DECLARA ser el titular de los derechos de propiedad intelectual de la obra: *Despacho económico de sistemas eléctricos insulares incluyendo plantas desaladoras*, que ésta es una obra original, y que ostenta la condición de autor en el sentido que otorga la Ley de Propiedad Intelectual.

2º. Objeto y fines de la cesión.

Con el fin de dar la máxima difusión a la obra citada a través del Repositorio institucional de la Universidad, el autor **CEDE** a la Universidad Pontificia Comillas, de forma gratuita y no exclusiva, por el máximo plazo legal y con ámbito universal, los derechos de digitalización, de archivo, de reproducción, de distribución y de comunicación pública, incluido el derecho de puesta a disposición electrónica, tal y como se describen en la Ley de Propiedad Intelectual. El derecho de transformación se cede a los únicos efectos de lo dispuesto en la letra a) del apartado siguiente.

3º. Condiciones de la cesión y acceso

Sin perjuicio de la titularidad de la obra, que sigue correspondiendo a su autor, la cesión de derechos contemplada en esta licencia habilita para:

- a) Transformarla con el fin de adaptarla a cualquier tecnología que permita incorporarla a internet y hacerla accesible; incorporar metadatos para realizar el registro de la obra e incorporar “marcas de agua” o cualquier otro sistema de seguridad o de protección.
- b) Reproducirla en un soporte digital para su incorporación a una base de datos electrónica, incluyendo el derecho de reproducir y almacenar la obra en servidores, a los efectos de garantizar su seguridad, conservación y preservar el formato.
- c) Comunicarla, por defecto, a través de un archivo institucional abierto, accesible de modo libre y gratuito a través de internet.
- d) Cualquier otra forma de acceso (restringido, embargado, cerrado) deberá solicitarse expresamente y obedecer a causas justificadas.
- e) Asignar por defecto a estos trabajos una licencia Creative Commons.
- f) Asignar por defecto a estos trabajos un HANDLE (URL *persistente*).

4º. Derechos del autor.

El autor, en tanto que titular de una obra tiene derecho a:

- a) Que la Universidad identifique claramente su nombre como autor de la misma
- b) Comunicar y dar publicidad a la obra en la versión que ceda y en otras posteriores a través de cualquier medio.
- c) Solicitar la retirada de la obra del repositorio por causa justificada.
- d) Recibir notificación fehaciente de cualquier reclamación que puedan formular terceras personas en relación con la obra y, en particular, de reclamaciones relativas a los derechos de propiedad intelectual sobre ella.

5º. Deberes del autor.

El autor se compromete a:

- a) Garantizar que el compromiso que adquiere mediante el presente escrito no infringe ningún derecho de terceros, ya sean de propiedad industrial, intelectual o cualquier otro.
- b) Garantizar que el contenido de las obras no atenta contra los derechos al honor, a la intimidad y a la imagen de terceros.
- c) Asumir toda reclamación o responsabilidad, incluyendo las indemnizaciones por daños, que pudieran ejercitarse contra la Universidad por terceros que vieran infringidos sus derechos e intereses a causa de la cesión.

- d) Asumir la responsabilidad en el caso de que las instituciones fueran condenadas por infracción de derechos derivada de las obras objeto de la cesión.

6º. Fines y funcionamiento del Repositorio Institucional.

La obra se pondrá a disposición de los usuarios para que hagan de ella un uso justo y respetuoso con los derechos del autor, según lo permitido por la legislación aplicable, y con fines de estudio, investigación, o cualquier otro fin lícito. Con dicha finalidad, la Universidad asume los siguientes deberes y se reserva las siguientes facultades:

- La Universidad informará a los usuarios del archivo sobre los usos permitidos, y no garantiza ni asume responsabilidad alguna por otras formas en que los usuarios hagan un uso posterior de las obras no conforme con la legislación vigente. El uso posterior, más allá de la copia privada, requerirá que se cite la fuente y se reconozca la autoría, que no se obtenga beneficio comercial, y que no se realicen obras derivadas.
- La Universidad no revisará el contenido de las obras, que en todo caso permanecerá bajo la responsabilidad exclusiva del autor y no estará obligada a ejercitar acciones legales en nombre del autor en el supuesto de infracciones a derechos de propiedad intelectual derivados del depósito y archivo de las obras. El autor renuncia a cualquier reclamación frente a la Universidad por las formas no ajustadas a la legislación vigente en que los usuarios hagan uso de las obras.
- La Universidad adoptará las medidas necesarias para la preservación de la obra en un futuro.
- La Universidad se reserva la facultad de retirar la obra, previa notificación al autor, en supuestos suficientemente justificados, o en caso de reclamaciones de terceros.

Madrid, a 20 de Junio de 2019

ACEPTA

Fdo:

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'J. García', is written over a horizontal line.

Motivos para solicitar el acceso restringido, cerrado o embargado del trabajo en el Repositorio Institucional:

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título
***Despacho económico de sistemas eléctricos insulares incluyendo plantas
desaladoras***

en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el
curso académico **2018/2019** es de mi autoría, original e inédito y
no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos. El Proyecto no es plagio de otro,
ni total ni parcialmente y la información que ha sido tomada
de otros documentos está debidamente referenciada.

Fdo.: José Luis González Pizarro Fecha: 20/06/2019



Autorizada la entrega del proyecto
EL DIRECTOR DEL PROYECTO



Fdo.: Lukas Sigrist Fecha: 20/06/2019



COMILLAS

UNIVERSIDAD PONTIFICIA

ICAI

MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA
INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE MÁSTER

**DESPACHO ECONÓMICO DE SISTEMAS
ELÉCTRICOS INSULARES INCLUYENDO
PLANTAS DESALADORAS**

Autor: José Luis González Pizarro

Director: Lukas Sigrist

Madrid

Junio de 2019

DESPACHO ECONÓMICO DE SISTEMAS ELÉCTRICOS INSULARES INCLUYENDO PLANTAS DESALADORAS.

Autor: González Pizarro, José Luis.

Director: Sigrist, Lukas.

Entidad Colaboradora: ICAI- Universidad Pontificia Comillas.

RESUMEN DE PROYECTO

1. Introducción

Es una realidad que existe una relación directa entre la energía y el agua: la producción y el disfrute de una de ellas depende de la otra. La producción y el disfrute de la electricidad necesita de agua (obtención del combustible, vapor de agua para las turbinas, refrigeración, etc.) y, de manera inversa, la obtención de agua potable, el tratamiento de aguas residuales o la distribución de agua requiere de energía. Esta relación se conoce como el nexo agua- energía.

Habitualmente, los sistemas de agua y energía han sido estudiados y operados de manera independiente [3]. Sin embargo, es trivial ver la relación que hay entre ambas.

En el caso de sistemas donde los recursos hídricos no son suficientes para satisfacer la demanda de agua de la población, un elemento que toma un papel importante a la hora de poder integrar estos dos sistemas son las plantas de desalación, que producen agua dulce a partir de agua salada consumiendo energía.

En [2], se les confiere una importancia a las desaladoras en el nexo agua-energía debido a que, en geografías secas como Arabia Saudí, el consumo energético de la obtención y desalación de agua representa un 9% de la demanda eléctrica total. Y en otras ciudades del Golfo Árabe pueden consumir hasta el 12% únicamente para la desalación.

1.1.Estado del arte

Aunque ha habido grandes avances en las investigaciones y modelados del nexo agua-energía, no se le ha dado mucha atención a la flexibilidad energética que las instalaciones de tratamiento de agua pueden introducir en la operación del sistema eléctrico [3].

Principalmente, el nexo agua-energía se ha estudiado con respecto a los retos políticos y regulatorios y su interacción con el cambio climático, el aprovisionamiento de alimentos, etc. [7],[8].

Desde un punto de vista de modelado este nexo ha sido estudiado desde diferentes perspectivas. En [9] se estudió en términos de instalaciones de co-producción reduciendo a su vez los costes de la generación eléctrica y del agua. Otro estudio [10] ha estudiado el impacto de instalaciones de almacenamiento de agua en despachos económicos óptimos utilizando como elemento de integración entre el agua-energía, plantas de coproducción. En este último estudio se introduce un co-despacho económico.

En [11] se introdujeron las capacidades de las líneas de un hipotético sistema eléctrico y las restricciones de las tuberías de un teórico sistema de distribución de agua (WDS).

La mayoría de los modelos de despacho en la literatura tratan el nexo agua-energía en el lado del suministro como un solo nodo descuidando la red de transmisión o distribución de energía y agua que alimentan[3].

1.2. Objeto del proyecto.

En sistemas insulares aislados con recursos hídricos escasos, como el caso del archipiélago canario, la operación de las plantas de desalación representa un porcentaje no despreciable de la demanda eléctrica neta.

La falta de recursos hídricos unida a la sobreexplotación de acuíferos y la llegada masiva de turistas ha provocado una proliferación del número de plantas desaladoras, tanto públicas como privadas, en los últimos treinta años [24].

Así, se pretende modelar el consumo energético de las plantas de desalación para poder incluirlo en el despacho económico canario y ver cómo afecta a este sistema eléctrico. Además, se evaluará si con esta técnica se puede alcanzar una flexibilidad en la gestión del agua para poder reducir los costes de la operación del sistema energético.

Teniendo todo lo anterior en cuenta se propone estudiar este nexo agua-energía y elaborar un modelo de despacho económico óptimo que integre energías renovables y desaladoras que aporten flexibilidad al sistema energético, además de satisfacer la demanda de agua. De esta forma, aparte de encontrar una manera óptima de operar, se reducirá la dependencia de los combustibles fósiles y disminuirán las emisiones. Los objetivos son:

- Modelar el consumo eléctrico de la desaladora. Con este modelado conseguiremos saber la cantidad de energía necesaria para poder suministrar cierta cantidad de caudal de agua dulce.
- Modelar la demanda de agua. Gracias este modelado se podrá conocer el caudal que la desaladora debe aportar al sistema de agua.
- Realizar un modelo de Despacho económico que integre el sistema eléctrico y de agua canario, añadiendo los modelos mencionados anteriormente.
- Evaluar el potencial de las desaladoras de proporcionar flexibilidad. Comparar con modelos más simple de flexibilidad de consumo (respuesta de demanda).

2. Metodología.

En primer lugar, se hará un estudio previo sobre la situación actual del archipiélago canario: grupos generadores de las islas y sus características, presencia de generación renovable, demanda de agua de las diferentes islas, número de desaladoras, consumo eléctrico de éstas, etc.

Además, se revisará el estado del arte de estudios realizados hasta la fecha de cómo se ha integrado el nexo agua-energía, cómo se ha modelado el consumo energético de las plantas de desalación, etc.

Tras esto, se hará un análisis exhaustivo del funcionamiento de las plantas desaladoras con el objetivo de conocer qué elementos son los que consumen energía. Así, se construirá un modelo de consumo energético sólido que represente la realidad de operación de estas plantas.

Con toda la información recogida en las fases anteriores, se construirá un modelo para poder solucionar problemas de unit commitment con la herramienta MATLAB en el que se incluye la demanda eléctrica, la demanda de agua, las características de los grupos generadores, los parámetros de las plantas de desalación, presencia de energías renovables, etc.

Una vez construido el modelo se realizarán diferentes casos de estudio para conocer la respuesta del sistema ante la introducción del consumo energético de las plantas desaladoras y sus correspondientes mejoras/empeoramiento de la solución.

Con el fin de conocer de manera precisa cómo reacciona el sistema ante la introducción del modelo del consumo eléctrico de plantas de desalación, primero se va a realizar una comparación con un sistema que introduzca a las plantas de desalación con una gestión de la demanda simple.

Seguidamente, se realizará un análisis de sensibilidad para ver cómo afectan los parámetros de la planta desaladora a la respuesta del sistema. Y, por último, se realizará el problema de unit commitment real de la isla de La Palma para ver los aportes del modelo a la flexibilidad y costes de operación de la isla.

3. Resultados.

3.1. Modelado de la planta desaladora

El modelado del consumo energético de una planta desaladora sigue una función lineal que tiene la forma: $P_W^{OI} = k_1 + k_2 q_P^{OI}$. Donde P_W^{OI} es el consumo energético de la planta (kW) y q_P^{OI} el caudal permeado (m^3).

Este modelado se ha introducido en el problema de unit commitment de diferentes sistemas eléctricos.

3.2.Caso de estudio básico y análisis de sensibilidad.

En el caso de estudio básico con la introducción del modelo de consumo energético de la planta de desalación, la respuesta del sistema se basa en producir agua en las horas de menor demanda eléctrica y de demanda eléctrica intermedia para vaciar el embalse de agua en las horas de punta.

En el momento en el que se modifica el consumo de la planta desaladora (modificación de los parámetros k_1 y k_2), se modifica la demanda eléctrica neta de manera directa y, dependiendo de si la modificación de los parámetros incrementa o disminuye la demanda eléctrica neta, la respuesta del sistema es diferente:

- Aumentando k_1/k_2 . El sistema reacciona de manera similar al caso de estudio básico: produce agua en horas de demanda eléctrica baja e intermedia para poder descargar el embalse y no producir agua en horas de demanda alta. La reducción del coste de operación del sistema proviene de las horas en las que la desaladora no está en funcionamiento.
- Reduciendo k_1/k_2 . En esta situación, al reducirse la demanda eléctrica neta, el sistema cambia de estrategia y opta por desacoplar grupos durante las horas de demanda baja e intermedia y producir agua en las horas de demanda alta.

En cuanto a la modificación de los parámetros que influyen a la demanda eléctrica neta de manera indirecta (nivel máximo del embalse y caudal máximo permeado), la respuesta del sistema:

- Aumentando N_{max} . El comportamiento es muy similar al estudio del caso básico, pero el aumento de la capacidad del embalse permite que la desaladora esté más horas sin producir agua en las horas de mayor demanda eléctrica, reduciendo los costes.
- Reduciendo N_{min} . En este caso el sistema no tiene tanta flexibilidad como en casos anteriores para distribuir la producción de agua debido a que la restricción del embalse toma mayor peso. Así, el coste del sistema aumenta.
- Aumentando Q_{max} . Al aumentar la capacidad de producción del agua, el sistema puede evitar producir agua en los momentos de demanda eléctrica baja y desacoplar grupos porque, el agua necesaria para alcanzar la demanda de agua en las horas de demanda eléctrica más alta se puede concentrar en las horas de demanda eléctrica intermedia. Así, el coste de operación del sistema se reduce.

- Reduciendo Q_{min} . Al igual que al reducir N_{min} , el sistema no tiene flexibilidad alguna para distribuir la producción de agua y en todas las horas se produce el mismo caudal de agua. Así, los costes se incrementan, incluso volviéndose más caro que en el caso de estudio con gestión de demanda simple, ya que en este caso sí que se tiene algo más de flexibilidad en la operación del sistema.

En la Figura 1 se recogen los resultados de todos los casos de estudio simulados con sus respectivos costes y el porcentaje de mejora respecto al caso de estudio básico donde se introduce en la operación de la planta desaladora en el problema de unit commitment.

	Costes (€)	Mejora (%)
Gestión demanda simple	18.511,73 €	-5,15%
Modelos consumo de la desaladora	17.605,11 €	-
Cambio del perfil de demanda de agua	17.182,34 €	2,40%
K1 (doble)	23.994,05 €	-36,29%
K1 (mitad)	16.054,05 €	8,81%
K2 (doble)	19.504,08 €	-10,79%
K2 (mitad)	17.150,12 €	2,58%
Nmax (doble)	17.501,22 €	0,59%
Nmax (mitad)	18.224,70 €	-3,52%
Qmax (doble)	17.045,88 €	3,18%
Qmax (mitad)	18.828,92 €	-6,95%

Figura 1. Resultados de todos los casos de simulación. Fuente: Elaboración propia.

Con todos los resultados obtenidos, se ve cómo el parámetro que más influye en el coste final de la operación del sistema es el término independiente del modelado del consumo energético de la planta eléctrica.

Es trivial ver que al doblar el parámetro k_1 , los costes se incrementan drásticamente, ya que este cambio en el parámetro repercute de manera directa en el consumo energético de la planta y, por tanto, en la demanda eléctrica neta. Este aumento de k_1 se traduce en un aumento de aproximadamente el 35% de la demanda neta final (kW), con los costes que esto trae consigo. Reducir el parámetro k_1 tiene unas consecuencias idénticas, pero en sentido contrario.

Otro parámetro que influye de manera significativa es el caudal de producción máximo de la planta desaladora.

Cambiar este parámetro se traduce en un cambio en la flexibilidad del sistema que permite que sea o no posible la concentración de la producción de agua necesaria para suplir la demanda en algunas horas para poder aliviar la producción de energía en otras.

3.3.Caso de estudio real.

En la Figura 2, se comprueba como la no optimización de la distribución del caudal permeado a lo largo del tiempo trae consigo una operación más ineficiente que incrementa los costes y disminuye la flexibilidad del sistema al no poder producir el agua en los periodos en los que venga mejor su producción.

Ambas curvas de demanda eléctrica neta son muy parecidas y siguen un mismo patrón excepto en las horas donde la desaladora deja de producir agua, que es donde se consigue la disminución de los costes de la operación del sistema.

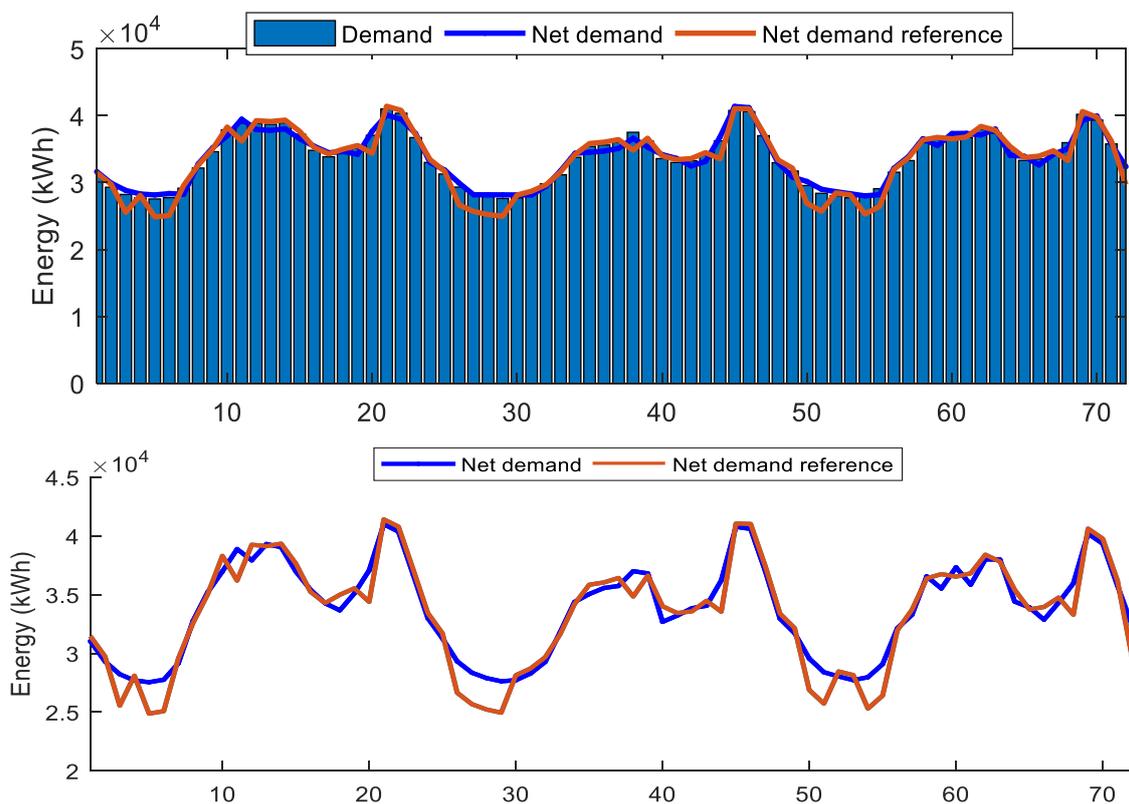


Figura 2. Demanda del caso de estudio real de la isla de La Palma con gestión de demanda simple. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 3 se observa que el sistema tiene más flexibilidad que con una gestión de la demanda menos pronunciada para distribuir la producción de agua a lo largo del día. Esto consigue una reducción de costes en la operación del sistema.

De hecho, darle la posibilidad de subir y bajar la demanda al sistema de manera que se pueda dar la situación en la que la planta desaladora esté sin funcionar, hace que los perfiles de demanda netos se parezcan al caso en el que está el modelo de consumo eléctrico del proceso de desalación.

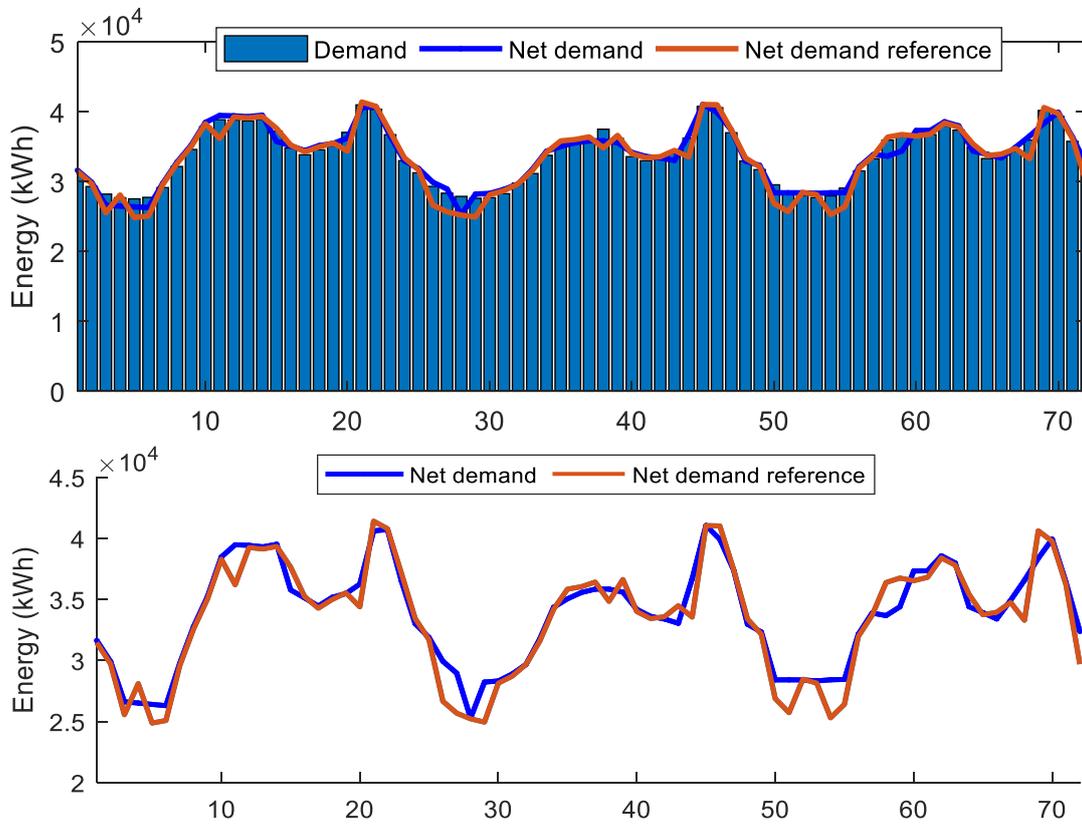


Figura 3. Demanda del caso de estudio real de la isla de La Palma con gestión de demanda simple pronunciada. Fuente: Elaboración propia

Sin embargo, con la gestión de la demanda simple, al no estar introducida la restricción de cumplir con la demanda de agua en todas las horas, no se puede afirmar que ésta se cumpla.

En la siguiente figura se muestra una comparación de los resultados en términos de costes del caso real.

	Costes (€)	Mejora (%)
Gestión demanda simple	268.126,24 €	-2,81%
Modelos consumo de la desaladora	260.591,68 €	-
Gestión demanda simple pronunciada	223.287,71 €	16,71%

Figura 4. Comparación de los resultados del caso real. Fuente: Elaboración propia.

4. Conclusiones.

Con el objetivo de estudiar el nexo agua-energía en sistemas con recursos hidrológicos escasos, en el presente documento se utilizan plantas desaladoras como elemento de integración entre la operación de la energía y del agua. Para ello, se ha propuesto un modelo lineal para representar la planta de desalación en el despacho económico.

Esto puede traer mejoras en la operación del sistema ya que se introducen sistemas de almacenamiento de agua que pueden aportar flexibilidad al sistema a la hora de distribuir el agua a producir a lo largo del día.

Para reducir los costes de la operación del sistema incluyendo el consumo eléctrico de la planta desaladora, el sistema opta por trabajar en la planta desaladora con caudales de permeado altos o nulos debido a que el término independiente (k_1) tiene un peso importante en el modelo del consumo de la planta desaladora.

Así, cuando el sistema tiene la opción de distribuir el agua producida a lo largo del día, el sistema produce agua en horas donde la demanda eléctrica es baja o intermedia para dejar de producir agua en las horas de mayor demanda eléctrica y conseguir reducir la demanda eléctrica neta en estas horas.

En el análisis de sensibilidad realizado se ha encontrado que los parámetros más influyentes desde el punto de vista de la respuesta del sistema son: el término independiente del modelo lineal de consumo eléctrico de la planta desaladora y el caudal máximo que puede producir la misma.

Dependiendo de las modificaciones de estos parámetros, el sistema decide la distribución de la producción de agua a lo largo del día de manera que los costes de la operación del sistema sean lo más bajo posible jugando con el acople/desacople de los diferentes grupos de generación.

En el caso de estudio real de la isla de La Palma, se llega a la conclusión de que, dependiendo de lo realista que sea la gestión de la demanda simple, la introducción del modelo del consumo eléctrico de la planta desaladora trae mejoras a nivel de flexibilidad y, en definitiva, a nivel de costes en la operación del sistema eléctrico.

La reducción de costes del modelo con el consumo eléctrico de las plantas desaladoras respecto a los modelos con una gestión de demanda simple se debe principalmente a la imposición de que la planta desaladora trabaje lo más cerca posible de su máximo técnico siempre que esté en funcionamiento ya que, si no se introduce una demanda eléctrica adicional que podría evitarse debido al término fijo del modelo lineal (k_1).

Gracias a la integración del nexo agua-energía con las plantas de desalación, se le transfiere al sistema una flexibilidad extra a la hora de decidir cuándo producir agua y relajar la demanda eléctrica del sistema, permitiendo que los grupos generadores puedan adaptarse a condiciones dinámicas y cambiantes, manteniendo el equilibrio entre generación y demanda.

Esta flexibilidad es necesaria, especialmente en las islas canarias, debido a:

- Porcentaje de electricidad generada mediante recurso renovables variables.
- Dependencia de combustibles fósiles externos con la incertidumbre en los precios que trae consigo.

Aunque el estudio del caso real haya sido realizado en la isla de La Palma, debido al carácter genérico del modelo, puede ser extrapolado a otras poblaciones para analizar la respuesta del sistema ante la introducción del modelo de consumo energético de planta desaladoras en el problema de unit commitment.

ECONOMIC DISPATCH OF INSULAR ELECTRICAL SYSTEMS INCLUDING DESALINATION PLANTS

Author: González Pizarro, José Luis.

Director: Sigrist, Lukas.

Collaborating Entity: ICAI- Universidad Pontificia Comillas.

PROJECT SUMMARY

1. Introduction

It is a reality that there is a direct relationship between energy and water: the production and enjoyment of one of them depends on the other. The production and enjoyment of electricity requires water (obtaining fuel, water vapor for turbines, cooling, etc.) and, conversely, obtaining safe drinking water, wastewater treatment or water distribution it requires energy. This relationship is known as the water-energy nexus.

Typically, water and energy systems have been studied and operated independently [3]. However, it is trivial to see the relationship between the two.

In the case of systems where water resources are not sufficient to meet the water demand of the population, an element that plays an important role in integrating these two systems is the desalination plants, which produce fresh water from of saltwater consuming energy.

In [2], desalination in the water-energy nexus is given importance because, in dry geographies such as Saudi Arabia, the energy consumption of obtaining and desalinating water represents 9% of total electricity demand. And in other cities of the Arabian Gulf can consume up to 12% only for desalination.

1.1.State of the art

Although there have been great advances in research and modelling of the water-energy nexus, much attention has not been given to the energy flexibility that water treatment facilities can introduce into the operation of the electrical system [3].

Mainly, the water-energy nexus has been studied with respect to political and regulatory challenges and their interaction with climate change, food supply, etc. [7], [8].

From a modelling point of view, this nexus has been studied from different perspectives. In [9] it was studied in terms of co-production facilities, reducing in turn the costs of electricity generation and water. Another study [10] has studied the impact of water storage facilities on optimal economic dispatches using as an element of integration between water-energy, co-production plants. In this last study, an economic co-dispatch is introduced.

In [11] the capacities of the lines of a hypothetical electrical system and the restrictions of the pipes of a theoretical water distribution system (WDS) were introduced.

Most dispatch models in the literature treat the water-energy nexus on the supply side as a single node neglecting the transmission or distribution network of energy and water they feed [3].

1.2. Project purpose

In isolated island systems with scarce water resources, such as the case of the Canary Islands, the operation of desalination plants represents a non-negligible percentage of net electricity demand.

The lack of water resources combined with the overexploitation of aquifers and the massive arrival of tourists has led to a proliferation of the number of desalination plants, both public and private, in the last thirty years.

Thus, it is intended to model the energy consumption of desalination plants to include it in the Canarian economic dispatch and see how it affects this electrical system. In addition, it will be evaluated if with this technique a flexibility in water management can be achieved in order to reduce the costs of operating the energy system.

Taking all the above into account, it is proposed to study this water-energy nexus and propose an optimal economic dispatch that integrates renewable energies and desalination plants that provide flexibility to the energy system, in addition to satisfying the water demand. Thus, apart from finding an optimal way to operate, the dependence on fossil fuels will be reduced and emissions will be reduced. The objectives are:

- Model the electrical consumption of the desalination plant. With this modelling we will be able to know the amount of energy needed to be able to supply a certain quantity of freshwater flow.
- Model the demand for water. Thanks to this modelling, it will be possible to know the flow that the desalination plant must supply to the water system.
- Develop an economic Dispatch model that integrates the Canarian water and electrical system, adding the models mentioned above.
- Evaluate the desalination plant's potential to provide flexibility. Compare with simpler models of consumption flexibility (simple demand management).

2. Methodology

In first place, a preliminary study will be made on the current situation of the Canary Islands: generating groups of the islands and their characteristics, presence of renewable generation, water demand of the different islands, number of desalination plants, desalination plants electrical consumption, etc.

In addition, the state of the art of studies carried out to date on how the water-energy nexus has been integrated, how the energy consumption of desalination plants has been modeled, etc. will be reviewed.

After this, an exhaustive analysis of the functioning of the desalination plants will be made with the objective of knowing which elements are the ones that consume energy. Thus, a solid energy consumption model that represents the operating reality of these plants will be built.

With all the information collected in the previous phases, a model will be built to solve unit commitment problems with the MATLAB tool that includes the electrical demand, water demand, the characteristics of the generating groups, the parameters of the desalination plants, presence of renewable energies, etc.

Once the model is built, different case studies will be carried out to analyse the system response to the introduction of the energy consumption of the desalination plants and their corresponding improvements / worsening of the solution.

In order to know precisely how the system reacts to the introduction of the electrical consumption model of desalination plants, a comparison will first be made with a system that introduces the desalination plants with a simple demand management.

Next, a sensitivity analysis will be carried out to see how the parameters of the desalination plant affect the response of the system. And, finally, the problem of real unit commitment of the island of La Palma will be realized to see the contributions of the model to the flexibility and operating costs of the island.

3. Results

3.1. Desalination plant electrical consumption modelling

Modelling the energy consumption of a desalination plant follows a linear function that has the form: $P_W^{OI} = k_1 + k_2 q_P^{OI}$. Where P_W^{OI} is the electrical consumption (kW) and q_P^{OI} the permeate flow (m³).

This modelling has been introduced, as explained in the previous section, in the problem of unit commitment of different electrical systems.

3.2. Basic case study and sensitivity analysis.

In the case of a basic study with the introduction of the energy consumption model of the desalination plant, the response of the system is based on producing water in the hours of lower electricity demand and intermediate electrical demand to drain the water reservoir in the high electrical demand hours.

At the time when the consumption of the desalination plant is modified (modification of the parameters k_1 and k_2), the net electric demand is modified directly and, depending on whether the modification of the parameters increases or decreases the net electricity demand, the response of the system is different:

- Increasing k_1/k_2 . The system reacts similarly to the basic study case: it produces water in low and intermediate electrical demand hours in order to discharge the reservoir and not produce water in high demand hours. The reduction in the operating cost of the system comes from the hours in which the desalination plant is not in operation.
- Reducing k_1/k_2 . In this situation, since net electricity demand decreases, the system strategy changes and the system decides to uncouple groups during low and intermediate demand hours and produce water in high demand hours.

As for the modification of the parameters that indirectly affect net electricity demand (maximum level of the reservoir and maximum permeate flow), the response of the system:

- Increasing N_{max} . The system response is similar to the basic case study, but increasing the capacity of the reservoir allows the desalination plant to be more hours without producing water in the hours of greater electrical demand, reducing costs.
- Reducing N_{min} . In this case, the system does not have as much flexibility as in previous cases to distribute the production of water because the restriction of the reservoir becomes more influential. Thus, the cost of the system increases.
- Increasing Q_{max} . By increasing the production capacity of the water, the system can avoid producing water at times of low electrical demand and uncoupling groups because, the water needed to reach the water demand in the hours of higher electrical demand can be concentrated in the hours of intermediate electrical demand. Thus, the operating cost of the system is reduced.
- Reducing Q_{min} . As with reducing N_{min} , the system has no flexibility to distribute water production and at all hours the same water flow occurs. Thus,

costs increase, even becoming more expensive than in the case of study with simple demand management, since in that case there is more flexibility in the operation of the system.

Figure 1 shows the results of all the simulated study cases with their respective costs and the improvement percentage with respect to the basic study case where the unit commitment problem is introduced in the operation of the desalination plant.

	Costs (€)	Improvement(%)
Simple demand management	18.511,73 €	-5,15%
Desalination consumption model	17.605,11 €	-
Change of water demand profile	17.182,34 €	2,40%
Increasing k1	23.994,05 €	-36,29%
Reducing k1	16.054,05 €	8,81%
Increasing K2	19.504,08 €	-10,79%
Reducing K2	17.150,12 €	2,58%
Increasing Nmax	17.501,22 €	0,59%
Reducing Nmax	18.224,70 €	-3,52%
Increasing Qmax	17.045,88 €	3,18%
Reducing Qmax	18.828,92 €	-6,95%

Figure 1. Results of all the simulation cases. Source: Own elaboration.

With all the results obtained, we can see how the most influential parameter is the independent term of the modelling of the power consumption of the power plant (k_1).

It is trivial to see that by doubling the k_1 parameter, the costs increase drastically, since this change in the parameter has a direct effect on the energy consumption of the plant and, therefore, on the net electricity demand. This increase in k_1 is translated into an increase of approximately 35% of the final net demand (kW), with the costs that this entails. Reducing the parameter k_1 has identical consequences, but in the opposite direction.

Another parameter that significantly influences is the maximum production flow rate of the desalination plant.

Changing this parameter is translated into a change in the flexibility of the system that makes it possible or not to concentrate the production of water necessary to supply the demand in a few hours in order to alleviate the production of energy in others.

3.3. Real case study.

It is verified in Figure 2 how the non-optimization of the permeate flow distribution over time brings with it a more inefficient operation that increases the costs and decreases the flexibility of the system because it cannot produce water in the periods in which its production comes better.

Both net electricity demand curves are very similar and follow the same pattern except in the hours when the desalination plant stops producing water, which is where the reduction in the costs of the operation of the system is achieved.

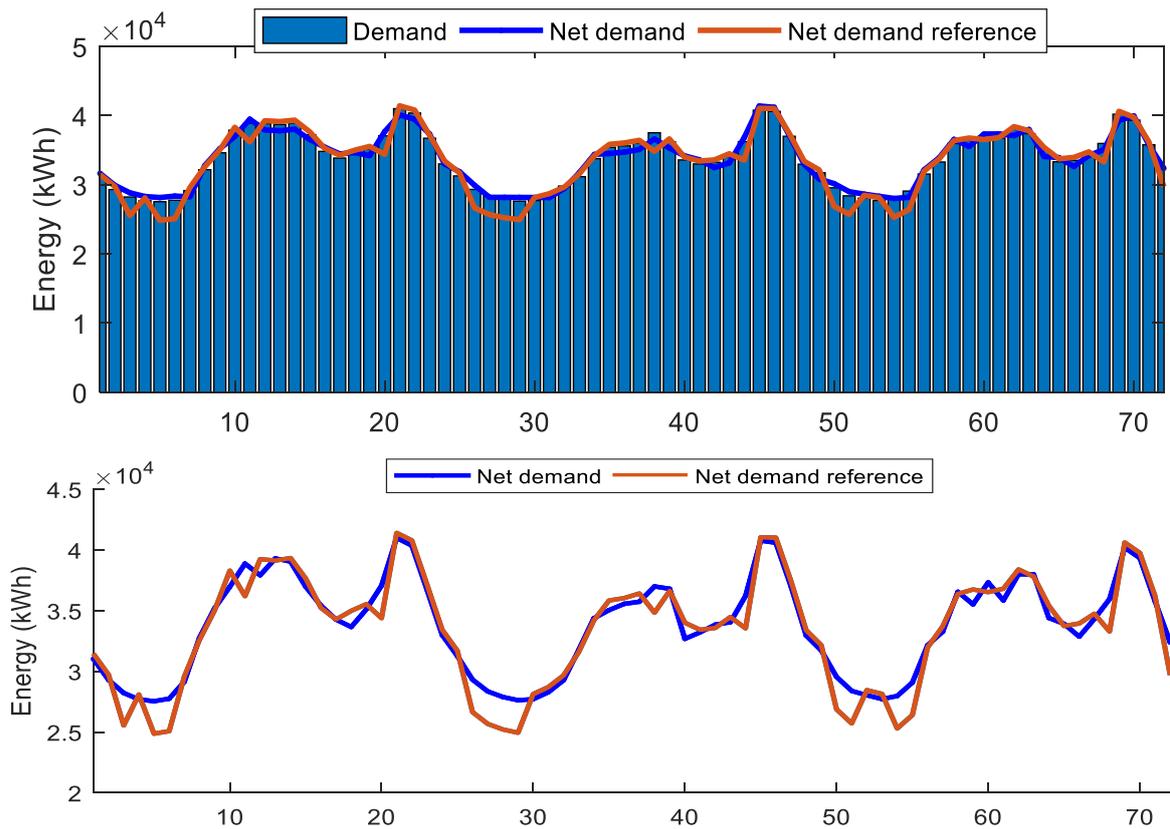


Figure 2. Demand of the real case study of La Palma island with simple demand management. Source: Own elaboration.

Figure 3 shows that the system has more flexibility than with a less pronounced demand management to distribute water production throughout the day. This achieves a reduction of costs in the operation of the system.

In fact, giving the possibility of raising and lowering the demand to the system so that the situation in which the desalination plant can be found to be without functioning, makes the net demand profiles resemble the case in which the model is electrical consumption of the desalination process.

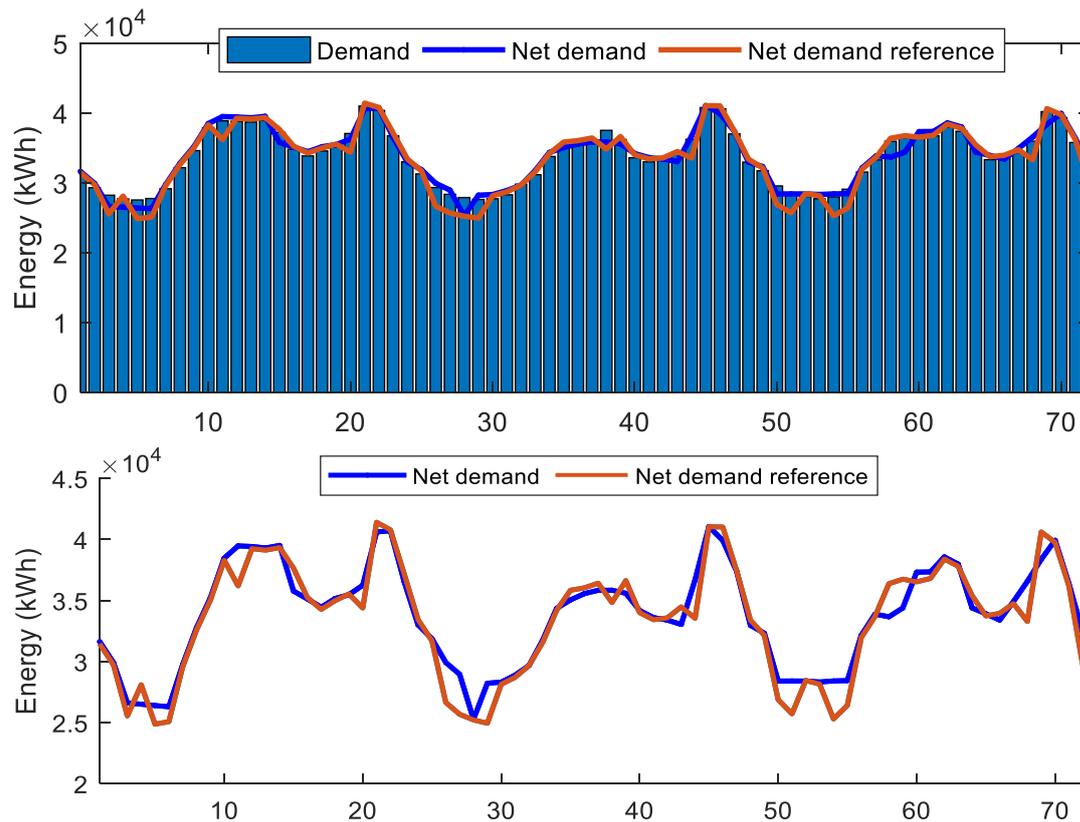


Figure 3. Demand of the case of real study of La Palma island with simple demand management pronounced.
Source: Own elaboration.

However, with simple demand management, since the restriction to comply with water demand at all hours is not introduced, it cannot be affirmed that it is met.

The following figure shows a comparison of the results in terms of costs of the real case.

	Costs (€)	Improvement (%)
Simple demand management	268.126,24 €	-2,81%
Desalination consumption model	260.591,68 €	-
Simple demand management steep	223.287,71 €	16,71%

Figure 4. Real case results comparison. Source: Own elaboration.

4. Conclusions.

With the objective of studying the water-energy nexus in systems with scarce hydrological resources, desalination plants are used in the present document as an element of integration between the operation of energy and water. To do this, a linear model has been proposed to represent the desalination plant in the economic dispatch.

This can bring improvements in the operation of the system since water storage systems are introduced and they can provide flexibility to the system when distributing the water to be produced throughout the day.

To reduce the costs of the electrical operation costs, including the electrical consumption of the desalination plant, the system decides to operate the desalination plant with high or no permeate flow rates because the independent term (k_1) has an important weight in the model of the desalination plant consumption.

Thus, when the system has the option of distributing the water produced throughout the day, the system produces water in hours where the electricity demand is low or intermediate to stop producing water in the hours of greatest electrical demand and to reduce demand net electricity in these hours.

In the sensitivity analysis developed, it has been found that the most influential parameters from the point of view of the response of the system are: the independent term of the linear model of electrical consumption of the desalination plant (k_1) and the maximum flow that can produce it.

Depending on the modifications of these parameters, the system decides the distribution of water production throughout the day so that the costs of operating the system are as low as possible by playing with the coupling / uncoupling of the different generation groups.

In the case of a real study of the island of La Palma, it is concluded that, depending on how realistic the simple demand management is, the introduction of the desalination plant's electricity consumption model brings improvements at the flexibility and, ultimately, at the level of costs in the operation of the electrical system.

The reduction of costs of the model with the electrical consumption of the desalination plants with respect to the models with a simple demand management is mainly due to the imposition of the desalination plant working as close as possible to its technical maximum as long as it is already in operation that, if an additional electrical demand is not introduced that could be avoided due to the fixed term of the linear model (k_1).

Thanks to the integration of the water-energy nexus with the desalination plants, an extra flexibility is transferred to the system when deciding when to produce water and to relax the electrical demand of the system, allowing the generating groups to adapt to dynamic conditions and changing, maintaining the balance between generation and demand.

This flexibility is necessary, especially in the Canary Islands, due to:

- Percentage of electricity generated through variable renewable resources.
- Dependence of external fossil fuels with the uncertainty in the prices that it brings.

Although the study of the real case has been carried out on the island of La Palma, due to the generic nature of the model, it can be extrapolated to other populations to analyze the response of the system to the introduction of the model of energy consumption of desalination plants in the problem of unit commitment.

ÍNDICE DE CONTENIDO

1. Introducción	29
1.1. Planteamiento	29
1.2. Estado del arte	31
1.3. Motivación y objetivos	31
2. Proceso de desalación.....	35
2.1. Concepto ósmosis inversa	35
2.2. Proceso industrial desalación.....	36
2.2.1. Captación y transporte del agua del mar.....	38
2.2.2. Pretratamiento	38
2.2.3. Ósmosis inversa	41
2.2.3.1. Configuración de planta	41
2.2.3.2. Membranas	43
2.2.3.3. Sistemas de recuperación de energía.....	48
2.3. Modelo teórico del consumo energético de una planta desaladora	52
2.4. Modelo práctico del consumo energético de una planta desaladora	60
3. Modelo de la operación de un sistema con nexo agua-energía.....	63
3.1. Unit commitment.....	63
3.1.1. Función objetivo	63
3.1.2. Restricciones.....	64
3.1.2.1. Balance de la demanda eléctrica	64
3.1.2.2. Balance de la demanda de agua.....	65
3.1.2.3. Balance neto cero de la demanda gestionable	65
3.1.2.4. Límites de potencia activa.....	66
3.1.2.5. Límites de rampa de los grupos generadores	66
3.1.2.6. Decisiones de arranque y parada.....	66
3.1.2.7. Restricciones de reserva	67
3.1.2.8. Restricciones de caudal permeado	67
3.1.2.9. Restricciones de capacidad del embalse.....	68
3.1.3. Resolución unit commitment	68
3.1.3.1. Resolución MILP en Matlab	68
4. Casos de estudio	71
4.1. Caso de estudio básico.....	71
4.1.1. Caso de estudio básico con modelo de la optimización de la operación de la desaladora incluido	71

4.1.2.	Caso de estudio básico con modelo de la optimización de la operación de la desaladora sin incluir	78
4.2.	Análisis de sensibilidad	81
4.2.1.	Caso de estudio básico con desaladora y cambio de perfil de demanda agua.	82
4.2.2.	K_1	84
4.2.2.1.	Doble	84
4.2.2.2.	Mitad	85
4.2.3.	K_2	87
4.2.3.1.	Doble	87
4.2.3.2.	Mitad	88
4.2.4.	N_{max}	89
4.2.4.1.	Doble	89
4.2.4.2.	Mitad	91
4.2.5.	Q_{max}	92
4.2.5.1.	Doble	92
4.2.5.2.	Mitad	93
4.2.6.	Resultados análisis de sensibilidad	94
4.3.	Caso de estudio real	96
4.3.1.	El archipiélago canario	96
4.3.2.	Unit commitment La Palma con modelo de desalación incluido	99
4.3.3.	Unit Commitment La Palma con gestión de demanda simple	104
4.3.4.	Unit Commitment La Palma con gestión de demanda pronunciada.....	106
5.	Conclusiones	109
6.	Bibliografía.....	111
7.	Anexos.....	115
7.1.	Nomenclatura.....	115
	Parámetros	115
	Variables continuas	116
	Variables binarias	116
7.2.	Creación de matrices	117
7.3.	Resolución del problema	117

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema conversión energía en una planta desaladora.	30
Figura 2. Evolución histórica de la oferta de agua en Canarias..	32
Figura 3. Procesos de ósmosis directa y ósmosis inversa.	35
Figura 4. Fases de la producción de agua desalada	37
Figura 5. Rejas de desbaste.....	39
Figura 6. Esquema de tamíz rotativo.	39
Figura 7. Diagrama proceso básico de SWRO. [15]	41
Figura 8. Diagrama proceso BWRO configuración en dos etapas. [15]	42
Figura 9. Diagrama de proceso BWRO configuración dos pasos: [15]	42
Figura 10. Configuración membrana plato-marco.	44
Figura 11. Esquema de las membranas tipo tubular.....	45
Figura 12. Configuración membrana fibra hueca.	46
Figura 13. Disposición de las láminas en las membranas en espiral.	46
Figura 14. Trayectoria de los diferentes flujos en las membranas de espiral.....	47
Figura 15. Configuración de las membranas en espiral.....	47
Figura 16. Turbina Pelton.....	49
Figura 17. Acoplamiento de la turbina Pelton en la planta desaladora.	49
Figura 18. Sistema de ósmosis inversa equipado con Turbocharger.....	50
Figura 19. Diagrama simplificado del proceso de OI con una cámara de intercambio de presión. [17].....	50
Figura 20. Principio de funcionamiento de las cámaras de intercambio de presión.[14]	51
Figura 21. Cámara de intercambio de presión por rotación.	52
Figura 22. Consumos energéticos de una planta desaladora por ósmosis inversa. [18]	53
Figura 23. Diagrama de bloques de la etapa de ósmosis inversa. [14].....	53
Figura 24. Representación de las diferentes presiones que se dan en el proceso de ósmosis inversa.....	55
Figura 25. Conversión vs consumo específico para diferentes membranas. [22]	56
Figura 26. Curva característica de una bomba de alta presión con recuperador de energía de intercambio de presión.	57
Figura 27. Aproximación del rendimiento de la bomba de alta presión.....	58
Figura 28. Potencia consumida por la desaladora en función del caudal permeado.	59
Figura 29. Curva Potencia consumida vs caudal permeado.	60
Figura 30. Aproximación lineal de la potencia eléctrica consumida según el caudal permeado por la bomba de alta presión.....	61
Figura 31. Ilustración del arranque y de la parada de un grupo generador g.	65
Figura 32. Problema MILP en Matlab.....	68
Figura 33. Diagrama de flujo de la resolución del problema Unit Commitment.	69
Figura 34. Perfil diario de la demanda eléctrica del caso de estudio básico..	73
Figura 35. Perfil diario de la demanda de agua del caso de estudio básico.....	74
Figura 36. Demanda y generación eléctrica del caso de estudio básico con desaladora.	74
Figura 37. Conexión/Desconexión de los grupos generadores del caso de estudio básico con desaladora.	75
Figura 38. Variables relacionadas con la operación del agua del caso de estudio básico con desaladora..	75

Figura 39. Perfil de demanda de agua media con rangos máximos y mínimos..	78
Figura 40. Perfil de demanda de eléctrica media debida a la desaladora media con rangos máximos y mínimos.	78
Figura 41. Demanda y generación eléctrica del caso de estudio básico con gestión de la demanda simple.	79
Figura 42. Comparación demandas netas del caso de estudio básico.	80
Figura 43. Conexión/Desconexión de los grupos generadores del caso de estudio básico con gestión de la demanda simple.	80
Figura 44. Perfil horario hipotético de la demanda de agua.	83
Figura 45. Demanda eléctrica del caso de estudio básico con cambio del perfil de demanda de agua.	83
Figura 46. Nivel del embalse del caso de estudio básico con cambio del perfil de demanda de agua.	84
Figura 47. Demanda y generación eléctrica del caso de estudio básico con el parámetro k1 duplicado.	85
Figura 48. Comparación demandas netas del caso de estudio 4.2.2.1.	85
Figura 49. Demanda eléctrica del caso de estudio básico con el parámetro k1 reducido a la mitad.	86
Figura 50. Demanda eléctrica del caso de análisis de sensibilidad con k2 (x2).	87
Figura 51. Demanda eléctrica del caso de estudio básico con el parámetro k2 reducido a la mitad.	88
Figura 52. Demanda y generación eléctrica del caso de estudio básico con el parámetro Nmax (x2).	90
Figura 53. Nivel del embalse de agua con el parámetro Nmax duplicado.	90
Figura 54. Demanda y generación eléctrica del caso de estudio básico con el parámetro Nmax reducido a la mitad.	91
Figura 55. Demanda y generación eléctrica del caso de análisis básico con el parámetro Qmax duplicado.	92
Figura 56. Producción de agua del caso de análisis básico con el parámetro Qmax reducido.	93
Figura 57. Demanda y generación eléctrica del caso de análisis básico con el parámetro Qmax reducido.	94
Figura 58. Resultados de todos los casos de simulación.	96
Figura 59. Evolución de la oferta de agua en Canarias.	97
Figura 60. Evolución de capacidad de desalación en la isla de Gran Canaria.(m ³ /d)	98
Figura 61. Demanda de agua por sectores en Canarias 2015.	99
Figura 62. Cobertura de la demanda según la fuente en la isla de la Palma en 2017...	100
Figura 63. Demanda eléctrica de tres días característicos de la isla de La Palma.....	101
Figura 64. Generación eólica de tres días característicos de la isla de La Palma.....	101
Figura 65. Generación fotovoltaica de tres días característicos de La Palma.	102
Figura 66. Demanda de agua de la planta desaladora en la isla de La Palma.	102
Figura 67. Variables relacionadas con la operación del agua del caso de estudio real en la isla de La Palma.....	103
Figura 68. Demanda del caso de estudio real de la isla de La Palma..	103
Figura 69. Conexión/Desconexión de los grupos generadores del caso de estudio real en la isla de La Palma. Fuente: Elaboración propia	104
Figura 70. Perfil de demanda de agua media con rangos máximos y mínimos..	105

Figura 71. Perfil de demanda de eléctrica media debida a la desaladora con rangos máximos y mínimos de demanda.	105
Figura 72. Demanda del caso de estudio real de la isla de La Palma con gestión de demanda simple.	105
Figura 73. Detalle de la demanda eléctrica del caso de estudio real en la isla de La Palma.	106
Figura 74. Demanda del caso de estudio real de la isla de La Palma con gestión de demanda simple pronunciada.	107
Figura 75. Resultados de introducir el modelo de consumo energético en la operación del sistema en el caso real de La Palma.	108

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Características grupos generadores del caso de estudio básico. a	72
Tabla 2. Parámetros de la desaladora del caso de estudio básico.....	72
Tabla 3. Demanda eléctrica y de agua del caso de estudio básico..	73
Tabla 4. Generación en las últimas horas del caso de estudio básico.	76
Tabla 5. Demanda eléctrica y de agua del caso de estudio 4.2.1.....	82
Tabla 6. Parámetros de los grupos generadores en la isla de La Palma.	100
Tabla 7. Parámetros de la planta desaladora de La Palma.....	101

1. Introducción

1.1. Planteamiento

En los países desarrollados, las instalaciones dedicadas al sistema de distribución de agua suponen un consumo importante de energía. De hecho, en Estados Unidos ronda el 4% del consumo total de energía. De éste, un 80% se utiliza para el bombeo y distribución de agua y aguas residuales y un 20% para el tratamiento de aguas [1].

En los gobiernos municipales, estas instalaciones son las mayores consumidoras de energía, suponiendo un consumo del 40% de energía en éstos [1].

Con el aumento de la población a nivel mundial, está previsto que la demanda de energía debida al tratamiento y suministro de agua se incremente de manera representativa. En el caso del archipiélago canario, esta demanda podría crecer a un ritmo más acelerado debido a la gran oleada de turistas a la que están acostumbradas. De hecho, los pronósticos apuntan que para el 2030 se doblará el número de turistas en comparación con 2015 (13.3 millones de turistas en este año2015).

Habitualmente, las redes de agua y energía han sido diseñadas y operadas de manera independiente [3]. Sin embargo, es trivial ver la relación entre ambas:

- En el proceso de la obtención del combustible y la producción de electricidad, el agua juega un papel fundamental. La exploración, extracción, recuperación, procesado, refinado, etc. del combustible; además del movimiento de las turbinas y del enfriamiento de las plantas de generación, se realiza con agua.
- Por otra parte, para la obtención del agua (aguas superficiales, subterráneas, recicladas, destilación), su tratamiento y distribución, se utiliza energía eléctrica y supone una parte no despreciable de la demanda energética total.

Además, debido al aumento de la población y al turismo masivo, el sistema insular que nos ocupa tiene unas necesidades de agua que no puede satisfacer únicamente con el agua dulce de acuíferos y embalses [4]. El crecimiento de turismo supone un mayor consumo energético y de agua. Así, se hace necesaria la generación industrial de agua mediante plantas desaladoras, que incrementan, a su vez, el consumo eléctrico.

En [2], se les confiere una importancia a las desaladoras en el nexo agua-energía debido a que, en geografías secas como Arabia Saudí, el consumo energético de la obtención y desalación de agua representa un 9% de la demanda eléctrica total. Y en otras ciudades del Golfo Árabe pueden consumir hasta el 12% únicamente para la desalación.

Las desaladoras se utilizan para producir agua potable y, para ello, consume una energía eléctrica debido a la bomba principalmente (o bombas según configuración de la planta). Como se observa en la Figura 1, la potencia eléctrica que llega a la planta se define como $P_e = I * V$. Ésta se transforma en potencia mecánica P_m para alimentar al motor mediante un rendimiento η_1 . A su vez esta potencia del motor se transmite a la bomba para conseguir una potencia hidráulica P_h con otro rendimiento η_2 . Por lo que hay una relación entre la potencia eléctrica suministrada y el caudal puede ofrecer la planta desaladora.

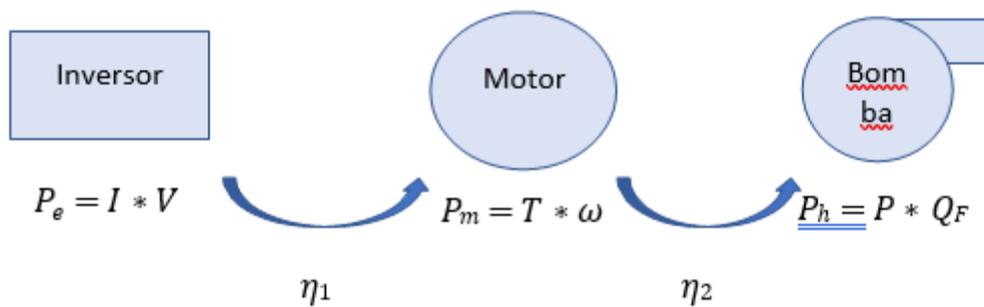


Figura 1. Esquema conversión energía en una planta desaladora. Fuente: elaboración propia.

Teniendo en cuenta lo anteriormente expuesto, estas plantas de desalación pueden ser útiles para integrar la operación de agua y energía, por ejemplo, produciendo esta agua dulce en periodos valle y almacenándola, reduciendo el coste energético.

Un esfuerzo conjunto de los operadores del sistema eléctrico y las instalaciones de agua y agua residuales podrían crear grandes oportunidades para reducir los picos de demanda de electricidad e incrementar la eficiencia energética de la energía usada en el tratamiento de aguas [6].

Hoy en día la generación se amolda a la demanda eléctrica, es decir, hay mayor generación eléctrica cuanto mayor es el consumo. Sin embargo, y por ejemplo en el caso de las plantas desaladoras incorporando recursos naturales como plantas fotovoltaicas o

eólicas [5] para su funcionamiento, se puede utilizar el punto de vista opuesto: amoldar la demanda de energía eléctrica debido a la producción de agua según la disponibilidad de dichos recursos. El sistema insular canario cuenta con una posición geográfica y una climatología excelente para implantar estas plantas renovables que respalden el funcionamiento de las plantas desaladoras.

1.2. Estado del arte

Aunque ha habido grandes avances en las investigaciones y modelados del nexo agua-energía, no se le ha dado mucha atención a la flexibilidad energética que las instalaciones de tratamiento de agua pueden introducir en la operación del sistema eléctrico [3].

Principalmente, el nexo agua-energía se ha estudiado con respecto a los retos políticos y regulatorios y su interacción con el cambio climático, el aprovisionamiento de alimentos, etc. [7],[8].

Desde un punto de vista de modelado este nexo ha sido estudiado desde diferentes perspectivas. En [9] se estudió en términos de instalaciones de co-producción reduciendo a su vez los costes de la generación eléctrica y del agua. Otro estudio [10] ha estudiado el impacto de instalaciones de almacenamiento de agua en despachos económicos óptimos utilizando como elemento de integración entre el agua-energía, plantas de coproducción. En este último estudio se introduce un co-despacho económico.

En [11] se introdujeron las capacidades de las líneas de un hipotético sistema eléctrico y las restricciones de las tuberías de un teórico sistema de distribución de agua (WDS).

La mayoría de los modelos de despacho en la literatura tratan el nexo agua-energía en el lado del suministro como un solo nodo descuidando la red de transmisión o distribución de energía y agua que alimentan[3].

1.3. Motivación y objetivos

Podemos concluir entonces que hay una relación clara entre agua y energía, el llamado nexo agua-energía. Para satisfacer la demanda de agua y poder, además, proveer de

flexibilidad al sistema eléctrico, una herramienta a utilizar puede ser la desalación de agua y almacenarla. Esta desalación conlleva un consumo de energía que afectará al sistema eléctrico.

En el caso concreto de las islas canarias, el consumo de energía debido a la desalación de agua se acentúa debido al crecimiento de demanda de agua en las islas tanto por el crecimiento de la población como por la llegada masiva de turistas.

La proliferación de las plantas desaladoras en los últimos años en las islas canarias ha sido palpable como se puede percibir en la Figura 2 cuya demanda energética suponen un 15% en algunas de las islas según el Instituto Tecnológico de Canarias.

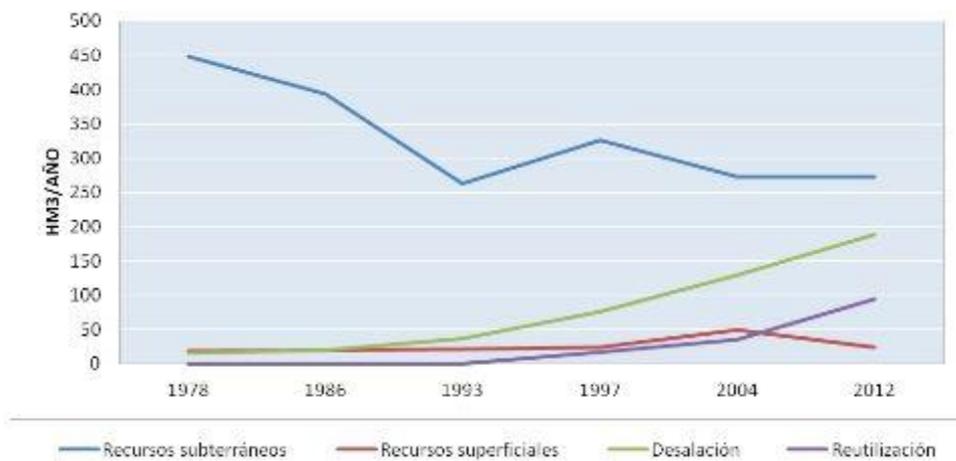


Figura 2. Evolución histórica de la oferta de agua en Canarias. Fuente: Instituto Tecnológico de Canarias.

Así, se pretende modelar este consumo energético para poder incluirlo en el despacho económico canario y ver cómo afecta a este sistema eléctrico. Además, se evaluará si con esta técnica se puede alcanzar una flexibilidad en la gestión del agua para poder reducir los costes de la operación del sistema energético.

Teniendo todo lo anterior en cuenta se propone estudiar este nexo agua-energía y proponer un despacho económico óptimo que integre energías renovables y desaladoras que aporten flexibilidad al sistema energético, además de satisfacer la demanda de agua. Así, aparte de encontrar una manera óptima de operar, se reducirá la dependencia de los combustibles fósiles y disminuirán las emisiones. Los objetivos son:

- Modelar el consumo eléctrico de la desaladora. Con este modelado conseguiremos saber la cantidad de energía necesaria para poder suministrar cierta cantidad de caudal de agua dulce.
- Modelar la demanda de agua. Gracias este modelado se podrá conocer el caudal que la desaladora debe aportar al sistema de agua.
- Realizar un modelo de Despacho económico que integre el sistema eléctrico y de agua canario, añadiendo los modelos mencionados anteriormente.
- Evaluar el potencial de las desaladoras de proporcionar flexibilidad. Comparar con modelos más simples de flexibilidad de consumo (respuesta de demanda)

2. Proceso de desalación

2.1. Concepto ósmosis inversa

Al separar dos disoluciones por una membrana semipermeable, aparece una presión diferencial que produce de manera espontánea un flujo del disolvente hacia la solución de mayor concentración para rebajar la concentración de ésta. Este fenómeno se define como ósmosis natural.

Si se ejerce una presión externa sobre la solución de mayor concentración, se observa que el flujo espontáneo del disolvente hacia esta solución comienza a reducirse. Al seguir aumentando la presión extrínseca, se consigue que el flujo se detenga. Este valor de presión se conoce como presión osmótica

Aumentando la presión por encima de la presión osmótica, el flujo resultante toma el sentido opuesto. Es decir, la solución de mayor concentración se dirige hacia el disolvente pasando por la membrana semipermeable que únicamente permite el paso de moléculas pequeñas, dejando una disolución con una concentración mayor a la inicial a un lado, y una mayor cantidad de disolvente. Esta es la base de la ósmosis inversa.

En la Figura 3, se representa gráficamente tanto el proceso de ósmosis natural como el de ósmosis inversa.

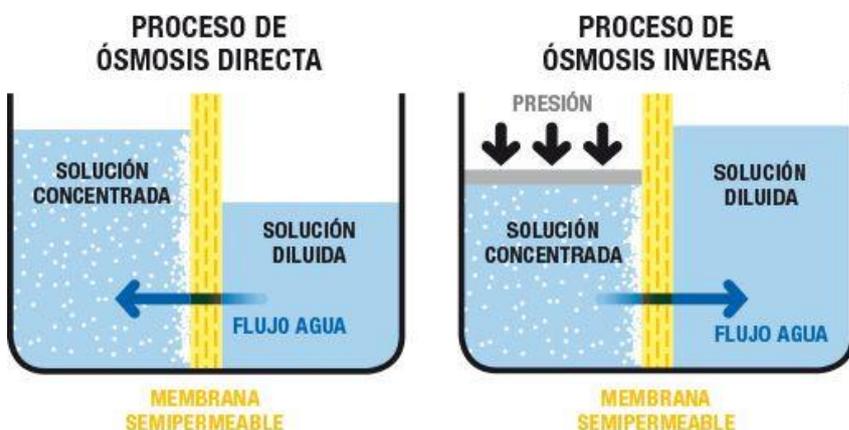


Figura 3. Procesos de ósmosis directa y ósmosis inversa. Recogido de la web <https://cienciaybiologia.com/osmosis>

El valor de la presión osmótica se puede calcular con la ley de van't Hoff según las propiedades de la disolución.

$$P_o = i \cdot M \cdot R \cdot T \quad (1)$$

Donde:

P_o es la presión osmótica [*atmosferas*].

i es el factor de van't Hoff que expresa el grado de disociación del soluto. Depende de la temperatura y concentración de la solución.

M es la concentración molar de la disolución $\left[\frac{\text{moles}}{\text{litro}}\right]$.

R es la constante de los gases $\left[0.082 \frac{\text{atmósferas}\cdot\text{litro}}{\text{mol}\cdot^{\circ}\text{K}}\right]$.

T es la temperatura $[^{\circ}\text{K}]$.

A continuación, se calcula la presión osmótica del agua del mar a 25°C y 35000 ppm, propiedades casi idénticas a las del agua del mar canario (36000 ppm y 25°C en verano).

El factor de van't Hoff para el agua del mar con estas características es 1.82 [12].

Para conocer la concentración molar de la disolución M , es necesario conocer la densidad del agua en las condiciones descritas anteriormente, y el peso molecular del cloruro sódico.

$$M = \frac{35 \frac{\text{g sal}}{\text{kg agua}} \cdot 1.023 \frac{\text{kg agua}}{\text{litro}}}{58.44 \frac{\text{g sal}}{\text{mol}}} = 0.613 \frac{\text{moles}}{\text{litro}} \quad (2)$$

Una vez obtenidos estos datos, es posible calcular la presión osmótica del agua del mar con la ecuación (2):

$$\begin{aligned} P_o &= i \cdot M \cdot R \cdot T = 1.82 \cdot 0.613 \frac{\text{moles}}{\text{litro}} \cdot 0.082 \frac{\text{atm} \cdot \text{l}}{\text{mol} \cdot ^{\circ}\text{K}} \cdot 298.15 ^{\circ}\text{K} \\ &= 27.31 \text{ atmósferas} \end{aligned}$$

Lo que significa que hace falta aplicarle una presión de 27.31 atmósferas a un litro de agua del mar con estas características para empezar a desalar el agua.

2.2. Proceso industrial desalación

En esta sección se van a exponer las diferentes fases de las que se compone la desalación por ósmosis inversa a nivel industrial, además de mencionar las partidas más importantes del consumo energético de cada fase.

En los años cincuenta la desalación se realizaba principalmente mediante procesos térmicos como desalación flash multietapa (MSF), evaporación multi efecto (MED) y compresión mecánica de vapor (MVC). Sin embargo, estos procesos tenían un consumo de energía térmica muy elevado.

Con la llegada de la tecnología de la ósmosis inversa y las grandes mejoras de las membranas se redujeron los consumos elevados de técnicas anteriores y, por ello, esta tecnología se ha impuesto al resto siendo la tecnología más usada en la industria de la desalación a nivel mundial, tanto a gran como a pequeña escala [24].

El proceso industrial de la ósmosis inversa se compone de cinco fases bien diferenciadas.

1. En primer lugar, se transporta el agua marina a la planta.
2. A continuación, comienza la fase de pretratamiento en la que se modifican las propiedades de esta agua para poder utilizarla para la fase posterior.

3. Tercero, se realiza la ósmosis inversa. En esta fase es donde realmente se realiza la desalación y se obtiene el agua pura gracias a la filtración del agua de aporte al paso por la membrana semipermeable.
4. El agua producto de la ósmosis inversa no es apta para el consumo humano, por ello a ésta se le realiza un postratamiento para dotar al agua producto del proceso las características necesarias para su consumo.
5. Finalmente, la salmuera rechazada en el proceso es devuelta al mar. Actualmente, la mayoría de las plantas cuentan con dispositivos de recuperación de energía para reducir el consumo aprovechando la presión a la que sale el caudal de rechazo.

En la Figura 4, se muestra de manera esquemática el proceso industrial, con las partidas que consumen energía en cada fase.

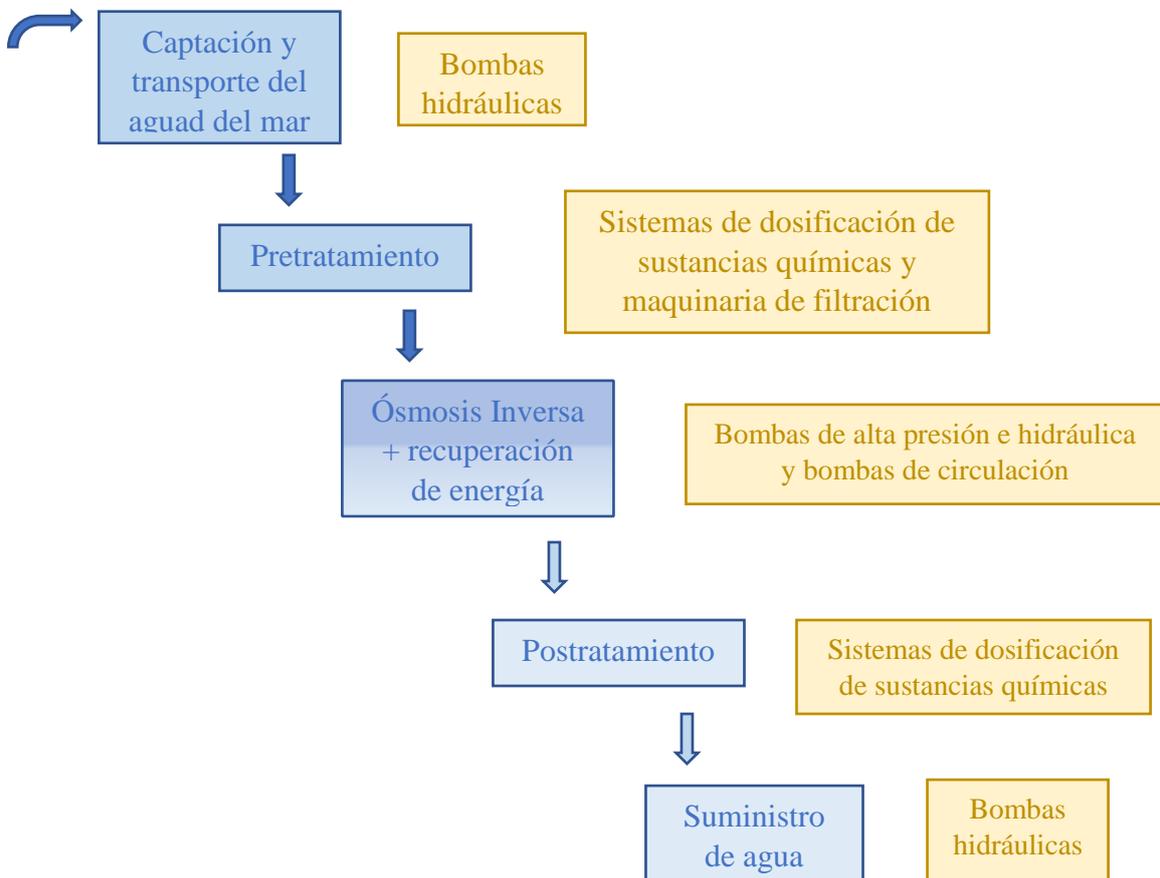


Figura 4. Fases de la producción de agua desalada. Fuente: Elaboración propia.

2.2.1. Captación y transporte del agua del mar

En la captación del agua, se debe evitar la captación de cualquier cuerpo que pueda dañar las instalaciones de la instalación; así como evitar la captura de peces u otras especies marinas.

Los dispositivos más utilizados para realizar la fase de captura para las plantas desaladoras son principalmente cuatro: tomas abiertas, pozos verticales, drenes horizontales y tomas mixtas.

Los más extendidos en la industria son los de tomas abiertas debido a las ventajas que ofrecen éstas frente al resto de dispositivos de captación: aseguran un caudal constante independientemente de las mareas y tienen un mantenimiento menor, debido a que únicamente necesitan revisiones y limpiezas programadas de manera anual.

Una vez captada el agua, se debe transportar desde el dispositivo de captación hasta la planta.

El consumo energético de esta primera fase se debe principalmente al consumo de las bombas hidráulicas que tienen que transportar el agua de aporte desde el mar hasta la planta desaladora.

2.2.2. Pretratamiento

Esta segunda fase juega un papel vital en la conservación y en el aumento de la vida útil de la planta industrial de desalación ya que su función es la de eliminar las partículas que se encuentran en suspensión en el agua. Además, en el pretratamiento, el agua es sometida a una serie de tratamientos químicos que le proporcionan las propiedades necesarias para evitar dañar las membranas.

- Desbaste y tamizado.

Son utilizados para un primer filtrado del agua. En el caso del desbaste, los dispositivos que llevan a cabo esta técnica están compuestos por rejillas por las cuales pasa el agua, pero los sólidos de mayor tamaño quedan atrapados.

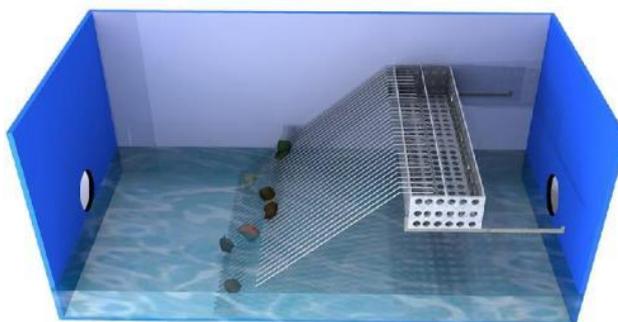


Figura 5. Rejas de desbaste. Recogido de: <http://blogdeagua.es/reja-de-desbaste/>

Por otra parte, el tamizado sigue atrapando sólidos de gran tamaño, pero las dimensiones de las rejas y la separación entre las mismas cuentan con menores dimensiones.

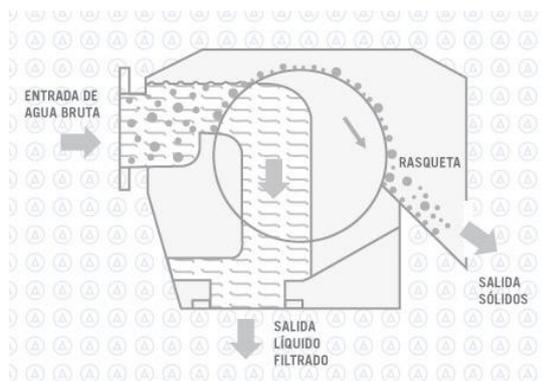


Figura 6. Esquema de tamiz rotativo. Recogido de: <http://abakan-teach.ru/tamiz-rotativo-autolimpiante/>

- Coagulación.

El fin de esta fase es agrupar las partículas que no pudieron ser atrapadas en los filtrados anteriores debido a su tamaño. De esta forma, se podrán eliminar más fácilmente en fases posteriores.

Esta agrupación se realiza gracias a la desestabilización eléctrica de partículas coloidales, que produce cargas positivas. Éstas neutralizan las fuerzas repulsivas entre las partículas.

Para conseguirlo, se debe aportar reactivos químicos que reaccionen con los coloides.

- Desinfección.

Los propósitos fundamentales de esta etapa son: la eliminación de microorganismos que puedan afectar al rendimiento de las membranas semipermeables de la OI y la eliminación de cualquier carga biológica perjudicial para el ser humano.

Sin embargo, los tratamientos químicos para eliminar tales cargas biológicas no son demasiado intensos debido a que la propia sal impide la proliferación de microorganismos.

El desinfectante más utilizado en los procesos de ósmosis inversa es el hipoclorito de sodio (NaClO). Este agregado tiene una fuerte carga oxidante que deberán eliminarse antes de que lleguen a las membranas semipermeables de la fase de ósmosis inversa ya que son potencialmente perjudiciales.

Para conseguir la eliminación de los oxidantes comentados anteriormente, se deben aportar productos químicos que neutralicen su efecto. Como puede ser el metabisulfito sódico (Na₂S₂O₅).

- Regulación del pH.

Esta fase del pretratamiento no está siempre presente en la industria debido a que el agua salada suele mantener su pH constante. Además, las membranas de la OI están diseñadas para soportar cambios de pH en el agua.

El problema principal de la variación de pH es que, para pH muy elevados, existe una propensión a la formación de carbonato cálcico en las membranas, lo que se traduce en una reducción de la vida útil, además de una reducción en el rendimiento de las membranas.

- Antiincrustante

Otro efecto similar al efecto de la presencia de oxidantes, aparece con la sal del agua marina. Pueden presentarse incrustaciones en las membranas producidas por la precipitación de las sales presentes. Además, la formación de estos cristales favorece la inclusión de otras partículas que aumentan el tamaño total del conjunto, produciendo daños mayores, casi irreversibles, en las membranas.

Existen gran variedad de incrustaciones debido a la diversidad de iones presentes en el agua del mar y para cada tipo se emplea un antiincrustante diferente. Sin embargo, el principio es el mismo en todos ellos: evitar la formación de cristales y la unión de partículas.

Las plantas de desalación actuales cuentan con equipos que controlan y monitorizan para dosificar la cantidad óptima de antiincrustante en cada momento.

- Ultrafiltración

En esta última etapa del pretratamiento, se eliminan las partículas de menor tamaño (orden de magnitud de nanómetros). Las membranas utilizadas en esta fase tienen una dimensiones de abertura mayores a las utilizadas en la ósmosis inversa, pero menores a las utilizadas en la microfiltración.

El consumo energético estimado es de 0,09-0,12 kWh/m³ de agua tratada, con un rendimiento del 99% 111[13].

En la etapa de pretratamiento el consumo energético está ligado a la maquinaria de filtración, además de los sistemas de dosificación de sustancias químicas y su control y monitorización asociados.

2.2.3. Ósmosis inversa

Como se ha explicado anteriormente, el principio fundamental de la ósmosis inversa en la desalación es aplicar una presión externa mayor a la presión osmótica al agua de aporte para conseguir una mayor cantidad de agua producto. Esto se consigue gracias a las membranas semipermeables que separan a las dos disoluciones, que permiten únicamente el paso del agua, no de las sales disueltas en ella.

2.2.3.1. Configuración de planta

Dependiendo de la configuración de la planta, el consumo energético es diferente. Por ello es necesario analizar cuáles son las configuraciones con las que se trabaja actualmente en la industria de la desalación.

El módulo de ósmosis está compuesto por una bomba de alta presión que inyecta presión al agua salada para hacer efectiva la desalación. Sin embargo, no toda el agua salada se convierte en producto. Existe un factor de conversión que depende principalmente de las características de las membranas.

Las plantas de desalación de ósmosis inversas están formadas por grupos de tubos de presión conectados en paralelo denominados bastidores. Dentro de estos tubos, las membranas de arrollamiento en espiral se encuentran distribuidas en serie. El número de membranas por cada tubo de presión está estipulado entre seis y ocho [14].

Dependiendo del número de bastidores y de su disposición, existen diferentes configuraciones.

Configuración de una etapa

Esta configuración consiste en una bomba de alta presión que alimenta a una matriz de tubos de presión dispuesta de manera paralela al flujo de alimentación. El agua desalada conseguida de este bastidor es el agua producto buscado. Se representa en la Figura 7.

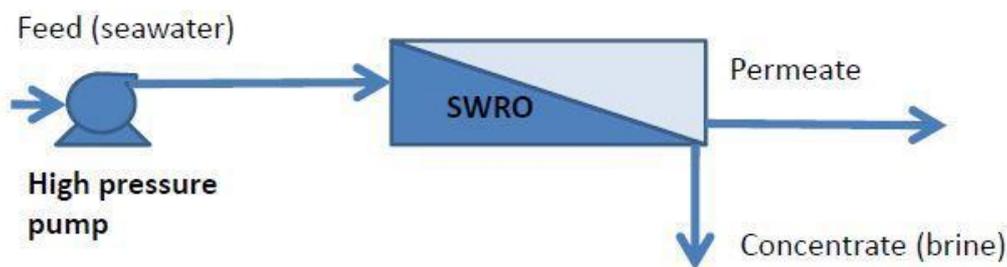


Figura 7. Diagrama proceso básico de SWRO. Fuente: [15]

Configuración de dos etapas

La configuración de dos etapas aprovecha el caudal de salmuera de la primera etapa, que se introduce en una segunda etapa para ser desalado. La presión de entrada del agua es mayor en el segundo bastidor que en el primero debido a que la concentración de sales es mayor en la salmuera que en el agua de alimentación inicial. Se representa en la Figura 8.

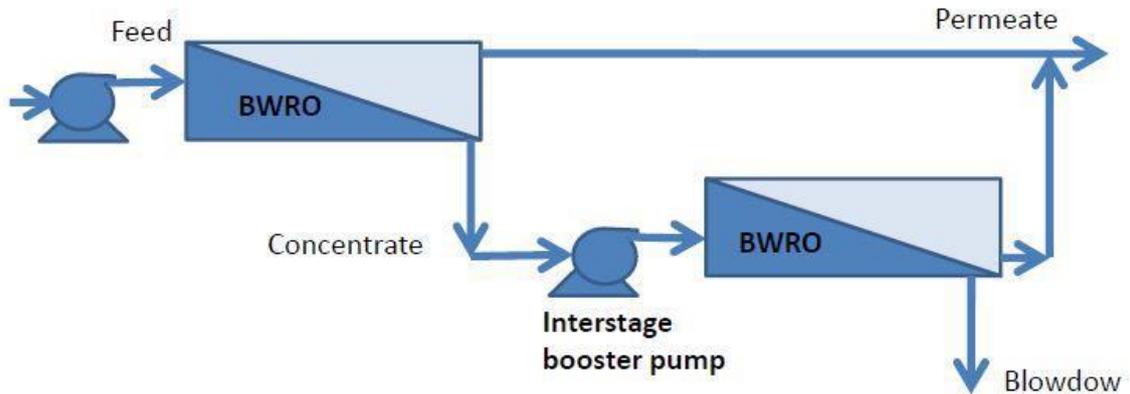


Figura 8. Diagrama proceso BWRO configuración en dos etapas. Fuente: [15]

Configuración de dos pasos

En este tipo de configuración el caudal de agua permeada se vuelve a introducir en otro bastidor para mejorar la calidad del permeado. A diferencia de la configuración doble etapa, la presión de alimentación del segundo bastidor es menor a la del primero debido a que la concentración de sales del agua permeada tiene menos concentración de sales que la alimentación del agua de alimentación inicial. Esta configuración se representa en la Figura 9.

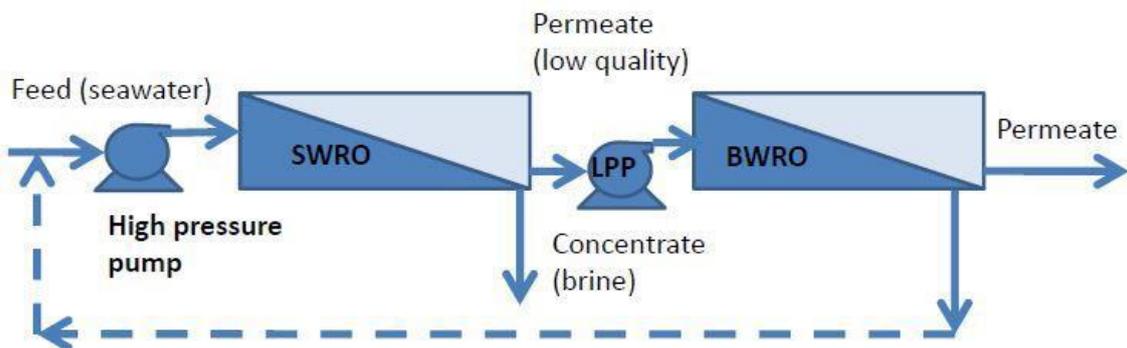


Figura 9. Diagrama de proceso BWRO configuración dos pasos. Fuente: [15]

La diferencia principal entre las configuraciones de doble etapa y doble paso es el objetivo final de dichas configuraciones. Mientras la primera busca conseguir una mayor cantidad de agua producto, la segunda busca una mayor calidad del permeado.

El uso de la configuración de doble etapa está recomendado para aguas salobres, o para ampliar la capacidad de plantas de una etapa de agua del mar. En cuanto al número de pasos dependerá de la calidad que se quiera conseguir. Normalmente, se hacen

simulaciones con una etapa y si la calidad no es suficiente, se introduce una segunda etapa.

2.2.3.2. Membranas

Las membranas juegan un papel fundamental en el proceso de la ósmosis inversa ya que, gracias a ellas, las sales disueltas en el agua del mar quedan retenidas y se obtiene agua pura.

Sus propiedades (área y permeabilidad) y el mantenimiento de estas tienen un peso importante en el rendimiento de la planta y, por ello, en el consumo energético total de la operación.

Las configuraciones de membranas a nivel comercial se muestran a continuación:

- Plato y marco.
- Tubular.
- Fibra hueca.
- Arrollamiento en espiral.

Plato-Marco

Las membranas de tipo plato-marco tienen un diseño sencillo. Cuentan con una membrana plana de tipo rectangular o circular por la que fluye el agua salada, reteniendo las sales a un lado de la membrana y produciendo agua pura.

Tienen una larga vida útil y altos rendimientos para volúmenes de producción reducidos. Por ello, es el primer tipo de membrana que se utilizó.

Para conseguir capacidades de producción mayores, se disponen las membranas en serie formando columnas de membranas. Sin embargo, este tipo de configuraciones aumentan el coste de operación, ocupan un volumen elevado y son incómodas para operar.

Por tanto, para las demandas que tienen que satisfacer hoy en día las plantas desaladoras este tipo de configuración no tiene ningún tipo de interés.

En la Figura 10 se muestra la configuración de las membranas plato-marco.

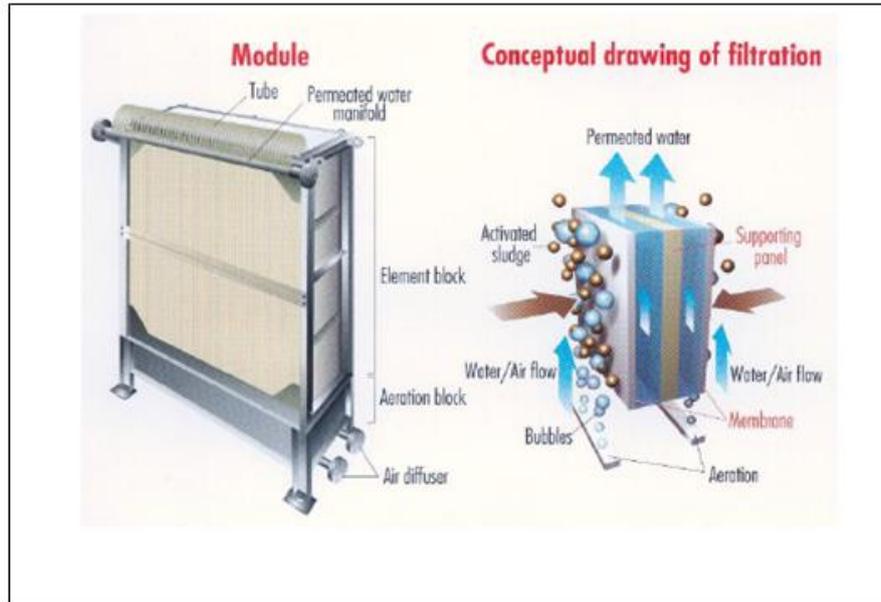


Figura 10. Configuración membrana plato-marco. Recogida de <https://ingenieromarino.com/sistema-de-osmosis-inversa-como-generador-de-agua-dulce/>

Tubular

Este tipo de membranas está formado por una estructura cilíndrica en forma de carcasa que alberga membranas tubulares cuyas dimensiones van de trece a veinte centímetros de longitud y de medio a un centímetro de diámetro.

El agua de aporte es insertada por las membranas, es decir a lo largo del eje de la carcasa. El agua permeada es recogida por unos dispositivos adecuados en la dirección perpendicular al eje de revolución de la carcasa. De este modo, las sales quedan atrapadas en el volumen que encierran las membranas y la salmuera sale por el extremo opuesto por donde ha entrado el agua de aporte. En la Figura 11, se esquematiza la disposición de las membranas y las direcciones de los flujos de agua.

Las membranas tipo tubular fueron consideradas como alternativa a la configuración membrana plato-marco al inicio de la industria de desalación por ósmosis inversa. Sin embargo, la densidad de membranas respecto a las configuraciones de fibra hueca y en espiral, con su mayor coste económico asociado, ha hecho que hoy en día no se sigan utilizando.

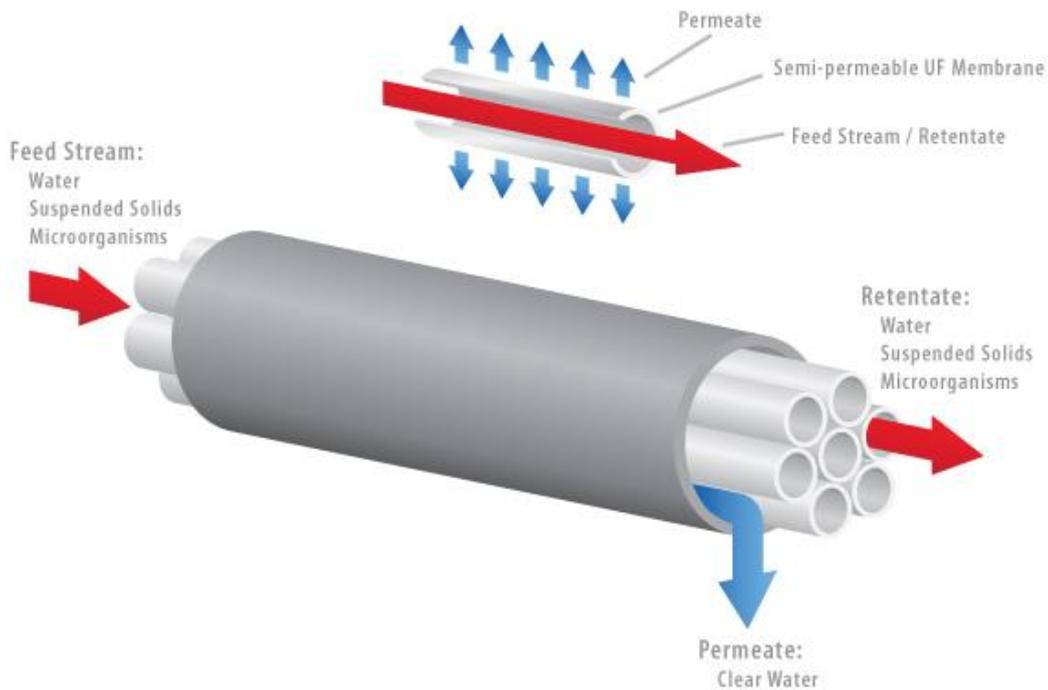


Figura 11. Esquema de las membranas tipo tubular. Recogida de <http://synderfiltration.com/learning-center/articles/module-configurations-process/tubular-membranes/>

Fibra hueca

La configuración de este tipo de membranas es muy similar a la membrana de tipo tubular; sin embargo, el diámetro de las membranas se encuentra alrededor de los centenares de micrómetros, lo que aumenta de manera considerable la superficie de membrana por volumen ocupado. En la Figura 12 se muestra las membranas de tipo fibra hueca.

Otras ventajas de las membranas de fibra hueca son que poseen una elevada resistencia a la presión y que son fáciles de instalar.

Por otra parte, al tener dimensiones del orden de micrómetros, las partículas en suspensión fluyen con mayor dificultad ocasionando problemas de suciedad difíciles de tratar y que, por tanto, reducen el rendimiento de la instalación.

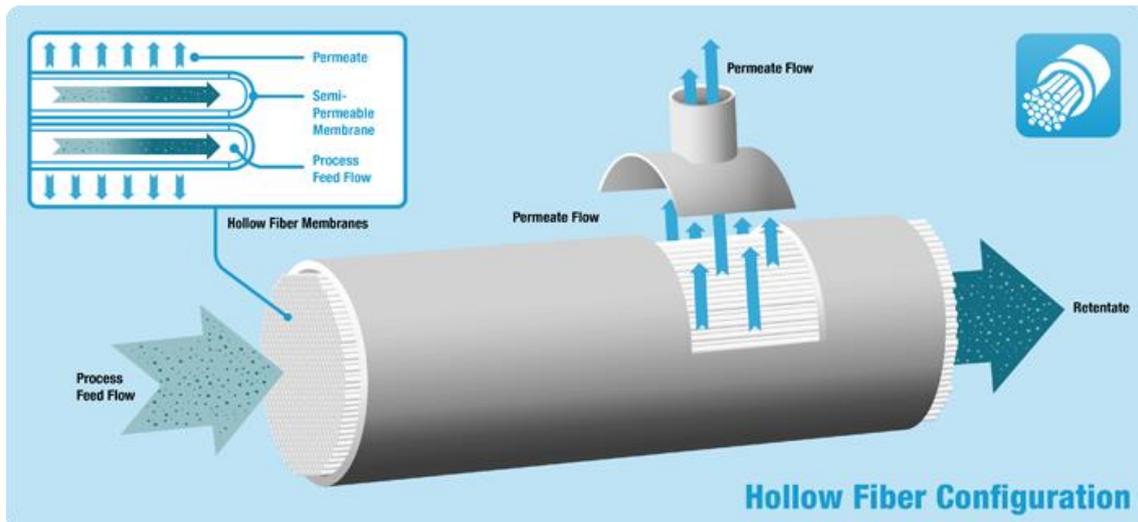


Figura 12. Configuración membrana fibra hueca. Recogida de <https://ingenieromarino.com/sistema-de-osmosis-inversa-como-generador-de-agua-dulce/>

Arrollamiento en espiral

Las membranas en espiral están compuestas por tres capas. Láminas semipermeables, dónde se realiza la desalación, láminas impermeables y malla. La capa activa de la membrana se sitúa en el exterior, por debajo de la malla.

Las membranas de esta configuración tienen forma de sobre cuya apertura desemboca en el colector, que permite recoger toda el agua pura conseguida de las diferentes membranas. En la Figura 13 se aprecia cómo los diferentes conjuntos de tres láminas se envuelven en sí mismas alrededor del colector.

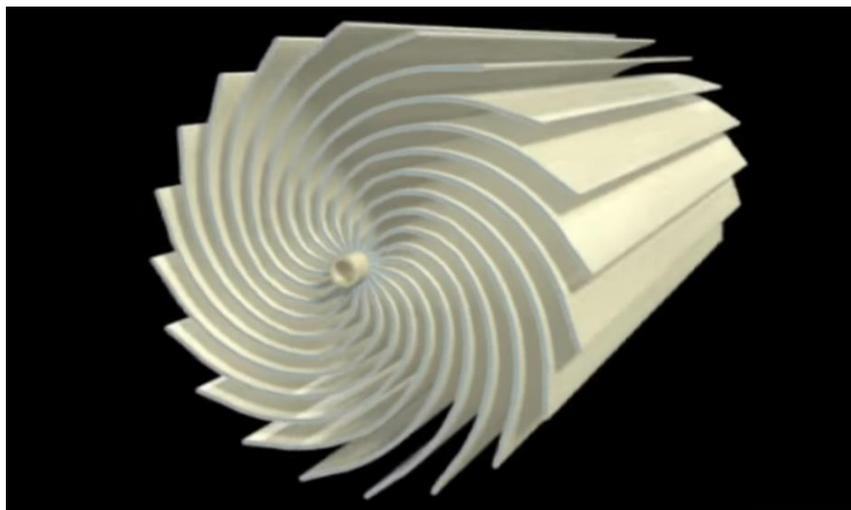


Figura 13. Disposición de las láminas en las membranas en espiral. Recogida de: <https://www.youtube.com/watch?v=VmIIAySHhKO>

La lámina impermeable tiene como función evitar el contacto entre el agua pura ya filtrada y el agua con una concentración en sales mayor.

Por otra parte, la malla, colocada encima de la membrana semipermeable, consigue unos canales hidráulicos que evitan la obstrucción y distribuyen de manera uniforme el agua de aporte.

De esta manera el flujo de agua de aporte se introduce de manera paralela al colector, pasa a través de la membrana y toma una trayectoria en espiral hacia el colector como se muestra en la Figura 14

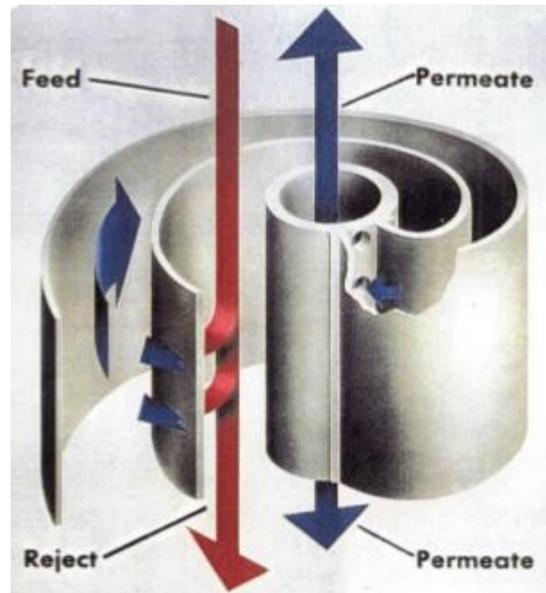


Figura 14. Trayectoria de los diferentes flujos en las membranas de espiral.. Recogida de: <https://www.slideshare.net/NelsonIzaguirreI/reverse-osmosis-module>

En la Figura 15 se representa la disposición de manera esquemática de los elementos que componen la membrana del tipo espiral.

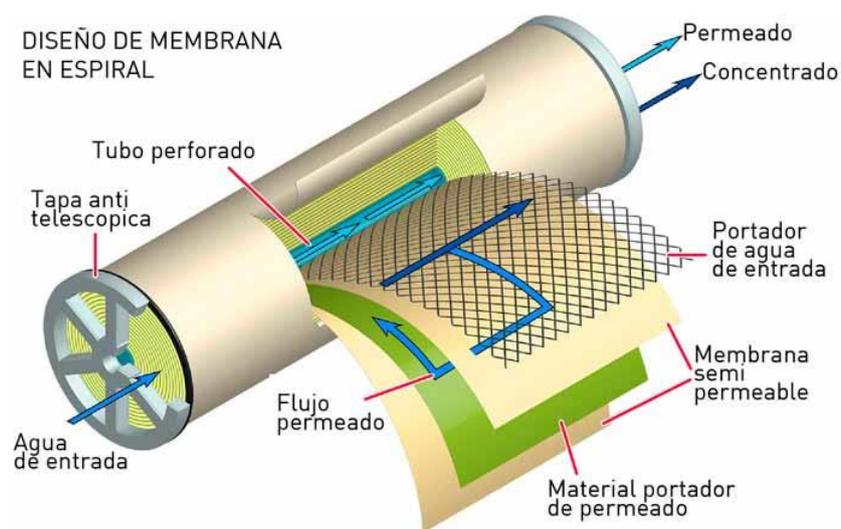


Figura 15. Configuración de las membranas en espiral. Recogida de: http://www.osmofilter.com/es/industrial_membranas

Este tipo de membranas presentan una serie de ventajas que han hecho que su uso actualmente se imponga frente al resto. Estas ventajas son:

- Mucho más económicas.
- Se ensucian menos, por lo que es posible utilizar agua de aporte más cargadas.
- Facilidad en las tareas de mantenimiento y reposición-
- Control más preciso de la calidad del agua permeada.

2.2.3.3. Sistemas de recuperación de energía

Todo proceso industrial está sujeto a la reducción de costos y la optimización. Una gran partida de los costes de operación de las plantas desaladoras es la energía, y de manera más específica, la bomba de alta presión.

La presión a la que se encuentra el caudal de salmuera es muy elevada. De hecho, se diferencia aproximadamente una atmósfera de la presión a la que sale el agua de alimentación por la bomba de alta presión debido a las pérdidas de carga que aparecen al pasar el agua por las membranas. [14] [16]

Por ello, a lo largo de los años se han estudiado diferentes tipos de recuperación de energía de este caudal para disminuir el consumo eléctrico de la bomba de alta presión y, así, reducir el coste de la operación de la planta.

En un principio no se utilizaban dispositivos de recuperación de energía (ERD), la salmuera era devuelta al mar y las membranas necesitaban presiones de hasta 105 bares para separar la sal contenida en el agua de aporte [18]. El consumo específico de energía de la operación requería 10 kWh/m³. Con un cambio en el material de las membranas de consiguió bajar este valor a 6.6 kWh/m³. La llegada de los ERDs permitió que el consumo específico de energía bajará a los 3kWh/m³ para desalar agua del mar y a 1 kWh/m³ para agua salobre [18].

A continuación, se describen brevemente los diferentes sistemas de recuperación de energía de las plantas desaladoras.

Turbina Francis.

Consiste en la incorporación de una bomba invertida movida por el caudal de salmuera. Este sistema es poco flexible con las variaciones de operación de la planta. Es por ello, que actualmente ya no se utilizan.

Turbina Pelton.

La turbina Pelton mejora el rendimiento de la recuperación en comparación con la turbina Francis. Además, elimina la falta de flexibilidad de la anterior turbina ya que admite variaciones de presión en el caudal de la salmuera sin que afecte al rendimiento de la turbina.

La energía se utiliza para reducir el consumo energético de la bomba de alta presión. En la Figura 16, se muestra la turbina Pelton.

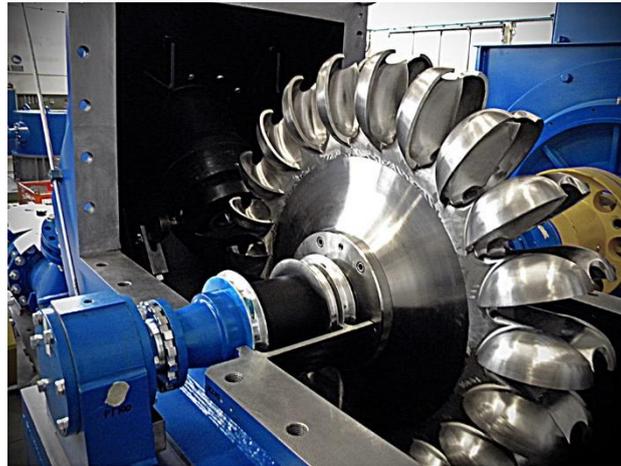


Figura 16. Turbina Pelton. Recogida de: <https://www.zeco.it/zeco-turbinas/turbina-pelton?lang=es>

En la Figura 17 se muestra un diagrama de bloques que muestra el acoplamiento de la turbina con la planta.

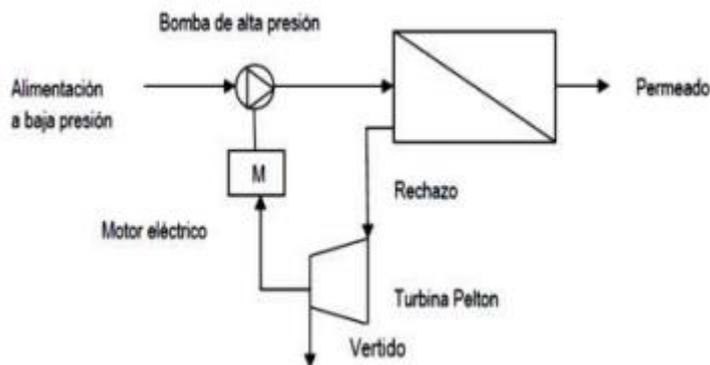


Figura 17. Acoplamiento de la turbina Pelton en la planta desaladora.

En la actualidad la turbina Pelton ha quedado desfasada debido al incremento del consumo específico respecto a los siguientes sistemas.

Turbobomba y turbocharger

La turbobomba consiste en la unión de la bomba y la turbina inversa en un mismo eje. Esta solución es más compacta que las alternativas anteriores. Por otra parte, el turbocharger tiene un planteamiento similar, pero tiene un tamaño mucho menor.

El objetivo del turbocharger es convertir la energía hidráulica del caudal de rechazo en energía mecánica que pueda ser aprovechada por la bomba y, así, aumentar la presión del fluido.

En la Figura 18 se representa como la bomba de alta presión es la encargada de proporcionar el impulso de presión de A a C, mientras que el turbocharger el aumento de presión de E a C. Una vez que el agua pasa por el módulo de ósmosis inversa, un caudal

de rechazo I a alta presión es conducido hasta el turbocharger donde su presión es eliminada. Finalmente es devuelta al mar como caudal H.

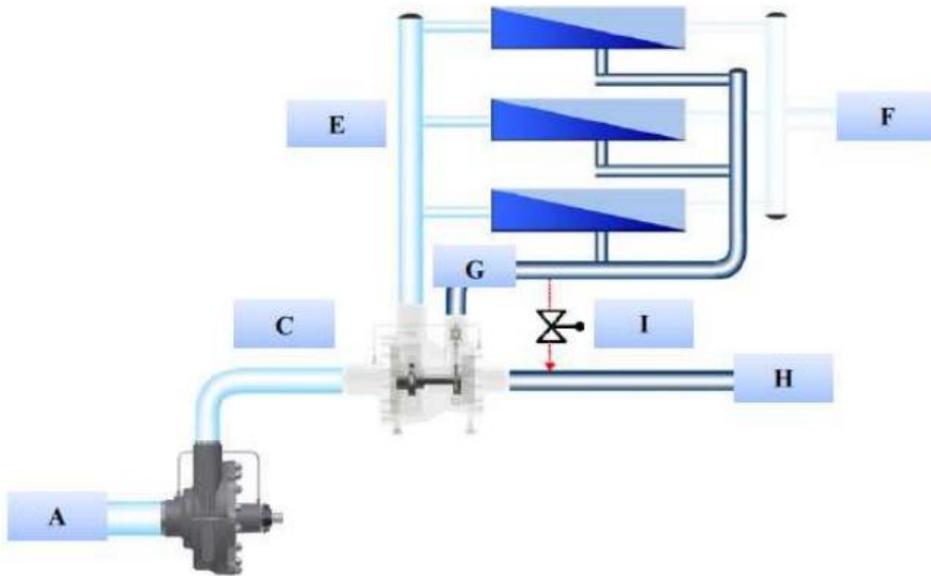


Figura 18. Sistema de ósmosis inversa equipado con Turbocharger. Recogido de: <http://docplayer.es/48031019-Dep-ingenieria-energetica-escuela-tecnica-superior-de-ingenieria-universidad-de-sevilla.html>

Cámaras de intercambio de presión

El funcionamiento de las cámaras de intercambio de presión se basa en el intercambio de presión, valga la redundancia, entre dos corrientes de agua a través de cilindros y pistones.

A continuación, en Figura 19, se muestra un diagrama simplificado del proceso de ósmosis inversa con una cámara de intercambio de presión acoplada.

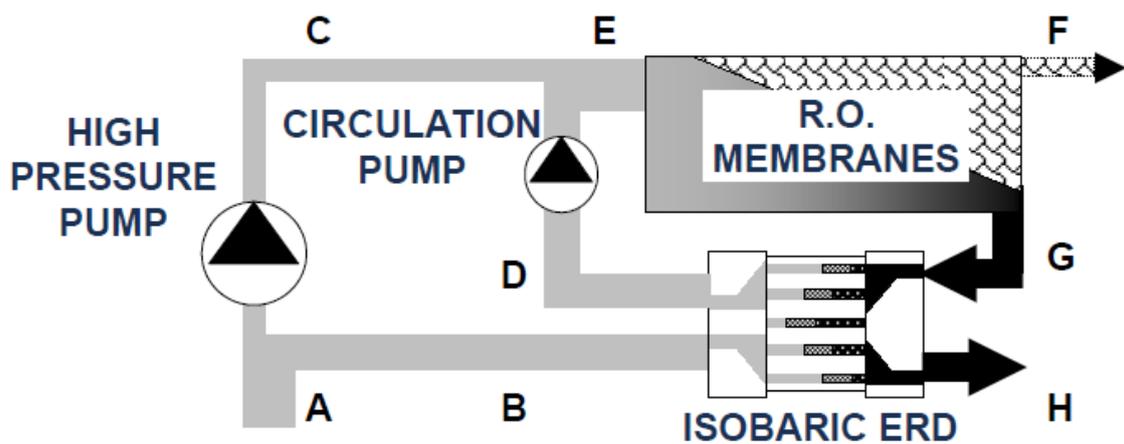


Figura 19. Diagrama simplificado del proceso de OI con una cámara de intercambio de presión. Recogido de [17]

Existen dos grupos: las cámaras de rotación y de desplazamiento.

- Cámaras de presión de desplazamiento.

Para explicar el funcionamiento de este tipo de sistema de recuperación de energía se va a utilizar la Figura 20. Principio de funcionamiento de las cámaras de intercambio de presión. Recogido de [14]

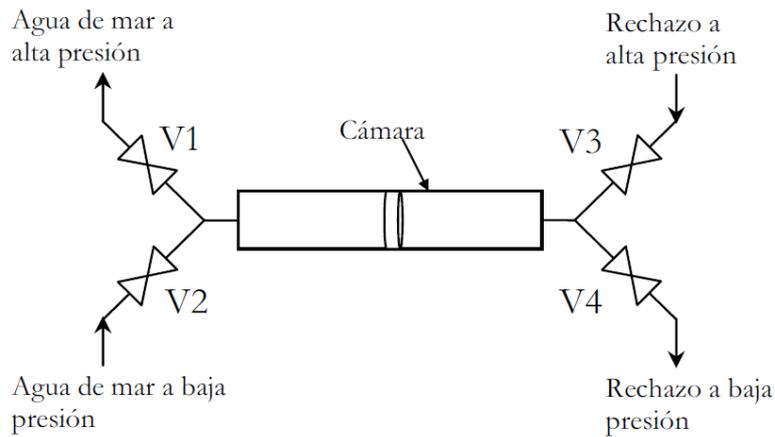


Figura 20. Principio de funcionamiento de las cámaras de intercambio de presión. Recogido de [14]

El dispositivo utilizado en el sistema de recuperación por intercambio de presión es básicamente un cilindro provisto de un pistón en su interior que evita que las dos disoluciones de alimentación y rechazo estén en contacto.

En una primera etapa las válvulas V1 y V3 se encuentran cerradas, mientras que las V2 y V4 están abiertas. Esto permite que el cilindro se llene de agua del mar a baja presión y el agua de rechazo que hubiese en el cilindro desaparezca.

Seguidamente, se cierran las válvulas V2 y V4 y se abren las válvulas V1 y V3. De este modo, el agua de rechazo a alta presión empieza a entrar en el cilindro, evacuando el agua de alimentación e inyectándole gran parte de su presión.

Así se van intercalando los dos anteriores pasos, consiguiendo una transferencia de presión entre los dos caudales.

- Cámaras de presión de rotación.

Son parecidas a las cámaras de desplazamiento, pero utilizan un rotor cilíndrico en lugar de válvulas y pistones moviéndose la propia cámara en lugar de las válvulas. En la Figura 21 se representa este tipo de cámara.

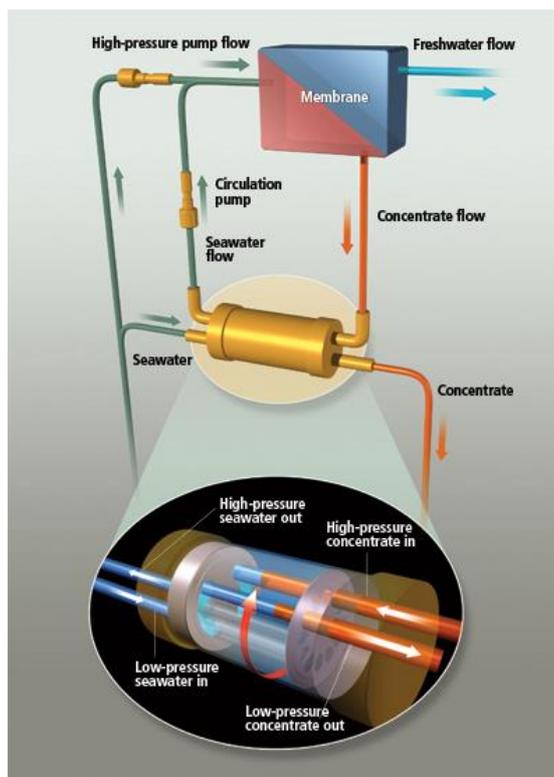


Figura 21. Cámara de intercambio de presión por rotación. Recogido de <https://www.eoi.es/blogs/mateomontero/2014/02/17/optimizacion-energetica-en-plantas-desaladoras/>

Los sistemas de recuperación de energía de intercambio de presión consiguen una eficiencia de transferencia superior al 95%. Gracias a estos dispositivos, el consumo energético de las plantas desaladoras ha disminuido considerable hasta alcanzar valores inferiores a 3 kWh/m³ [18].

Sus ventajas más destacadas son la flexibilidad de operación y la maximización de la productividad y la eficiencia del proceso para diferentes condiciones de alimentación.

Por ello, se han impuesto frente al resto de sistemas de recuperación y cada vez es más normal verlas implantadas en la industria de la desalación por ósmosis inversa.

2.3. Modelo teórico del consumo energético de una planta desaladora

En el presente apartado, una vez que estudiadas las diferentes etapas del proceso de producción de agua dulce por ósmosis inversa y los elementos que consumen energía, se exponen las partidas energéticas de las diferentes etapas y se propone una expresión para modelar el consumo energético de la planta en función de la demanda de agua.

Los componentes que representan un mayor consumo energético en el proceso de producción de la desalación por ósmosis inversa son las bombas de alta presión, la

utilizada en el sistema de recuperación de energía o la encargada del transporte del agua desde el mar a la planta.

En la siguiente Figura 22, se representa en un diagrama los porcentajes del consumo energético de las plantas desaladoras por ósmosis inversa.

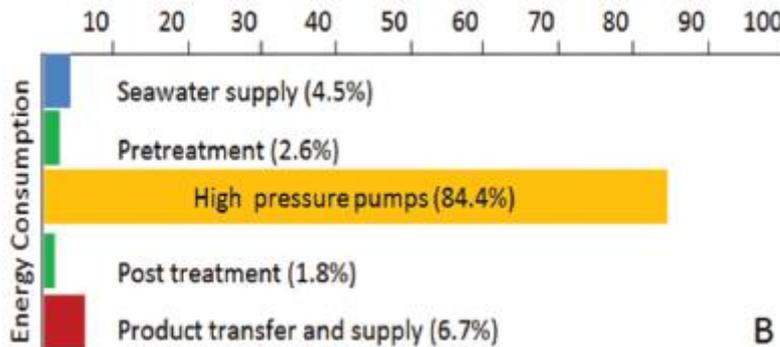


Figura 22. Consumos energéticos de una planta desaladora por ósmosis inversa. Recogido de: [18]

Como se puede apreciar, la mayor partida de consumo energético recae sobre las bombas de alta presión utilizadas en la etapa de ósmosis inversa.

En un principio, se modela el consumo energético de la planta únicamente con la fase de ósmosis inversa que incluye las bombas de alta presión y la bomba booster utilizada en el dispositivo de recuperación de energía (ERD).

Para explicar el modelo matemático que simula el consumo energético de la planta, se presenta el funcionamiento de la etapa de ósmosis inversa en una planta desaladora de una única etapa y un solo paso plasmado en la Figura 23. El superíndice OI se refiere a los flujos que entran y salen del módulo de ósmosis inversa. Por otra parte, los superíndices IP y AP designan a los flujos que atraviesan el intercambiador de presión y la bomba de presión respectivamente. Además, en la figura se han señalado los flujos de alimentación, producto y rechazo con los subíndices A, P y R.

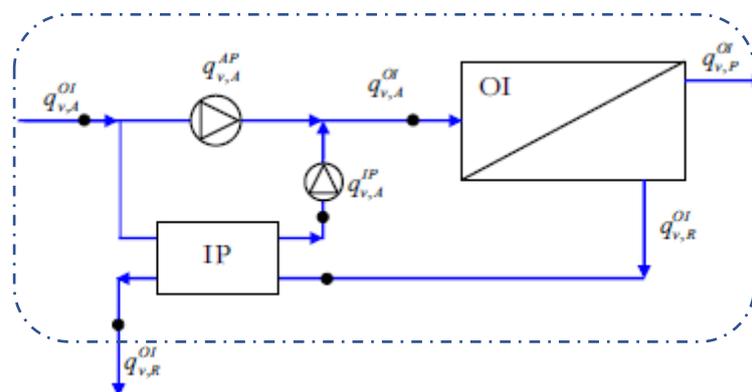


Figura 23. Diagrama de bloques de la etapa de ósmosis inversa. Recogido de: [14]

El módulo OI está compuesto por varios tubos de presión dispuestos en paralelo con membranas de arrollamiento en espiral conectadas en serie dentro de estos tubos

(normalmente de seis a ocho). Este conjunto de tubos conectados paralelamente recibe el nombre de bastidor.

El módulo IP (intercambiador de presión) representa el dispositivo de recuperación de energía que se utiliza en la actualidad por sus ventajas frente a otro tipo de recuperadores de energía. Por otra parte, la bomba booster que le precede tiene la función de recuperar las pérdidas de presión ocurridas en los bastidores y en el propio intercambiador de presión. La caída de presión entre la salida de la bomba de alta presión y la entrada de la bomba de circulación se sitúa alrededor de 1,5 atmósferas [14], [16].

En los sistemas de desalación por ósmosis inversa, un parámetro importante de diseño y de operación es la conversión del sistema y está definido por la siguiente fórmula:

$$Y = 100 \cdot f_r = 100 \cdot \frac{q_P^{OI}}{q_A^{OI}} \quad (2)$$

Donde f_r es el factor de conversión del sistema y q_P^{OI} y q_A^{OI} son los caudales de permeado y de alimentación que salen y entran en el módulo de ósmosis inversa respectivamente.

Además, la temperatura se mantiene aproximadamente constante a lo largo del proceso [14].

Como se explicó anteriormente, el flujo de agua que entra en el intercambiador de presión es el mismo que el flujo de agua saliente. Así, estableciendo un volumen de control (delimitado en línea discontinua) como se muestra en la Figura 23, se observa que el caudal que entra en el sistema es idéntico a la suma del caudal de permeado y el caudal de rechazo. Además, se cumple que el caudal que pasa por la bomba de alta presión es el mismo que el caudal permeado:

$$q_A^{OI} = q_P^{OI} + q_R^{OI} \quad ; \quad q_A^{IP} = q_R^{OI} \quad ; \quad q_A^{AP} = q_P^{OI}$$

Se definen, por otra parte, los superíndices BP, PI, AP a los caudales con baja presión, presión intermedia y alta presión respectivamente.

- Baja presión: la presión de alimentación a la bomba y la presión a la que sale el rechazo por el intercambiador de presión.
- Alta presión: la que poseen los flujos de agua justo al salir por la bomba de alta presión y por la bomba booster.
- Presión intermedia: la presión que tienen los flujos de permeado y de rechazo tras pasar por el módulo de ósmosis inversa. Como ya se ha comentado anteriormente, la presión intermedia está de una a dos atmósferas por debajo de la presión de alta presión.

Las diferentes zonas de presión se representan en la siguiente Figura 24:

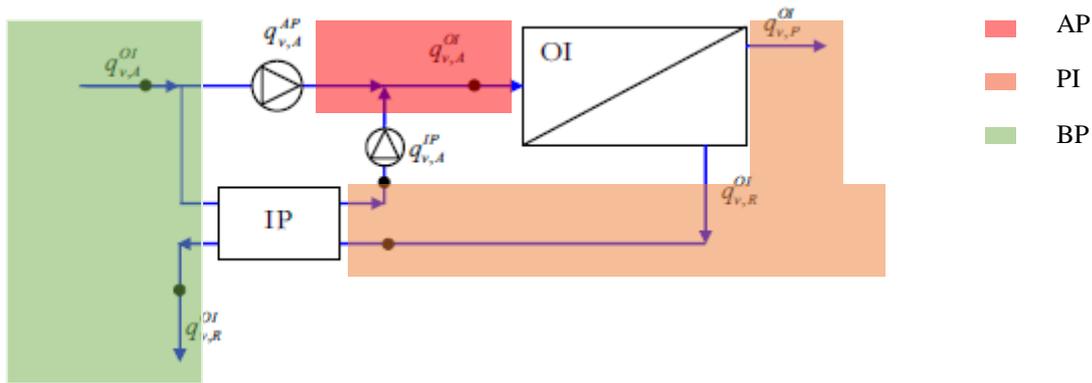


Figura 24. Representación de las diferentes presiones que se dan en el proceso de ósmosis inversa. Fuente: Elaboración propia.

El consumo energético de la fase de ósmosis inversa (P_W^{OI}) es la suma de los consumos energéticos de la bomba de alta presión (P_W^{AP}) y de la bomba de circulación (P_W^C). Este consumo se puede expresar en función de los flujos, las variaciones de presión y los rendimientos de las bombas (η_{AP} , η_c).

$$P_W^{OI} = P_W^{AP} + P_W^C = \frac{q_A^{AP} \cdot (P_A^{AP} - P_A^{BP})}{\eta_{AP}} + \frac{q_A^{IP} \cdot (P_A^{AP} - P_A^{PI})}{\eta_c} \quad (3)$$

Teniendo en cuenta las ecuaciones (2) y (4) la fórmula anterior se puede expresar en función del caudal permeado (demanda), el factor de conversión y las diferentes presiones:

$$P_W^{OI} = P_W^{AP} + P_W^C = q_P^{OI} \cdot \left[\frac{(P_A^{AP} - P_A^{BP})}{\eta_{AP}} + \frac{(1 - f_r) \cdot (P_A^{AP} - P_A^{PI})}{f_r \cdot \eta_c} \right] \quad (4)$$

Así, el consumo energético de una planta de desalación depende de manera directa del caudal de permeado y las diferencias de presión y otros factores como el rendimiento y el factor de conversión.

Sin embargo, estos rendimientos son prácticamente constantes para ciertos valores de caudal y su valor depende de la bomba de alta presión o bomba de circulación que se utilicen. Además, en numerosos artículos se menciona que la conversión de la planta con membranas de arrollamiento en espiral debe estar en torno al 45% para conseguir una operación óptima. [14], [19], [20] y [21].

Este valor de conversión para membranas de arrollamiento en espiral se debe a la reducción importante del consumo específico. En la Figura 25 se muestran valores de conversión frente a consumo energético específico para diferentes tipos de membranas.

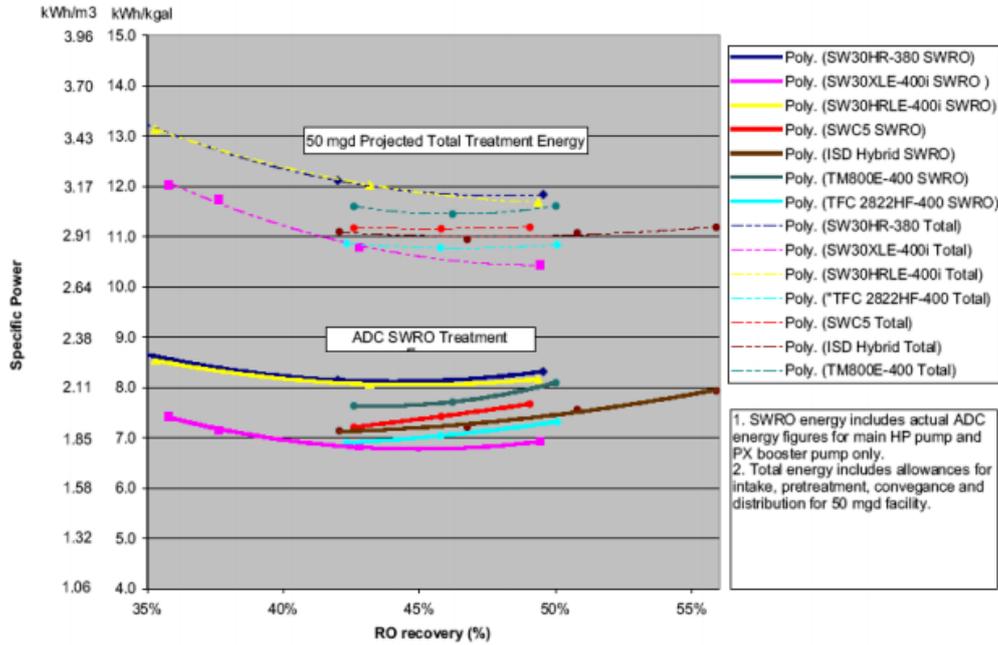


Figura 25. Conversión vs consumo específico para diferentes membranas. Recogido de [22]

Se comprueba como el consumo específico menor se da para valores cercanos a 45% de conversión, por lo que es un valor que se utiliza en la actualidad para el diseño y la operación de los sistemas de desalación por ósmosis inversa.

Volviendo al desarrollo de la ecuación número (4), una vez comprobado que la conversión es constante, el consumo energético depende únicamente de la demanda o caudal permeado y de las variaciones de presión, además del rendimiento, que se supone constante en un determinado rango de caudal.

De hecho, únicamente depende del caudal permeado y del valor de alta presión debido a que la presión en la zona de baja presión es constante (presión atmosférica) y la presión intermedia es aproximadamente 1.5 atmósferas inferior a la de alta presión [14]. Así, la ecuación (4) se puede reescribir como sigue:

$$\begin{aligned}
 P_W^{OI} &= P_W^{AP} + P_W^C = q_P^{OI} \cdot \left[\frac{(P_A^{AP} - P_{atm})}{\eta_{AP}} + \frac{(1-f_r) \cdot (P_A^{AP} - (P_A^{AP} - 1.5))}{f_r \cdot \eta_C} \right] = \\
 &= q_P^{OI} \cdot \left[\frac{(P_A^{AP} - P_{atm})}{\eta_{AP}} + \frac{(1-f_r) \cdot (P_A^{AP} + 1.5)}{f_r \cdot \eta_C} \right] \quad (5)
 \end{aligned}$$

Para conseguir una expresión que dependa únicamente del caudal permeado, la presión conseguida a la salida de la bomba de alta presión se puede poner en función de este caudal. Por otra parte, el rendimiento no es constante si el caudal permeado sale de cierto rango de caudales. Sin embargo, se puede expresar en función del caudal permeado. Así, se consigue tener una función de consumo energético en función del caudal permeado. Se utiliza la curva característica de una bomba de alta presión común para ello.

En la Figura 26 se plasma la curva característica de una bomba de alta presión con diferentes velocidades del motor (rpm). En el eje de abscisas se recogen los diferentes caudales a los que puede trabajar la bomba y en el de ordenadas la presión (en metros columna de agua). Además, también se plasma la eficiencia de la bomba según la velocidad de esta y del caudal permeado.

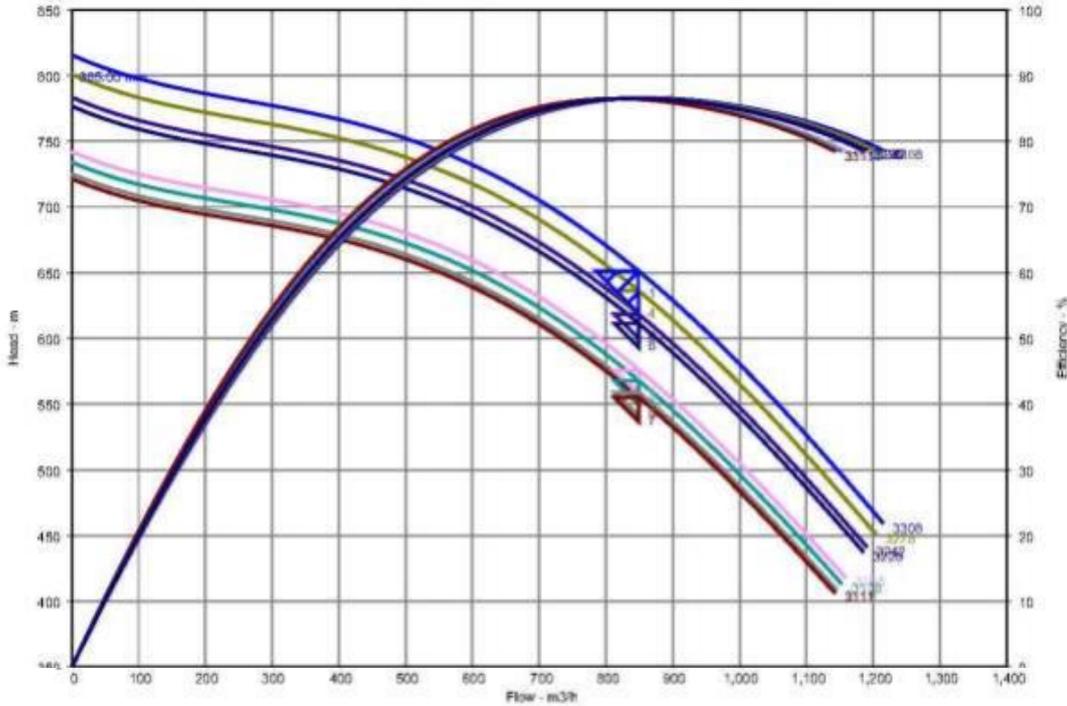


Figura 26. Curva característica de una bomba de alta presión con recuperador de energía de intercambio de presión. Recogido de: SULZER – fabricantes de bombas.

De la anterior curva, linealizando, se obtiene una función a tramos:

$$P_A^{AP} = -\frac{7}{600} \cdot q_A^{OI} + 75 \quad 500 \leq q_A^{OI} < 600 \quad (6)$$

$$P_A^{AP} = -\frac{2}{50} \cdot q_A^{OI} + 92 \quad q_A^{OI} \geq 600 \quad (7)$$

Finalmente, el consumo energético se expresa únicamente en función del caudal permeado en las ecuaciones $P_W^{OI} = q_P^{OI} \cdot \left[\frac{(P_A^{AP} - P_{atm})}{\eta_{AP}} + \frac{(1-f_r) \cdot (P_A^{AP} + 1.5)}{f_r \cdot \eta_C} \right] =$

$$q_P^{OI} \left[\frac{\left(-\frac{7}{600} \cdot q_A^{OI} + 75 - P_{atm} \right)}{\eta_{AP}} + \frac{(1-f_r) \cdot \left(-\frac{7}{600} \cdot q_A^{OI} + 75 + 1.5 \right)}{f_r \cdot \eta_C} \right]; \quad q_A^{AP} < 600 \quad (8) \text{ y } P_W^{OI} =$$

$$q_P^{OI} \cdot \left[\frac{(P_A^{AP} - P_{atm})}{\eta_{AP}} + \frac{(1-f_r) \cdot (P_A^{AP} + 1.5)}{f_r \cdot \eta_C} \right] = q_P^{OI} \left[\frac{\left(-\frac{2}{50} \cdot q_A^{OI} + 92 - P_{atm} \right)}{\eta_{AP}} + \frac{(1-f_r) \cdot \left(-\frac{2}{50} \cdot q_A^{OI} + 92 + 1.5 \right)}{f_r \cdot \eta_C} \right];$$

$q_A^{AP} \geq 600 \quad (9)$, dependiendo si el caudal de permeado es mayor o menor a 600 m³/h.

$$P_W^{OI} = q_P^{OI} \cdot \left[\frac{(P_A^{AP} - P_{atm})}{\eta_{AP}} + \frac{(1-f_r) \cdot (P_A^{AP} + 1.5)}{f_r \cdot \eta_C} \right] = q_P^{OI} \left[\frac{\left(\frac{7}{600} \cdot q_A^{OI} + 75 - P_{atm} \right)}{\eta_{AP}} + \frac{(1-f_r) \cdot \left(\frac{7}{600} \cdot q_A^{OI} + 75 + 1.5 \right)}{f_r \cdot \eta_C} \right]; \quad q_A^{AP} < 600 \quad (8)$$

$$P_W^{OI} = q_P^{OI} \cdot \left[\frac{(P_A^{AP} - P_{atm})}{\eta_{AP}} + \frac{(1-f_r) \cdot (P_A^{AP} + 1.5)}{f_r \cdot \eta_C} \right] = q_P^{OI} \left[\frac{\left(\frac{2}{50} \cdot q_A^{OI} + 92 - P_{atm} \right)}{\eta_{AP}} + \frac{(1-f_r) \cdot \left(\frac{2}{50} \cdot q_A^{OI} + 92 + 1.5 \right)}{f_r \cdot \eta_C} \right]; \quad q_A^{AP} \geq 600 \quad (9)$$

Las ecuaciones anteriores, han sido calculadas con un rendimiento constante para un rango determinado del caudal permeado. Sin embargo, para caudales menores a 500 m³/h, esta ecuación no es válida.

Con el fin de poder trabajar con caudales menores a 500 m³/h, podemos parametrizar la curva del rendimiento en función del caudal permeado. Así, una buena aproximación sería ajustar el rendimiento por una curva senoidal. En concreto por la curva:

$$\eta_{AP} = 88 \cdot \sin(0.0186 \cdot q_P^{OI}) \quad (10)$$

En la Figura 27, se muestra que esta aproximación es bastante leal a la realidad y, más concretamente para valores cercanos al punto óptimo de trabajo.

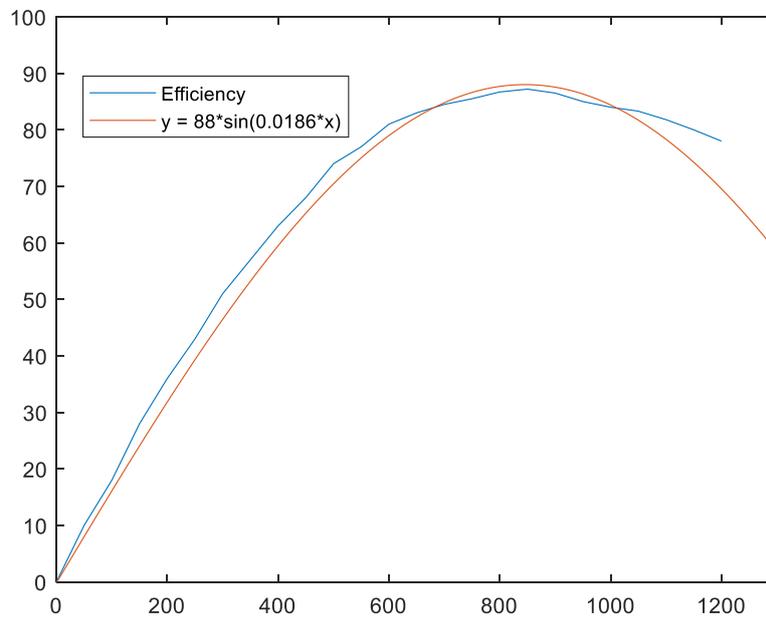


Figura 27. Aproximación del rendimiento de la bomba de alta presión.
Fuente: elaboración propia.

Finalmente, el consumo energético se expresa únicamente en función del caudal permeado en las ecuaciones (12) y (13), para un rango de caudal nulo hasta 1200 m³/h, que es el punto de operación límite de la bomba de alta presión.

$$P_W^{OI} = q_P^{OI} \cdot \left[\frac{(P_A^{AP} - P_{atm})}{\eta_{AP}} + \frac{(1-f_r) \cdot (P_A^{AP} + 1.5)}{f_r \cdot \eta_C} \right] = q_P^{OI} \left[\frac{\left(-\frac{7}{600} \cdot q_P^{OI} + 75 - P_{atm} \right)}{88 \cdot \sin(0.0186 \cdot q_P^{OI})} + \frac{(1-f_r) \cdot \left(-\frac{7}{600} \cdot q_P^{OI} + 75 + 1.5 \right)}{f_r \cdot \eta_C} \right] \quad 500 \leq q_A^{OI} < 600 \quad (11)$$

$$P_W^{OI} = q_P^{OI} \cdot \left[\frac{(P_A^{AP} - P_{atm})}{\eta_{AP}} + \frac{(1-f_r) \cdot (P_A^{AP} + 1.5)}{f_r \cdot \eta_C} \right] = q_P^{OI} \left[\frac{\left(-\frac{2}{50} \cdot q_P^{OI} + 92 - P_{atm} \right)}{88 \cdot \sin(0.0186 \cdot q_P^{OI})} + \frac{(1-f_r) \cdot \left(-\frac{2}{50} \cdot q_P^{OI} + 92 + 1.5 \right)}{f_r \cdot \eta_C} \right] \quad q_A^{AP} \geq 600 \quad (12)$$

En la Figura 28, se muestra el consumo eléctrico de la desaladora dependiendo del caudal permeado.

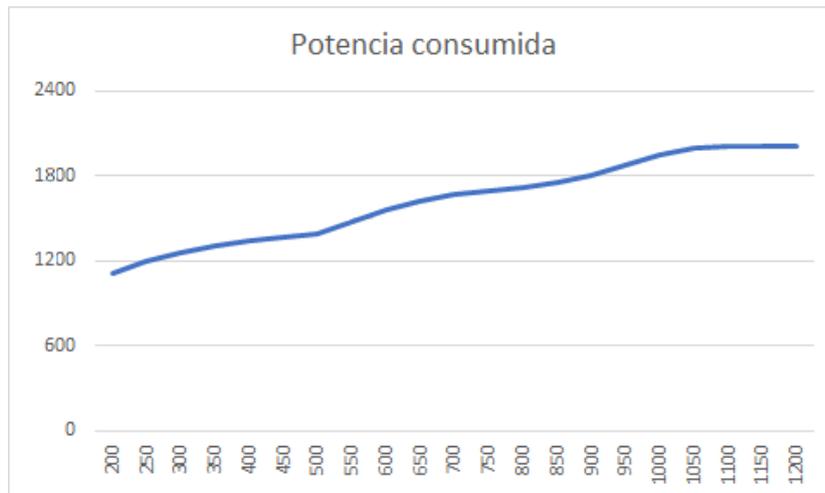


Figura 28. Potencia consumida por la desaladora en función del caudal permeado. Fuente: Elaboración propia.

2.4. Modelo práctico del consumo energético de una planta desaladora

Con el fin de no trabajar con modelos excesivamente complicados que aumentarían la carga computacional y dificultarían a efectos prácticos la resolución del problema propuesto, a continuación, se va a exponer un modelo del consumo energético de una planta desaladora basado en una gráfica (Figura 29) de un fabricante de bombas de alta presión que relaciona directamente el consumo de potencia eléctrica (kW) con el caudal permeado de la planta (m³/h) y que es muy similar a la obtenida en el apartado anterior, como se puede ver en la Figura 28.

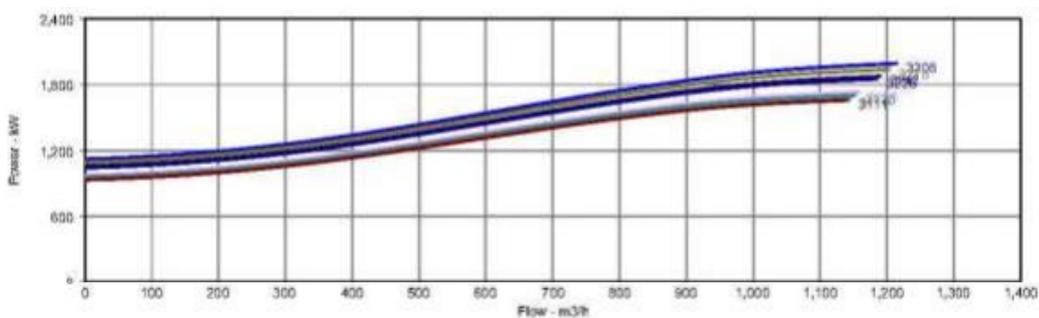


Figura 29. Curva Potencia consumida vs caudal permeado. Source: SULZER – fabricantes de bombas.

De manera general, el consumo eléctrico para una desaladora común se puede aproximar a una recta en la forma:

$$P_W^{OI} = b + m q_P^{OI} \quad (13)$$

Concretando en la desaladora aportada por el fabricante SULZER, Figura 29, la recta escogida tiene la siguiente expresión:

$$P_W^{OI} = 1150 + \frac{17}{24} q_P^{OI} \quad (14)$$

En la siguiente figura se recoge la potencia consumida para el mayor y el menor rendimiento comparada con la aproximación realizada en la ecuación (12)

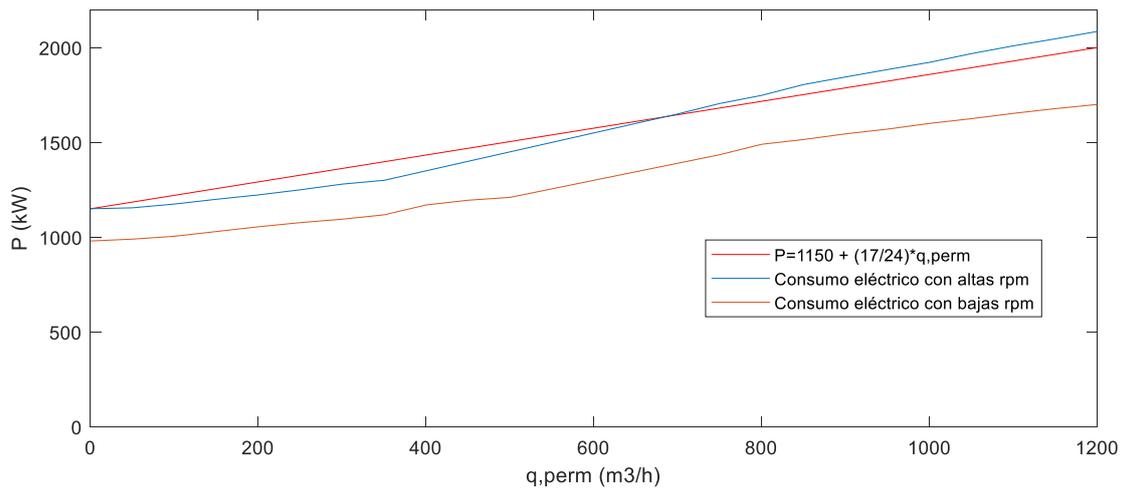


Figura 30. Aproximación lineal de la potencia eléctrica consumida según el caudal permeado por la bomba de alta presión. Fuente: Elaboración propia.

3. Modelo de la operación de un sistema con nexo agua-energía.

3.1. Unit commitment

Esta sección describe el modelo matemático de despacho económico. El despacho económico se formula como un problema de optimización lineal entera mixta. Se entiende en este contexto como generación cualquier elemento capaz de generar potencia activa e inyectarla al sistema. El objetivo es minimizar el coste variable total de generación teniendo en cuenta las restricciones con respecto a la operación de los grupos y a la operación del sistema aislado.

3.1.1. Función objetivo

Esta subsección detalla la función objetivo. La función objetivo minimiza el coste variable de generación sobre el horizonte temporal del despacho, entendiendo como generación cualquier elemento capaz de generar potencia activa e inyectarla al sistema. La siguiente ecuación describe la función objetivo.

$$\min_{P_{g,h}, u_{g,h}} \sum_{h \in T} \sum_{g \in G} (c_{g,h}) \quad (15)$$

Donde los costes se definen como la suma de los costes variables de los grupos generadores g en la hora h , los costes arranque y los costes de parada.

$$c_{g,h} = c_{g,h}^{var} + c_{g,h}^{start-up} + c_{g,h}^{shut-down} \quad (16)$$

Estos costes variables, a su vez, se desglosan en los costes fijos del grupo generador g (multiplicados por la variable binaria) más el término lineal del coste variable del grupo generador g , más el término cuadrático del coste variable del grupo generador g .

$$c_{g,h}^{var} = C_g^{fix} \cdot \delta_{g,h} + C_g^{lin} \cdot p_{g,h}^e + C_g^{qua} \cdot (p_{g,h}^e)^2 \quad \forall g, h \quad (17)$$

Los costes de arranque están definidos como una constante, al igual que los costes de parada.

$$c_{g,h}^{start-up} = C_g^{start-up} \cdot cx_{g,h} \quad \forall g, h \quad (18)$$

$$c_{g,h}^{shut-down} = C_g^{shut-down} \cdot dx_{g,h} \quad \forall g, h \quad (19)$$

3.1.2. Restricciones.

En esta sección, se detallan las ecuaciones que implantan las restricciones relacionadas con el sistema y con los elementos.

La restricción relativa al sistema es el balance de la demanda eléctrica en cada hora h y el balance de la demanda de agua en cada hora h .

Mientras que en las restricciones relativas a los elementos tenemos:

- Los límites de potencia activa de los grupos generadores g .
- Los límites de rampa de los grupos generadores g .
- Decisiones de arranque y parada de los grupos generadores g .
- Los límites del embalse dónde se almacena el agua permeada.
- El caudal de agua permeada por la planta desaladora.

3.1.2.1. Balance de la demanda eléctrica

El balance de la demanda eléctrica en la hora h se describe como:

$$D_h^e = \sum_g P_{g,h}^{e,net} - p_{e,h}. \quad (20)$$

Como se observa en la ecuación (21), el término de la demanda se incluye el gasto energético de la planta desaladora según el caudal permeado de agua. Este consumo energético está representado en la ecuación con el término $(p_{e,h})$.

Sin embargo, ya que el consumo energético se modeliza como $p_{e,h} = b + m q_p^{OI}$, se debe utilizar una variable dual para que cuando el caudal permeado por la desaladora sea nulo, no se la añada ningún término extra a la demanda eléctrica:

$$D_h^e = \sum_g P_{g,h}^{e,net} - \gamma \cdot b + m \cdot q_p^{OI} \quad (21)$$

Donde γ es una variable dual que toma el valor 1 cuando el caudal permeado no es nulo, y 0 cuando la planta desaladora no está funcionando o su caudal permeado es nulo.

Por otra parte, la potencia neta generada por el grupo generador g en la hora h , es la suma de la potencia generada una vez conectado el grupo generador y las potencias generadas durante el arranque y la parada del mismo. El grupo generador se considera conectado si opera por encima de su mínimo técnico P_g^{\min} .

$$P_{g,h}^{e,net} = P_{g,h}^e + \sum_{i=1}^{n_{SU}-1} (P_{g,i}^{SU} \cdot cx_{g,h-i+n_{SU}}) + \sum_{i=2}^{n_{SD}} (P_{g,i}^{SD} \cdot dx_{g,h-i+2}) \quad \forall g, h \quad (22)$$

De acuerdo con esta última ecuación, el arranque y la parada de un grupo generador g tarda un determinado tiempo durante el cual el grupo generador sigue generando e inyectando a la red potencia activa. La Figura 31 ilustra el arranque y la parada de un grupo generador. Se ha supuesto que la potencia que se genera durante el arranque y la parada es una función lineal del tiempo y de acuerdo con la duración del arranque y de la parada.

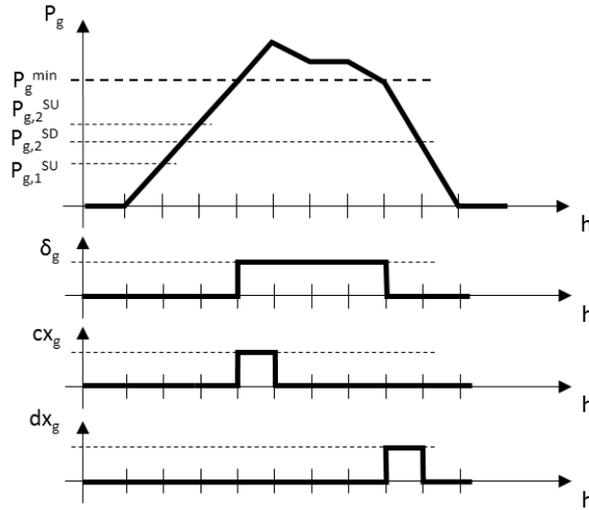


Figura 31. Ilustración del arranque y de la parada de un grupo generador g .

3.1.2.2. Balance de la demanda de agua

El agua demandada en cada hora h debe ser suplida por el caudal permeado por la desaladora en esa hora y/o por el agua almacenada en el embalse en horas anteriores.

Para que esta condición se cumpla, la restricción necesaria que hay que introducir en el unit commitment se representa en la ecuación (24).

$$N_h - N_{h-1} - q_{p,h}^{OI} = - D_h^{agua} \quad (23)$$

3.1.2.3. Balance neto cero de la demanda gestionable

El balance neto cero de la demanda gestionable implanta el requisito sobre la demanda gestionable que sobre un horizonte determinado (e.g., durante las horas laborales de un día laboral), la energía movida por la gestión de la demanda es cero. Es un requisito típico por ejemplo para procesos de fabricación o procesos aplazables.

$$\sum_{i \in IC^{D.dr}} (p_{dr,i}^{down} - p_{dr,i}^{up}) = 0 \quad (24)$$

3.1.2.4. Límites de potencia activa

La potencia activa generada (y/o consumida) por cada grupo generador g en la hora h está limitada.

$$P_g^{\min} \cdot \delta_{g,h} \leq p_{g,h}^e \leq P_g^{\max} \cdot \delta_{g,h} - (P_g^{\max} - P_g^{\min}) \cdot (dx_{g,h+1} + cx_{g,h}) \quad \forall g, h \quad (25)$$

La siguiente ecuación limita el aumento y la reducción de la potencia demandada de cada demanda gestionable dr en la hora h .

$$\begin{aligned} P_{dr}^{up,\min} &\leq p_{dr,h}^{up} \leq P_{dr}^{up,\max} \quad \forall dr, h \\ P_{dr}^{down,\min} &\leq p_{dr,h}^{down} \leq P_{dr}^{down,\max} \quad \forall dr, h \end{aligned} \quad (26)$$

3.1.2.5. Límites de rampa de los grupos generadores

Como se comentó en apartados anteriores, las unidades térmicas cogen y dejan carga de manera gradual y la función de la restricción de las rampas es que se tenga en cuenta a la hora de realizar el despacho económico.

$$-R_g^{down} \leq p_{g,h}^{e,net} - p_{g,h-1}^{e,net} \leq R_g^{up} \quad \forall g, h \quad (27)$$

3.1.2.6. Decisiones de arranque y parada

Una vez que una unidad térmica ha empezado a funcionar, no puede volver a apagarse hasta que haya transcurrido un tiempo mínimo que asegure una temperatura uniforme en la generadora, más concretamente en la turbina. De manera semejante, debe transcurrir un tiempo mínimo para volver a iniciar la generación una vez que se ha parado la generación de la unidad térmica.

De esta manera se controlan los gradientes térmicos de los materiales en sus límites técnicos y se evita la fatiga de los mismo.

Estas ecuaciones imponen que un grupo generador g tiene que estar arrancado y conectado y parado y desconectado durante un tiempo mínimo establecido que depende de la tecnología.

$$\sum_{i=h-Minhup_g+1}^h (cx_{g,i}) \leq \delta_{g,h} \quad \forall g, h \quad (28)$$

$$\sum_{i=h-Minhdown_g+1}^h (dx_{g,i}) \leq 1 - \delta_{g,h} \quad \forall g, h \quad (29)$$

La ecuación (31) garantiza que sólo hay un arranque si el grupo generador g estaba previamente desconectado y que sólo hay una parada si el grupo generador g estaba previamente conectado. La ecuación (32) impide que haya una orden de arranque y de parada en la misma hora.

$$\delta_{g,h} - \delta_{g,h-1} = cx_{g,h} - dx_{g,h} \quad \forall g, h \quad (30)$$

$$cx_{g,h} + dx_{g,h} \leq 1 \quad \forall g, h \quad (31)$$

3.1.2.7. Restricciones de reserva

Las ecuaciones (33) describen las reservas a subir y bajar que pueden proporcionar en cada hora h los grupos generadores g .

$$\begin{aligned} resgen_{g,h}^{up} &= P_g^{\max} \cdot \delta_{g,h} - p_{g,h}^e \quad \forall g, h \\ resgen_{g,h}^{down} &= p_{g,h}^e - P_g^{\min} \cdot \delta_{g,h} \quad \forall g, h \end{aligned} \quad (32)$$

La ecuación (34) impone que la reserva a subir disponible y proporcionada por todos los elementos menos por el grupo generador g perdido es mayor que una determinada fracción de la pérdida de este grupo generador g en la hora h .

$$F_{genloss} \cdot P_{g,h}^{e,net} \leq \sum_{g \neq g} (resgen_{g,h}^{up}) \quad \forall h, g \quad (33)$$

Las ecuaciones (35) y (36) imponen que las reservas a subir y bajar disponibles y proporcionadas por todos los elementos en la hora h son mayores que la máxima variación de la demanda prevista.

$$\sum_{g \in i} (resgen_{g,h}^{up}) \geq -F_{demvar} \cdot (D_h^e - D_{h+1}^e) \quad \forall h, g \quad (34)$$

$$\sum_{g \in i} (resgen_{g,h}^{down}) \geq F_{demvar} \cdot (D_h^e - D_{h+1}^e) \quad \forall h, g \quad (35)$$

Finalmente, la reserva a bajar en cada hora h es una fracción de la reserva a subir tal y como lo modela la ecuación (37).

$$\sum_{g \in i} (resgen_{g,h}^{down}) \geq F_{up2down} \cdot \sum_{g \in i} (resgen_{g,h}^{up}) \quad \forall h, g \quad (36)$$

3.1.2.8. Restricciones de caudal permeado

Debido a la capacidad de la desaladora, el caudal permeado por hora estará limitado según las características de la planta. La ecuación (38) recoge esta restricción.

$$q_{p,min}^{OI} \leq q_{p,h}^{OI} \leq q_{p,max}^{OI} \quad \forall h \quad (37)$$

3.1.2.9. Restricciones de capacidad del embalse

El agua permeada se almacena en un embalse para poder ser suministrada más adelante, por lo que la planta desaladora no podrá seguir permeando agua si el embalse está en su nivel máximo y, además, no se podrá bajar del límite mínimo establecido de agua en el embalse.

$$N_{min} \leq N_h \leq N_{max} \quad \forall h \quad (38)$$

3.1.3. Resolución unit commitment

Las técnicas de resolución del Unit commitment son:

- Diseño de lista de prioridades.
- Programación dinámica.
- Programación lineal.
- Relajación de Lagrange.
- Programación lineal entera mixta (MILP)

Dado a que el acople o desacople de las unidades térmicas se representan matemáticamente con números binarios, hoy en día el estado del arte está enfocado a la resolución con la programación lineal entera mixta. A continuación, se comenta brevemente la formulación MILP.

Programación lineal entera mixta adaptada al unit commitment.

3.1.3.1. Resolución MILP en Matlab

Para resolver el problema de Unit Commitment de nuestro modelo hipotético, se emplea el software MATLAB. En entorno Matlab, los problemas de Programación Lineal Entera Mixta (MILP) pueden ser resueltos de manera matricial, Figura 32.

$$\min_x f^T x \text{ subject to } \begin{cases} x(\text{intcon}) \text{ are integers} \\ A \cdot x \leq b \\ Aeq \cdot x = beq \\ lb \leq x \leq ub. \end{cases}$$

Figura 32. Problema MILP en Matlab. Fuente: es.mathworks.com

Donde:

- $x(\text{intcon})$ es un vector que indica las posiciones del vector de variables de decisión que son enteros.

- A y A_{eq} son las matrices de las restricciones de desigualdad e igualdad, respectivamente.
- b y b_{eq} los vectores de las restricciones de desigualdad e igualdad, respectivamente.
- Lb y ub vectores que te indican los límites mínimos y máximos, respectivamente, de cada variable de decisión.

El procedimiento a seguir para resolver el problema de Unit Commitment en Matlab es el siguiente y se representa en la Figura 33.

- Introducción de los datos del modelo (demanda eléctrica, grupos generadores, rangos de potencia, demanda de agua, etc.) en una hoja de cálculo Excel.
- Lectura desde Matlab de los datos del fichero .exe.
- Creación de la función objetivo.
- Cálculo de número de variables de decisión.
- Creación de las matrices necesarias en entorno Matlab para la resolución del problema.
- Resolución del problema desde Matlab.

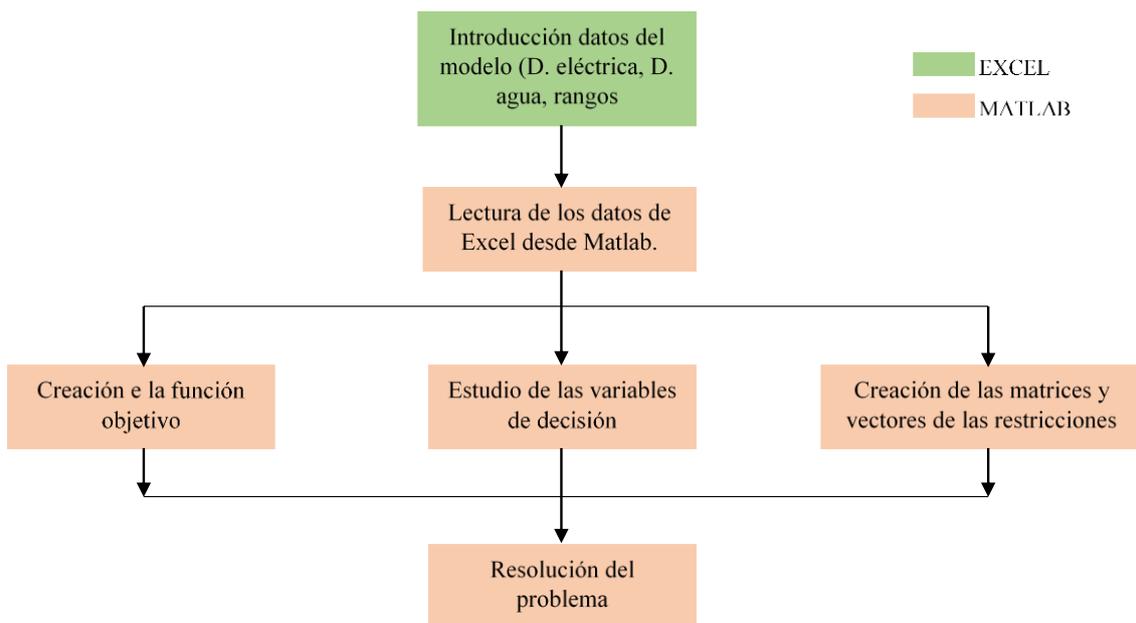


Figura 33. Diagrama de flujo de la resolución del problema Unit Commitment. Fuente: Elaboración propia.

En el Anexo 1, se muestra cómo se leen los datos del modelo, cómo se han creado las matrices y vectores de las restricciones y el comando utilizado para resolver el problema de programación lineal de enteros mixtos.

4. Casos de estudio

En este apartado se realizan diferentes casos de estudio. El primero de ellos, es un caso de estudio sencillo para ver cómo funciona el modelo construido donde se integra el nexo agua-energía a través de las desaladoras.

Con los resultados obtenidos, también se realizan análisis de sensibilidad para ver cómo cambia la respuesta del sistema ante determinados cambios en los parámetros de éste.

Tras esta primera aproximación, se presenta un caso de estudio similar a la situación real de la isla de La Palma.

4.1. Caso de estudio básico

4.1.1. Caso de estudio básico con modelo de la optimización de la operación de la desaladora incluido

El marco temporal escogido para el caso más básico es de veinticuatro horas con el fin de poder analizar de manera sencilla la respuesta del sistema.

En este caso de estudio básico se omiten las restricciones de:

- Restricción de reserva a bajar, ya que la más difícil de conseguir es la reserva a subir.
- Restricción de reserva a subir expresada como variación de la demanda prevista. En su lugar, se utiliza que la reserva a subir por cada grupo es proporcional a su tamaño.

La omisión de estas restricciones es debido a que se quiere examinar cómo distribuye el sistema la generación de agua permeada a través de las horas para que el coste de la operación eléctrica sea mínimo con el menor número de variables para evitar el ruido en los resultados y poder analizarlos de una manera clara, acercándonos a una situación lo más real posible,

El sistema cuenta con cinco unidades generadoras térmicas, tres de ellas acopladas en la hora cero y un nodo de demanda eléctrica neta compuesta por la demanda eléctrica y el consumo energético de la planta desaladora.

Las dos unidades de generación tienen las siguientes características:

	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6	P_7	P_8
$P_g^{max} (kW)$	500	500	1200	1200	1200	2000	2000	2000
P_0	0	200	1000	800	800	800	0	0

P_g^{min} (kW)	200	200	480	480	480	800	800	800
R_g^{up} (kW)	500	500	1200	1200	1200	2000	2000	2000
R_g^{down} (kW)	-500	-500	-1200	-1200	-1200	-2000	-2000	-2000
$nhsd$	1	1	1	1	1	1	1	1
$nhsu$	1	1	1	1	1	1	1	1
$nhtd$	1	1	1	1	1	1	1	1
$nhtu$	1	1	1	1	1	1	1	1
C_g^{fix} (€/kW)	20	20	30	30	30	60	60	60
C_g^{lin} (€/kW)	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08
$C_g^{start-up}$ (€)	150	150	200	200	200	300	300	300
$C_g^{shut-down}$ (€)	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabla 1. Características grupos generadores del caso de estudio básico. Fuente: Elaboración propia.

Por otra parte, los parámetros de la desaladora:

	Desaladora
N_{max} (m ³)	3500
N_0 (m ³)	800
N_{min} (m ³)	700
$q_{p,max}^{OI}$ (m ³ /h)	1000
$q_{p,min}^{OI}$ (m ³ /h)	0
k_1	1150
k_2	17/24

Tabla 2. Parámetros de la desaladora del caso de estudio básico. Fuente: Elaboración propia.

Donde los parámetros k_1 es el término independiente de la recta que modeliza el consumo energético de la planta desaladora y k_2 la pendiente de la recta. Por lo tanto, este modelo para solucionar el unit commitment puede ser válido para otros tipos de desaladoras y, por tanto, extrapolable para otros sistemas.

En este caso, k_1 y k_2 se calcularon en el apartado 2.4.

La demanda de agua y eléctrica del sistema están recogidas en la siguiente tabla.

	D_h^e (kW)	D_h^{agua} (m ³)
h_1	3600,0	500,0
h_2	2800,0	370,0
h_3	2400,0	280,0
h_4	2200,0	200,0
h_5	2200,0	200,0
h_6	2200,0	250,0
h_7	2500,0	450,0
h_8	3100,0	670,0
h_9	3800,0	830,0
h_{10}	4300,0	950,0
h_{11}	4800,0	1000,0
h_{12}	5200,0	950,0
h_{13}	5300,0	830,0

h_{14}	5100,0	785,0
h_{15}	4700,0	725,0
h_{16}	4400,0	690,0
h_{17}	4200,0	745,0
h_{18}	4200,0	875,0
h_{19}	4300,0	920,0
h_{20}	4600,0	900,0
h_{20}	4900,0	905,0
h_{21}	4900,0	833,0
h_{22}	4600,0	750,0
h_{23}	4000,0	680,0
h_{24}	3600,0	500,0

Tabla 3. Demanda eléctrica y de agua del caso de estudio básico. Fuente: Elaboración propia.

Con el fin de que el caso básico se parezca a un caso real, se han seguido patrones de perfiles horarios de demanda eléctrica y de agua reales; y, además, la relación entre demanda eléctrica y demanda de agua están relacionadas de la misma manera que en la realidad.

En la Figura 34 se presenta el perfil diario de la demanda eléctrica del caso de estudio básico en la que se puede apreciar que se asemeja a la forma real de un perfil diario de demanda eléctrica.

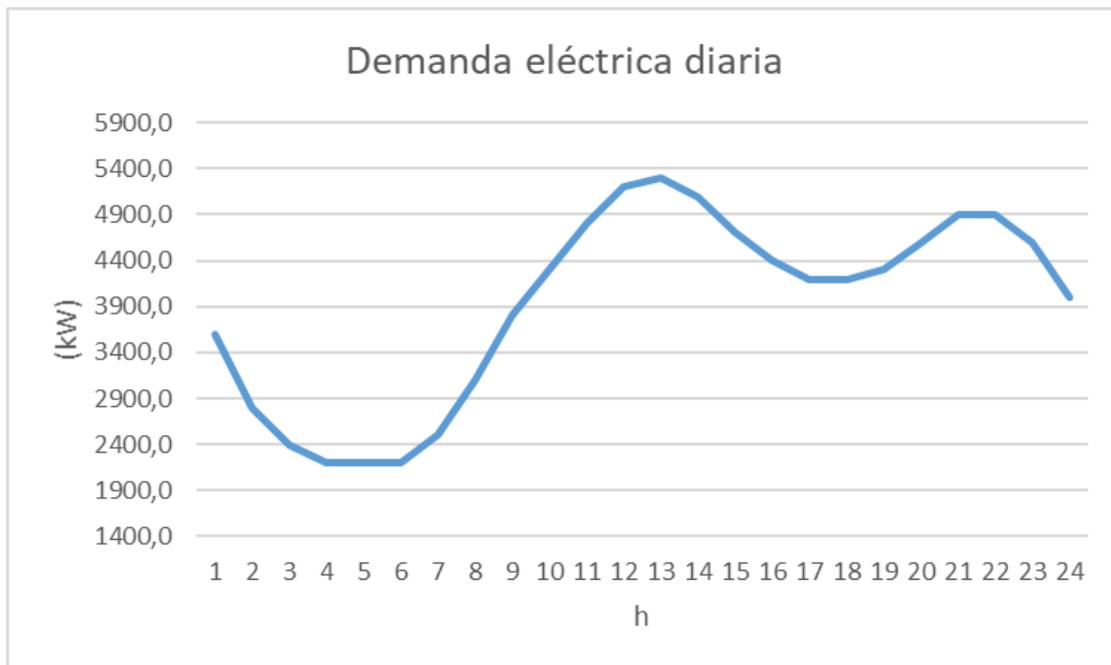


Figura 34. Perfil diario de la demanda eléctrica del caso de estudio básico. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 35 se presenta el perfil diario de la demanda de agua del caso de estudio básico en la que se puede apreciar que se asemeja a la forma real de un perfil diario de demanda de agua.

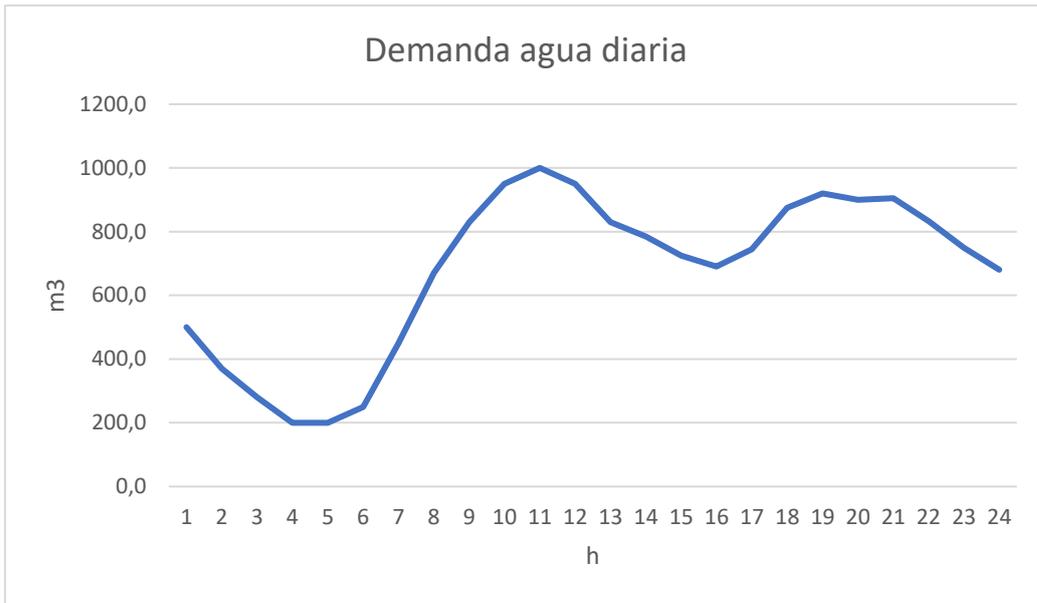


Figura 35. Perfil diario de la demanda de agua del caso de estudio básico. Fuente: Elaboración propia.

Una vez resuelto el problema planteado, se van a analizar los resultados que nos devuelve el software Matlab.

En la Figura 36.a se presenta la demanda y la generación eléctrica en cada hora con los grupos que intervienen en la generación de dicha demanda en la Figura 36.b. A su vez, en la Figura 36.a se recoge la demanda eléctrica neta y la demanda eléctrica inicial (bloques en azul). Para conseguir la demanda eléctrica neta basta con sumar la demanda eléctrica inicial con el consumo energético de la desaladora.



Figura 36. Demanda y generación eléctrica del caso de estudio básico con desaladora. Fuente: Elaboración propia.

La Figura 37.a representa los grupos que están conectados en cada hora y las Figura 37.b y Figura 37.c, los acoples y desacoples a la red de las distintas unidades respectivamente.

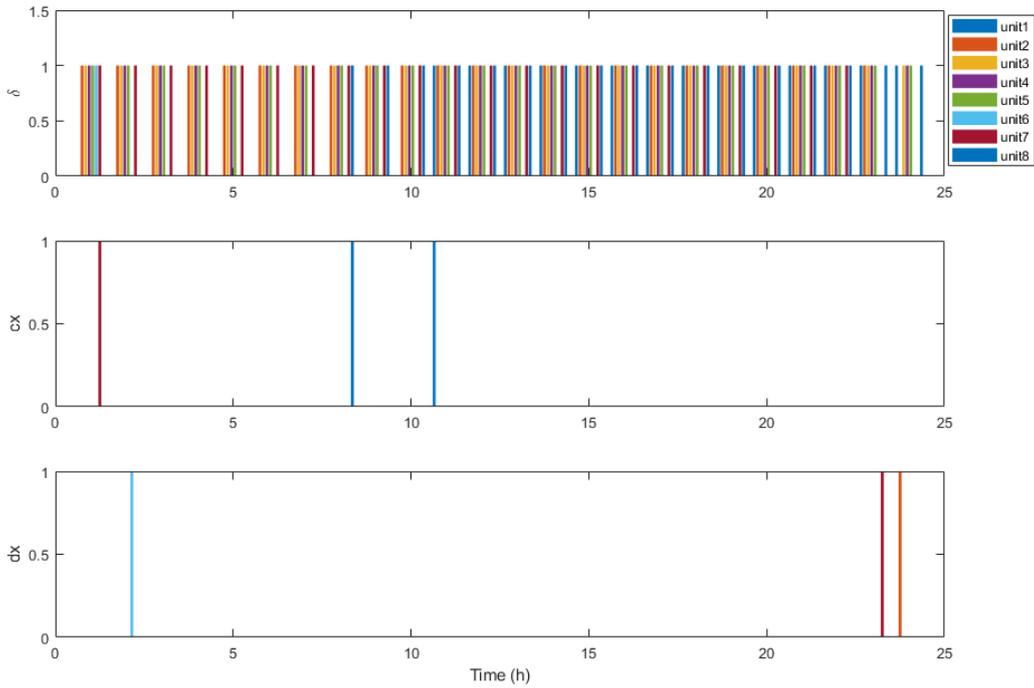


Figura 37. Conexión/Desconexión de los grupos generadores del caso de estudio básico con desaladora. Fuente: Elaboración propia

La demanda de energía tiene un valle en horas de madrugada (3h a 7h) y unos picos de demanda de 12 a 14h y de 21 a 22h. Por otra parte, la demanda de agua tiene un comportamiento similar con un periodo valle de 3h a 6h y dos picos de 10h a 12h y de 19h a 21h, como se observa en la Figura 38.

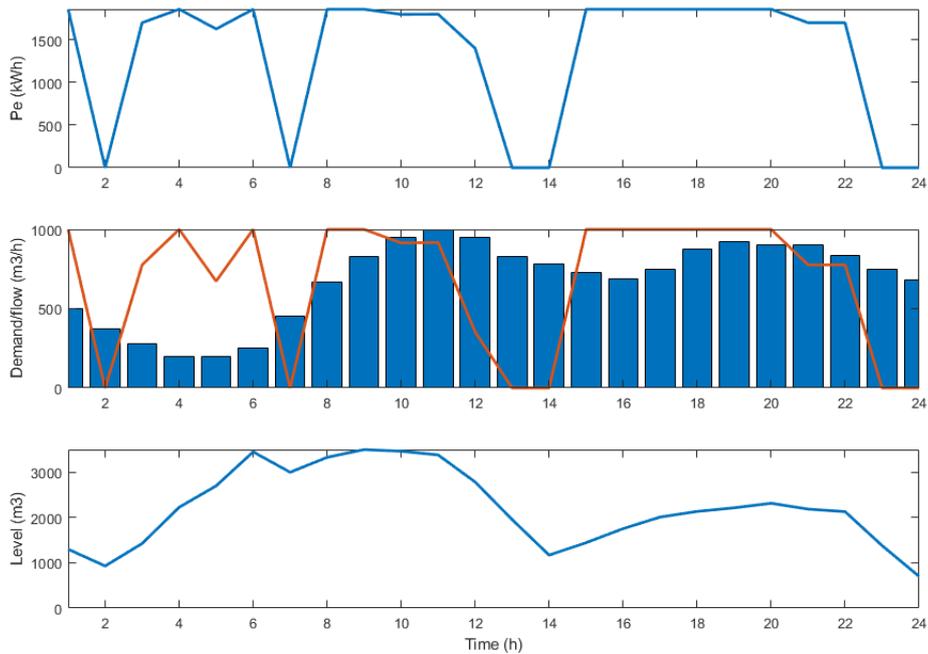


Figura 38. Variables relacionadas con la operación del agua del caso de estudio básico con desaladora. Fuente: Elaboración propia.

Con esta información, para reducir el coste de la operación del sistema, éste aprovecha las horas de valle de ambas demandas (3h a 6h) para almacenar la mayor cantidad de agua a un coste más barato debido a que la demanda eléctrica en esas horas es menor.

En la hora 6 el embalse alcanza su nivel máximo, por lo que el resto de las horas antes de llegar al primer periodo de punta (12h a 14h) produce el agua suficiente para suplir la demanda de agua y mantener el embalse en su nivel máximo.

Una vez se llega al periodo de máxima demanda eléctrica del día (12 a 14h) la producción de agua se anula, bajando la curva de demanda eléctrica neta y el nivel del tanque hasta los 1170 m³ a las 14h.

Resulta extraño que se baje de manera repentina en las horas 13 y 14. Sin embargo, analizando la situación, el sistema elige trabajar con caudales altos o nulos, ya que el simple hecho de desalar una cantidad de agua mínima añade un valor considerable (término fijo, k_1 , del modelo de consumo eléctrico de la desaladora) extra a la demanda eléctrica neta.

Por ejemplo, si se decide producir en una hora 10 m³ y en la siguiente hora 990 m³ la demanda eléctrica que se añadiría en dichas horas sería 1157,1 kWh y 1852,9 kWh respectivamente. Sin embargo, si se decide producir en una hora 0 m³ y en la siguiente 1000 m³ la demanda eléctrica neta ascendería a 0 kWh en la primera hora y 1860 kWh en la segunda.

Por lo anterior, existen momentos del día en el que la producción de agua es nula (horas 2, 7, 13 y 14), apareciendo unas caídas de demanda de energía neta apreciables.

Tras el pico de demanda de las 14h, se vuelve a aprovechar para almacenar agua para que en el próximo pico de demanda eléctrica (21 y 22h) no se consuma más energía de la necesaria se consiga aplanar la curva de demanda neta.

Resulta extraño que en las horas 23 y 24, donde la demanda eléctrica es menor que en las horas 21 y 22, la producción de agua sea nula. Sin embargo, tiene sentido que esto sea así debido a que en estas horas se desacoplan los grupos siete y dos respectivamente y en todas las horas debe cumplirse la restricción de demanda a subir en caso de que algún grupo falle. La generación en estas dos horas se recoge en la siguiente tabla, en rojo se recogen los grupos que están en su máximo, en verde los que están en su mínimo y entre paréntesis la reserva que tienen a subir:

	h_{21}	h_{22}	h_{23}
P_1	500	500	500
P_2	500	500	200 (300)
P_3	1200	1200	700 (500)
P_4	1200	1200	1200
P_5	1200	1200	1200
P_6	0	0	0
P_7	800 (1200)	800 (1200)	0
P_8	1200 (800)	1200(800)	800 (1200)

Tabla 4. Generación en las últimas horas del caso de estudio básico. Fuente: Elaboración propia.

Con la Tabla 4 se comprueba como en las horas 21 y 22 todos los grupos están en su máximo técnico salvo el grupo seis que está desacoplado y el grupo 7 y el grupo 8 (los grupos más caros) que están acoplados para aportar reserva a subir, si fuera necesario.

Además, se puede concluir de esta tabla que en la hora 23 es mejor desacoplar un grupo cuyos costes sean más elevados (G7) que dos grupos con costes relativamente más baratos (G3 y G2).

Dado que los grupos generadores 1 y 2 (G1 y G2) tienen unos costes fijos y variables menores que el resto de los grupos, se obliga a que G1 y G2 operen a máxima potencia cuando están acoplados en todas las horas.

En las horas cuya demanda eléctrica es muy baja (horas 2 a 7), únicamente hay un grupo generador del conjunto que forman G6, G7 y G8 que trabaja en su mínimo para dar la reserva a subir en el caso de que alguno de los demás grupos falle. A su vez, los demás grupos deben sumar entre todos 800 kW a subir en caso de que el grupo G7 (el que está acoplado en estas horas) falle.

En horas con mayor demanda existen dos grupos caros acoplados (G7 y G8) y se utilizan como reserva a subir en caso de que alguno de los grupos falle. Gracias a esto, los demás grupos más baratos pueden trabajar en su potencia máxima (véase hora 11, 12, 15, 21 y 22)

Los grupos generadores 3, 4 y 5 cuyos costes están por debajo que los grupos más caros (G6, G7 y G8), pero más alto que G1 y G2 están acoplados todas las horas debido a que los grupos G1 y G2 conviene que operen en su máximo y G6, G7 y G8 en su mínimo o desacoplados.

Existen ocasiones, como en la hora 7 u 8, en los que la mayoría de los grupos están produciendo en su mínimo técnico y podría parecer sensato desacoplar grupos para reducir costes. Sin embargo, no se desconectan debido a otros factores (es más caro desconectar y volver a conectar más tarde, se necesitan en un periodo menor a las horas mínimas que tiene que estar desconectado, etc.).

De los resultados del problema de unit commitment se pueden sacar las siguientes conclusiones referentes al estudio que nos ocupa:

- El sistema se autoajusta para que la producción de agua se produzca en las horas en las que la demanda eléctrica es más baja (horas 3, 4, 5 y 6) mientras que en otras horas de mayor demanda eléctrica (de 13h a 14h) la producción de agua toma sus valores mínimos.

El embalse se ha ido llenando en las horas donde la demanda eléctrica es menor para que, al llegar las horas de mayor demanda eléctrica, no sea necesario producir agua, lo que conllevaría un aumento de la demanda eléctrica neta.

Sin embargo, una vez que se llega a la hora 11 (demanda eléctrica alta), el embalse empieza a vaciarse hasta que en la hora 14 alcanza su mínimo. A partir de este momento, aunque nos encontremos en horas de demanda eléctrica alta, el sistema debe alcanzar la demanda de agua por lo que no le queda más remedio que incrementar la producción el resto de las horas.

- La operación más barata se da cuando en la última hora el nivel del embalse está en su mínimo, ya que si no se tendría un excedente de agua que habría consumido energía para su producción.
- Gracias a todo lo anterior, se alcanza un coste de operación del sistema con menor demanda y menores costes que en el caso en el que la desaladora trabajase todas las horas, pero a menor caudal ya que el término fijo del modelo del consumo energético de la desaladora aumentaría la demanda por el simple hecho de que la desaladora esté conectada.

Así, el coste total de la operación del sistema eléctrico asciende a 17.605,11€.

4.1.2. Caso de estudio básico con modelo de la optimización de la operación de la desaladora sin incluir

Para realizar este apartado se procederá de manera similar a la sección 4.1. De hecho, las características de los grupos generadores y las demandas eléctricas y de agua son idénticas y el sistema de la desaladora se elimina del problema.

Es decir, en vez de introducir el modelo del consumo energético de la desaladora, se supondrá que en cada hora la demanda neta es igual a la demanda eléctrica más la demanda energética debida a la producción del caudal medio necesario en cada hora con una respuesta de demanda desde el consumo medio hasta los picos y valles de demanda de agua.

El perfil de demanda de agua durante el día es idéntico al de la sección anterior cuya demanda eléctrica suponiendo un caudal medio de 700 m³/h, con un pico máximo de 1000 m³ y uno mínimo de 200 m³. Se puede ver de manera gráfica en la Figura 39. Además, la traducción en demanda eléctrica los caudales que puede tomar la desaladora [caudal medio – límite inferior, caudal medio + límite superior], se puede ver en la Figura 40.

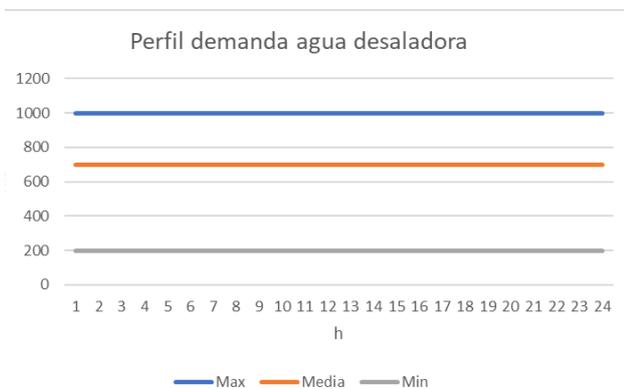


Figura 39. Perfil de demanda de agua media con rangos máximos y mínimos. Fuente: Elaboración propia.

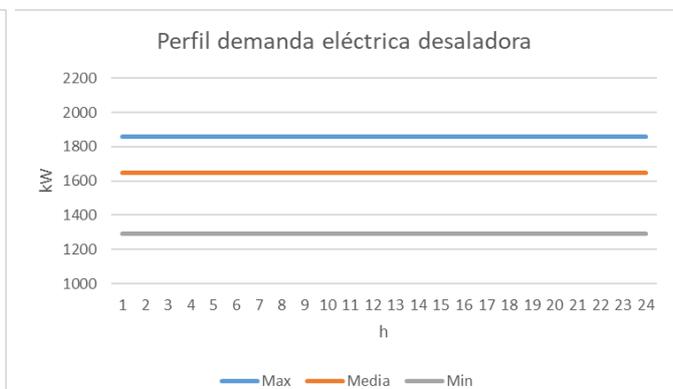


Figura 40. Perfil de demanda de eléctrica media debida a la desaladora media con rangos máximos y mínimos. Fuente: Elaboración propia

No se contemplan las restricciones de la desaladora, sino las de gestión de la demanda con variaciones a subir y a bajar de 213 kW y 355 kW, respectivamente. Estos valores

son el resultado de restar el límite máximo de consumo eléctrico al consumo medio de la desaladora y hacer lo mismo con el límite inferior.

Es importante añadir que la suma final de esta respuesta de demanda debe ser nula, es decir, puede tomar valores por encima y por debajo de la media, pero la media final debe ser la 1645 kW.

A continuación, se presentan las soluciones obtenidas con el software Matlab.

En la Figura 41 se refleja la gestión de la demanda simple. La demanda eléctrica neta es la demanda eléctrica suponiendo una producción media de agua (700 m³) con unos desvíos de subida y bajada debido a dicha gestión de la demanda.

En la Figura 41 se presenta, al igual que en el apartado anterior, la demanda eléctrica neta, la demanda eléctrica inicial y, además, se añade la demanda eléctrica de referencia correspondiente al caso de estudio anterior.

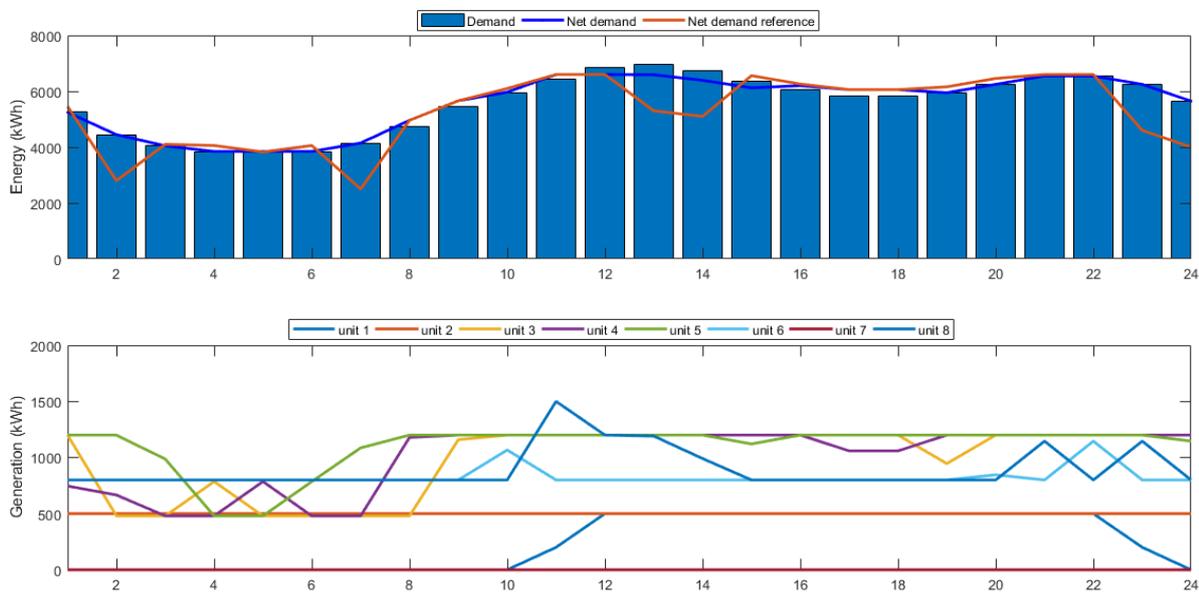


Figura 41. Demanda y generación eléctrica del caso de estudio básico con gestión de la demanda simple. Fuente: Elaboración propia.

Ampliando la comparación entre la demanda neta con la gestión de demanda y la demanda neta del caso de estudio básico (Figura 42), se ve que la esta última toma un forma más irregular que con la gestión de la demanda simple. Esto se debe a lo explicado en el apartado anterior, la desaladora intenta no trabajar a caudales bajos/medios debido a que esto inyecta una gran demanda inicial debido al término independiente (k_1) del modelo del consumo de energía de la desaladora.

Además, gracias a estos valles de demanda en horas puntuales, se llega a una reducción de la demanda eléctrica neta media de 306 kWh (5269 kWh en el caso de estudio de referencia y 5575 kWh) con la gestión de demanda simple.

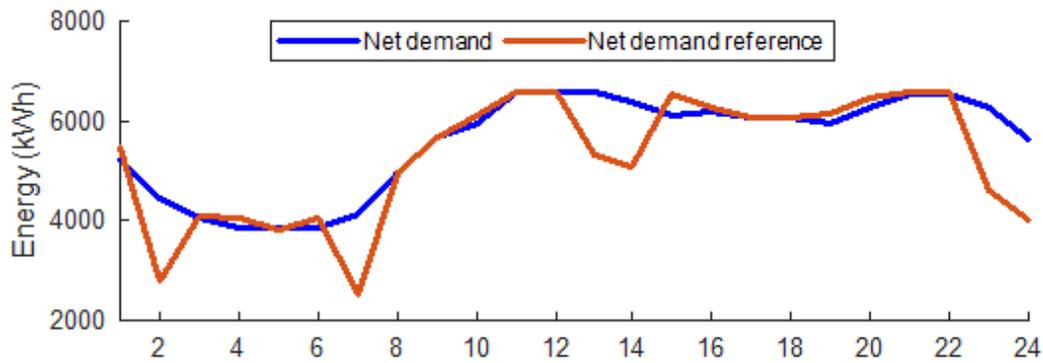


Figura 42. Comparación demandas netas del caso de estudio básico. Fuente: Elaboración propia.

La producción nula de agua en ciertas horas que se traduce en reducciones de demanda eléctrica repentinas en ciertas horas, se traducen, a su vez, en más conexiones/desconexiones de los grupos generadores. Esto se puede ver comprobando la Figura 37 y Figura 43.

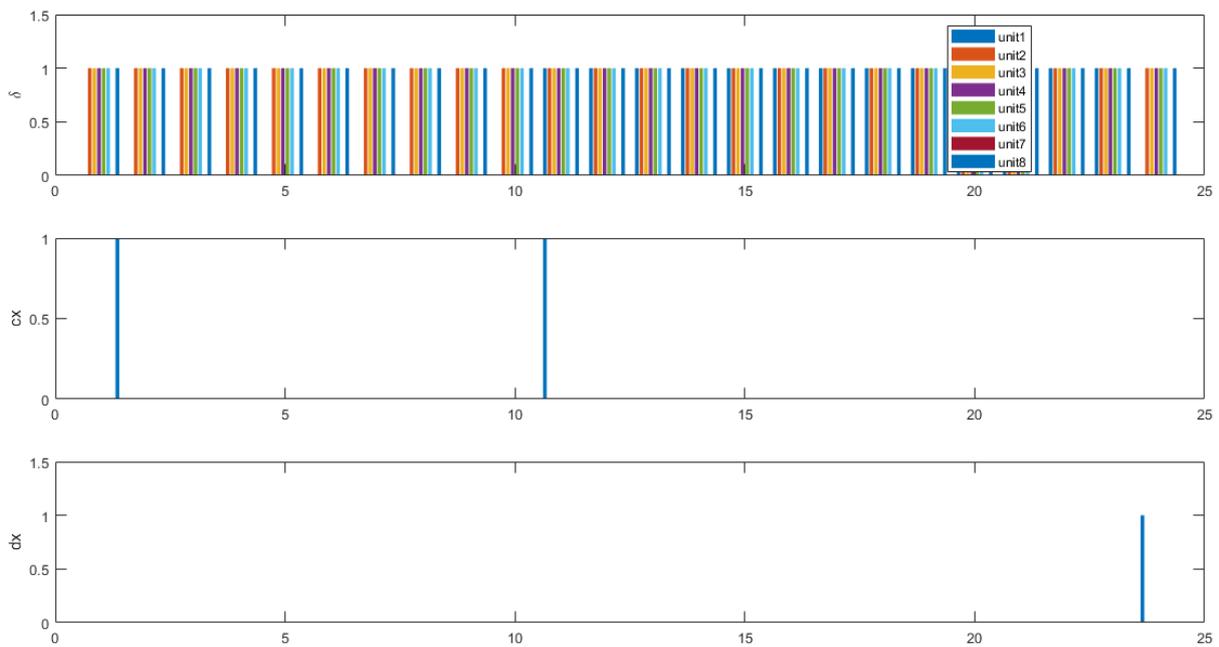


Figura 43. Conexión/Desconexión de los grupos generadores del caso de estudio básico con gestión de la demanda simple. Fuente: Elaboración propia

En la Figura 41 se corrobora la afirmación que se hizo en el apartado anterior: los grupos cuyos costes son más reducidos operan en su máximo técnico la mayoría del tiempo, mientras que los grupos más caros se intenta que operen en sus mínimos técnicos para cumplir la restricción de reserva a subir en el caso de fallo de algún grupo generador.

Con todo lo anterior, el coste asciende a 18511,73 € lo que supone un aumento relativo respecto al caso de estudio que incluye la optimización de operación de las desaladoras.

Esto, que se ve en secciones posteriores, es debido a:

- Modelo sin tener en cuenta la optimización de la operación de las desaladoras, tiene en cuenta el consumo energético de las mismas, pero con un consumo medio. Es decir, no se sabe con precisión si en todas las horas se cumple con la restricción de alcanzar la demanda de agua, restricción que si se tiene en cuenta en el modelo anterior.
- El problema formulado en el primer caso (con la optimización de la operación de la desaladora) tiene unas restricciones de nivel máximo de embalse y un caudal máximo con poco margen. En el momento en el que relajemos estas restricciones, el modelo que incluye la optimización de las plantas desaladoras tendrá una mejora más significativa.

4.2. Análisis de sensibilidad

En esta sección se hará un análisis de sensibilidad cambiando parámetros críticos para conocer cómo afectan a la operación del sistema.

Se consideran como parámetros críticos:

- Perfil de la demanda de agua.
- k_1 : la ordenada en el origen de la aproximación lineal del consumo energético de la planta desaladora.
- k_2 : la pendiente de la recta anterior.
- N_{max} : el nivel máximo del embalse de la desaladora.
- Q_{max} : caudal máximo que puede permear el sistema de ósmosis inversa de la planta desaladora.

Los cambios a realizar van son los siguientes:

- Duplicar los parámetros.
- Dividir a la mitad los parámetros.
- En el caso de la demanda, se ajustará la curva de demanda de agua para reducir la demanda media de agua e incrementar las diferencias de demanda entre hora y hora.

Todos los cambios realizados se van a comparar con el caso 4.1.1.(Caso de estudio básico con modelo de la optimización de la operación de la desaladora incluido).

4.2.1. Caso de estudio básico con desaladora y cambio de perfil de demanda agua.

Para conocer la robustez y validez del modelo creado, se propone modificar el perfil del consumo de agua diario y analizar si, aún en estas condiciones, la reducción en costes y el aumento de la flexibilidad del sistema son palpables.

Así, se vuelven a estudiar el caso de referencia y el caso que incluye la optimización de la operación de la desaladora con un perfil de demanda diferente al estudiado en los casos 4.1 y 4.2. El resto de demanda y de parámetros permanecen intactos.

La nueva demanda de agua es un caso hipotético y se presenta en la siguiente tabla:

	D_h^e (kW)	D_h^{agua} (m ³)
h_1	3600,0	465,0
h_2	2800,0	285,0
h_3	2400,0	145,0
h_4	2200,0	35,0
h_5	2200,0	15,0
h_6	2200,0	75,0
h_7	2500,0	315,0
h_8	3100,0	535,0
h_9	3800,0	735,0
h_{10}	4300,0	875,0
h_{11}	4800,0	945,0
h_{12}	5200,0	880,0
h_{13}	5300,0	715,0
h_{14}	5100,0	575,0
h_{15}	4700,0	515,0
h_{16}	4400,0	565,0
h_{17}	4200,0	725,0
h_{18}	4200,0	825,0
h_{19}	4300,0	895,0
h_{20}	4600,0	925,0
h_{20}	4900,0	895,0
h_{21}	4900,0	810,0
h_{22}	4600,0	715,0
h_{23}	4000,0	585,0
h_{24}	3600,0	465,0

Tabla 5. Demanda eléctrica y de agua del caso de estudio 4.2.1. Fuente: Elaboración propia.

La demanda eléctrica, como ya se ha comentado es la misma que en el caso básico. Sin embargo, la demanda de agua en las veinticuatro horas se ha obtenido reduciendo la demanda media de agua y aumentando la distancia entre los picos de demanda máxima y mínima.

Así, el perfil horario de la demanda de agua en este apartado se recoge en la Figura 44, y servirá para comprobar la validez del sistema ante diferentes perfiles de demanda.



Figura 44. Perfil horario hipotético de la demanda de agua. Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en el software Matlab.

Al reducir la demanda media de agua e incrementar la distancia entre los valores máximos y mínimos de dicha demanda, se aprecia como en las horas 5, 8 y 12 la producción de agua es nula, mientras que en el caso base no. Esto hace que las curvas de demanda eléctrica neta de los dos casos sean prácticamente idénticas, excepto en las horas comentadas anteriormente donde la demanda eléctrica neta baja haciendo que la demanda eléctrica neta media, y por tanto los costes, bajen en este caso (Figura 45).

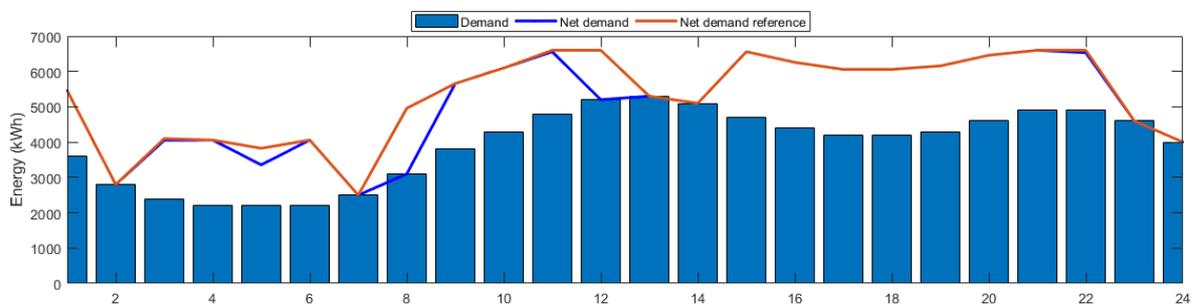


Figura 45. Demanda eléctrica del caso de estudio básico con cambio del perfil de demanda de agua. Fuente: Elaboración propia.

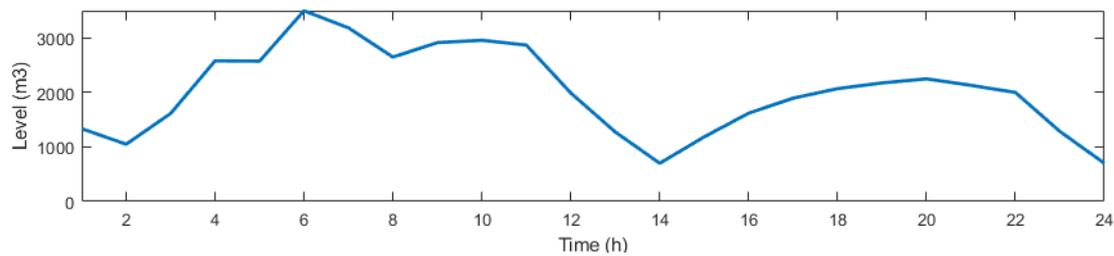


Figura 46. Nivel del embalse del caso de estudio básico con cambio del perfil de demanda de agua. Fuente: Elaboración propia.

Con las variables relacionadas con la operación del agua del estudio básico y con el cambio del perfil de la demanda de agua, pasa algo parecido a la demanda eléctrica neta, que son prácticamente iguales salvo en las horas 5, 8 y 12 donde el sistema, para abaratar los costes, decide no producir agua.

Sin embargo, si se nota un cambio significativo en el nivel del embalse ya que en el caso inicial la restricción del nivel máximo del embalse se encontraba activa un mayor número de horas. El cambio del perfil de demanda de agua ha traído un incremento de las diferencias de demanda de agua entre hora y hora. Si a esto se le suma que el número de horas que la desaladora está activa es menor que en el caso de estudio básico, se llega a la diferencia de niveles del embalse entre ambos casos. (Figura 46).

Así, el coste de la operación del sistema asciende a 17.182,34 €.

4.2.2. K_1

4.2.2.1. Doble

En esta sección se impondrá que k_1 en vez de ser 1150, será 2300. Por lo que el modelo del consumo energético de la planta es el siguiente:

$$P_W^{OI} = 2300 + \frac{17}{24} q_P^{OI}$$

Los resultados se exponen a continuación:

Al incrementar el consumo de la desaladora dejando constante la demanda eléctrica inicial, el consumo de la desaladora tiene un peso más importante en la demanda eléctrica neta. De hecho, el doblar el parámetro trae un aumento del 35% aproximadamente de la demanda eléctrica neta en las horas en las que la desaladora está en funcionamiento.

En la Figura 48, se puede comprobar como la demanda neta tiene un comportamiento similar en ambos casos, pero en este caso la demanda neta es mayor debido al incremento de k_1 .

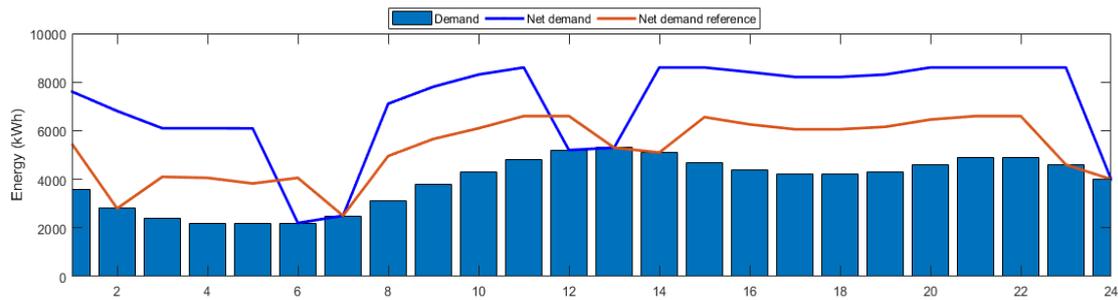


Figura 47. Demanda y generación eléctrica del caso de estudio básico con el parámetro k_1 duplicado. Fuente: Elaboración propia.

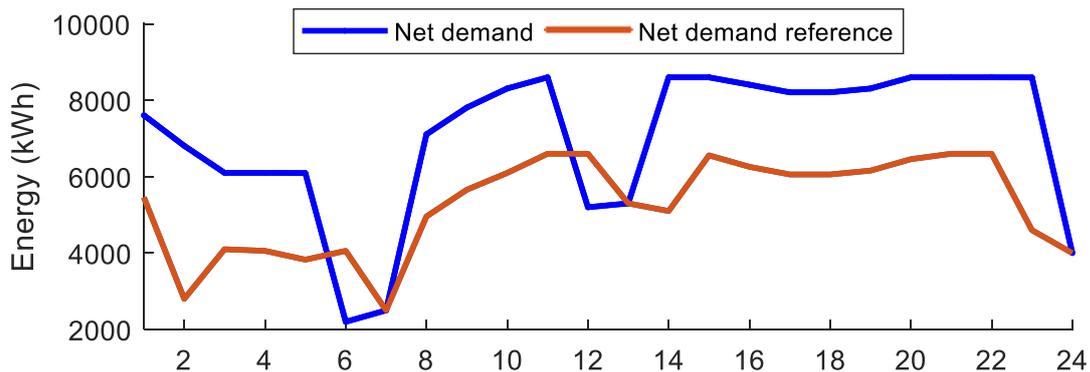


Figura 48. Comparación demandas netas del caso de estudio 4.2.2.1. Fuente: Elaboración propia.

Por tanto, la distribución del caudal permeado por la desaladora a lo largo del día tendrá mayor influencia en el sistema que en el caso de estudio básico ya que producirá un impacto mayor en la flexibilidad del sistema y, por tanto, en los costes.

Además, la diferencia entre producir mayor o menor caudal de agua no será tan significativo como en el caso de estudio básico. El término independiente del modelo tiene un gran peso sobre el consumo eléctrico final de la planta desaladora. Existen horas donde el caudal producido es la mitad que en otras horas y, sin embargo, la variación del consumo eléctrico no es significativa.

Debido a la duplicación del parámetro k_1 , las horas en las que no se produce agua, se produce una variación de demanda eléctrica neta mucho más pronunciada que en el caso de estudio básico. Esto provoca que los acoples y desacoples de los grupos generadores sean más frecuentes, lo que repercute en el coste final de la operación del sistema, que asciende a 23.994,05 €.

4.2.2.2. Mitad

En esta sección se impondrá que k_1 en vez de ser 1150, será 575. Por lo que el modelo del consumo energético de la planta es el siguiente:

$$P_W^{OI} = 575 + \frac{17}{12} q_P^{OI}$$

Los resultados se exponen a continuación.

Al reducir el parámetro k_1 a la mitad, el peso del consumo energético de la desaladora sobre la demanda eléctrica neta se reduce de manera significativa.

El comportamiento del sistema ante la disminución significativa del parámetro k_1 de primeras no resulta lógica ya que, en las horas de mayor demanda eléctrica, el sistema decide producir agua y, en otras horas con menor demanda decide no poner en funcionamiento la planta desaladora.

Sin embargo, analizando los resultados, el sistema decide tener una demanda cercana a los 3000 kWh desde la hora 4 hasta la hora 9 con el fin de desacoplar grupos generadores y evitar producir el mínimo técnico de éstos y acoplar grupos a partir de la hora 9.

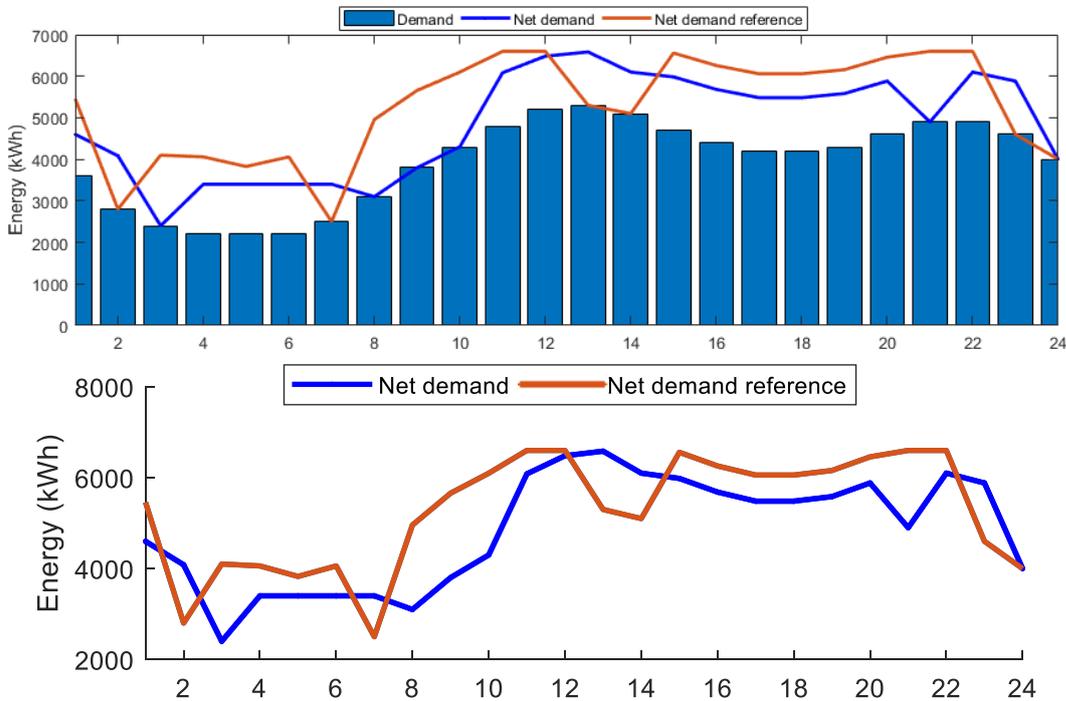


Figura 49. Demanda eléctrica del caso de estudio básico con el parámetro k_1 reducido a la mitad. Fuente: Elaboración propia.

Así, se puede comprobar en la Figura 49 como ya no se evita producir agua dulce en las horas donde la demanda eléctrica es mayor (13h y 14h). Esto es debido a que el resto de las restricciones (como acoples/desacoples debido a reservas) tienen un impacto mayor en el coste de la operación del sistema que el coste que conlleva el parámetro k_1 .

Lo que se sigue comprobando es la tendencia del sistema a operar la planta desaladora en caudales altos o nulos antes que en valores de producción intermedios, que inyectarían un coste adicional en el coste total de la operación del sistema. A su vez, las diferencias de demanda eléctrica neta debidas a este hecho, no son tan abruptas como en el caso de estudio básico.

El coste final de la operación del sistema alcanza los 16.054,05 €

4.2.3. K_2

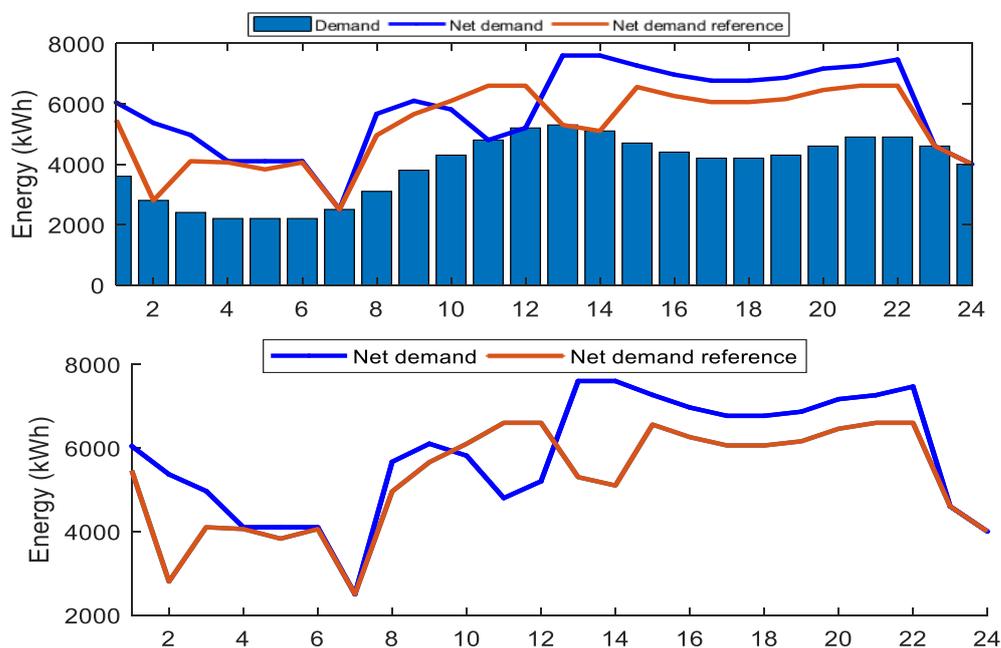
4.2.3.1. Doble

En esta sección se impondrá que k_2 en vez de ser $\frac{17}{24}$, será $\frac{17}{12}$. Por lo que el modelo del consumo energético de la planta es el siguiente:

$$P_W^{OI} = 1150 + \frac{17}{12} q_P^{OI}$$

Los resultados se exponen a continuación:

Doblar el parámetro k_2 no tiene tanta influencia en la demanda eléctrica final como doblar el parámetro k_1 : en los momentos en los que la desaladora está en funcionamiento, el aumento de demanda eléctrica neta está alrededor del 12%, mientras que en el caso anterior este porcentaje ascendía al 35%. Así, el consumo de la desaladora en este caso tiene mayor peso en la demanda neta final que en el caso de estudio básico (4.1.1), pero menor que en el caso anterior. Esto puede verse reflejado en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**



El sistema en este caso ha considerado óptimo, en términos de costes de la operación del sistema, producir agua en la hora dos y dejar de producir en los picos de demanda eléctrica de las 11h y 12h por causas de reducción de costes por acoples/desacoples de grupos. Se

Figura 50. Demanda eléctrica del caso de análisis de sensibilidad con k_2 ($\times 2$). Fuente: Elaboración propia

aprecia como la demanda eléctrica media es ligeramente superior al caso de referencia, repercutiendo en los costes de operación.

En cuanto al nivel del embalse de almacenamiento de agua desalada, sigue también el mismo patrón que en el caso inicial, salvo en las horas 11 y 12.

Como conclusión, se puede decir que, debido a que el parámetro k_2 tiene poco peso en el modelo del consumo eléctrico de la desaladora, el efecto que produce sobre la demanda eléctrica neta es menos significativa que en otros casos de estudio de análisis de sensibilidad.

El coste final de la operación del sistema asciende a 19.504,9 €

4.2.3.2. Mitad

En esta sección se impondrá que k_2 en vez de ser $\frac{17}{24}$, será $\frac{17}{48}$. Por lo que el modelo del consumo energético de la planta es el siguiente:

$$P_W^{OI} = 1150 + \frac{17}{48} q_P^{OI}$$

Los resultados se exponen a continuación:

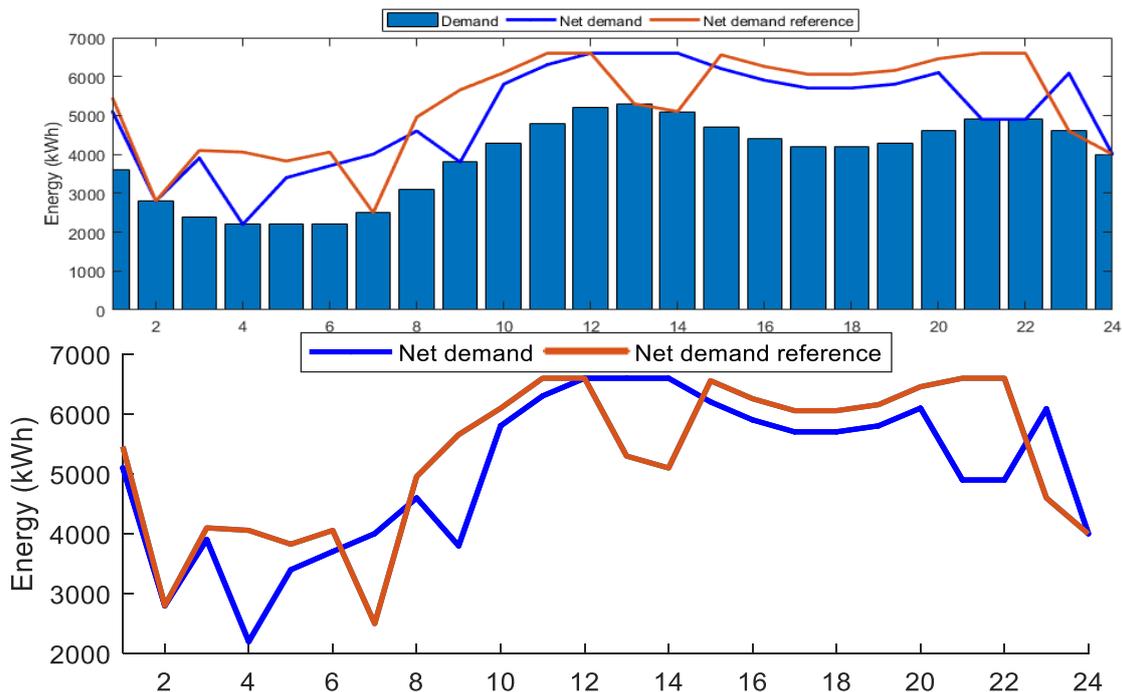


Figura 51. Demanda eléctrica del caso de estudio básico con el parámetro k_2 reducido a la mitad. Fuente: Elaboración propia.

Como en el caso de doblar el parámetro k_2 , la influencia del parámetro no muy significativa respecto a la demanda eléctrica neta del sistema. Las variaciones de la demanda eléctrica neta debido a la no generación de agua en horas puntuales tienen un

orden de magnitud similar al caso de estudio básico, al contrario de disminuir el parámetro k_1 que sí influía de manera significativa.

Al reducir el parámetro k_2 , la distribución de caudal permeado a lo largo de las horas es diferente al caso inicial y se ve reflejado en la demanda eléctrica neta y, por tanto, en los costes. El número de horas que la desaladora está en funcionamiento es la misma que en el caso inicial, pero distribuidas de manera diferente a lo largo del día, consiguiendo caudales de producción muy elevados en todas las horas, lo que repercute en la demanda eléctrica final y, por tanto, en los costes.

La demanda eléctrica neta se reduce, pero no de manera significativa, dejando unos costes de operación de 17.150,12 €, un 2.5% menor que el caso de estudio de referencia.

4.2.4. Nmax

4.2.4.1. Doble

En esta sección se impone que el nivel máximo que puede asumir el embalse asciende a 7000 m³, en lugar de 3500 m³ que tenía el caso de estudio básico inicial.

Los demás parámetros y datos permanecen constantes.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos con el software Matlab.

Analizando la

Figura 52, se comprueba como, gracias a duplicar la capacidad del embalse, se consigue que en las horas de mayor demanda eléctrica (11, 12, 13 y 14) la demanda eléctrica neta no tenga ningún aporte de la desaladora de agua. Sin embargo, tras este pico de demanda (después de las 14h), el comportamiento del sistema es idéntico al del caso de estudio básico. Esto se debe a que, tras las horas de demanda eléctrica máxima, la planta desaladora trabaja en su caudal máximo durante todas las horas hasta las 21h donde disminuye la producción para dejar el embalse a su nivel mínimo debido al final de la simulación.

En otras palabras, la demanda es prácticamente la misma al caso inicial, salvo las horas once y doce que, gracias a duplicar la capacidad del embalse, en la hora 2 se puede producir más agua y esto permite que no se requiera producir agua en esas horas.

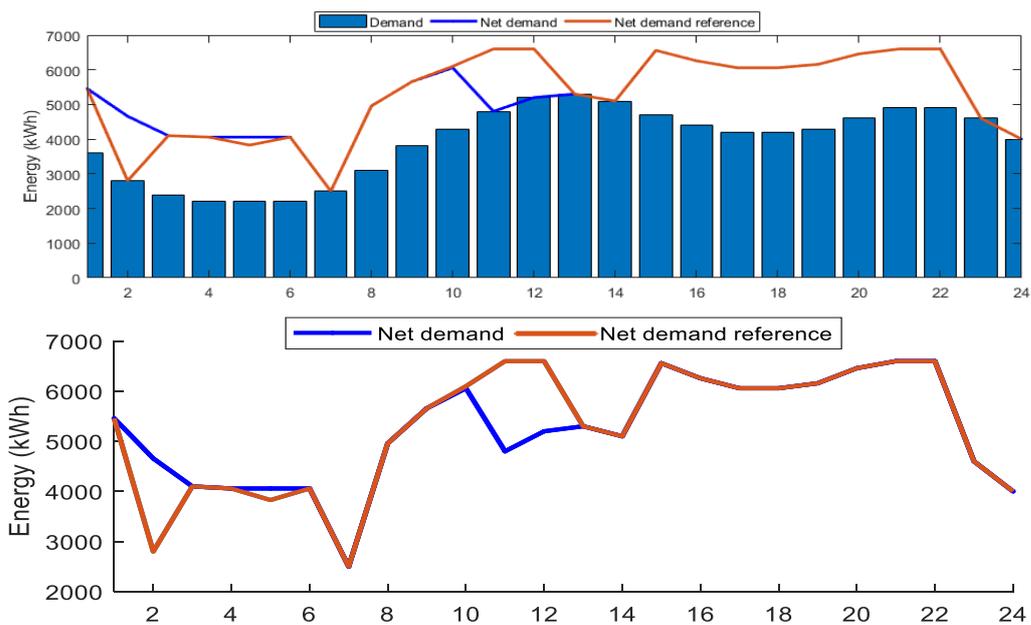


Figura 52. Demanda y generación eléctrica del caso de estudio básico con el parámetro N_{max} ($\times 2$). Fuente: Elaboración propia.

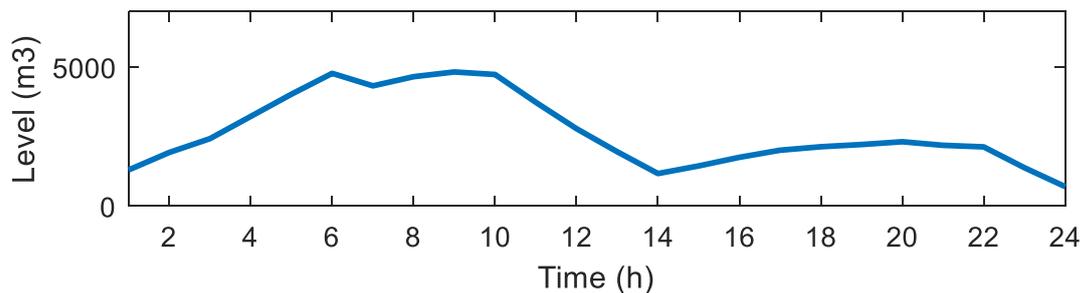


Figura 53. Nivel del embalse de agua con el parámetro N_{max} duplicado. Fuente: Elaboración propia.

Con el perfil de demanda eléctrica y de demanda de agua, se dan unas condiciones en las que el embalse toma una importancia especialmente relevante antes del primer pico de demanda. Esto se puede extraer de la Figura 53. Tras este primer pico de demanda, el embalse sigue siendo de utilidad, pero menos importante en el primer periodo de demanda ya que la capacidad de producción de la desaladora no es tal para poder suplir la demanda y almacenar agua extra. Esto se refleja en los costes finales de operación del sistema.

Si en esta situación se pudiese incrementar el caudal permeado máximo de la desaladora, se conseguiría almacenar más agua y reducir el coste total de la operación del sistema.

El coste total e la operación del sistema asciende a 17.501,22 €.

4.2.4.2. Mitad

En este estudio de sensibilidad, se propone ajustar el nivel del embalse en 1750 m³, en vez de a 3500 m³.

Los resultados obtenidos en el software Matlab se exponen a continuación.

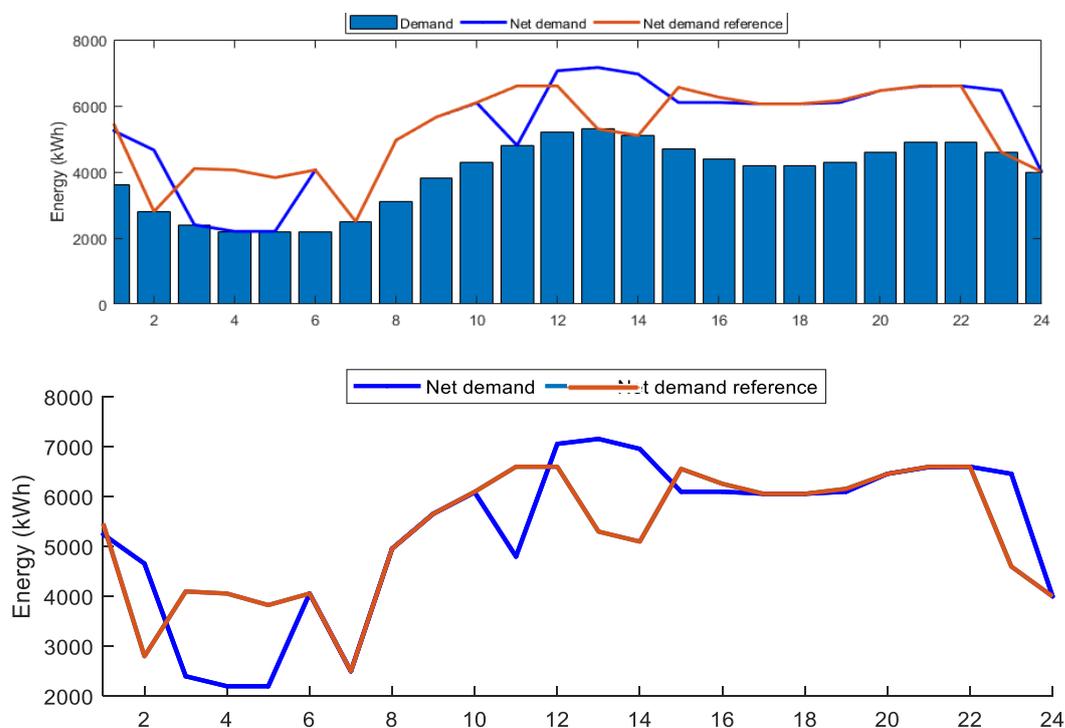


Figura 54. Demanda y generación eléctrica del caso de estudio básico con el parámetro N_{max} reducido a la mitad. Fuente: Elaboración propia.

Debido a la reducción de la capacidad del embalse a 1750 m³, el sistema redistribuye el caudal producido de manera significativa a lo largo de las veinticuatro horas. Para las primeras horas de la madrugada, en este caso de estudio se dan unas condiciones de demanda y nivel máximo de embalse en las que el sistema decide llenar el embalse en las dos primeras horas y no producir agua en las tres siguientes y, reduciendo la demanda eléctrica neta, desacoplando así dos grupos y, en definitiva, reduciendo costes en esta franja.

Sin embargo, el hecho de que el embalse tenga menos capacidad, repercute en que en las horas de mayor demanda eléctrica (12h, 13h y 14h) se tenga que producir agua ya que, teniendo en cuenta que el nivel mínimo del embalse es 700 m³, la capacidad neta es de 1050 m³ y no puede asumir la demanda de agua que se produce en esas horas, incrementando el coste de manera significativa en la franja

Podría parecer que es mejor producir menos cantidad de agua en las horas 12, 13 y 14. Sin embargo, como ya se ha explicado, lo más óptimo en término de reducción de costes para el sistema es que la desaladora trabaje a caudales altos o nulos.

El coste de la operación del sistema asciende a 18.224,70€.

4.2.5. Qmax

4.2.5.1. Doble

En esta sección se fija el caudal máximo permeado en una hora por la desaladora a 2000 m³, mientras que en el caso básico eran 1000 m³.

Los demás parámetros permanecen constantes.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos con el software Matlab.

Incrementando por dos el caudal máximo de agua a producir por la desaladora se consigue que en menos de dos horas se llene el embalse.

Al igual que en los casos anteriores, la planta desaladora trabaja a caudales altos y nulos. En las horas 4, 5, 6, 7 y 8 la demanda eléctrica es muy baja y se aprovecha para no producir agua y así poder desacoplar los dos grupos cuyos costes fijos y de producción son los más elevados de los grupos.

Así, aprovecha el acople de grupos para alcanzar la demanda eléctrica inicial para producir el máximo de agua posible (9h, 10h y 11h) y no tener que producir agua donde la demanda eléctrica es mayor.

En la Figura 55 se ve como en el caso de estudio básico no se podía anular la producción de agua en ninguna de las horas del segundo periodo de demanda (a partir de las 14h) debido a que el caudal que podía permear la desaladora no era suficiente como para almacenar tanta agua y utilizarlo en horas posteriores. Sin embargo, al aumentar la capacidad de producción de la planta desaladora esto es posible como se observa en la hora 17.

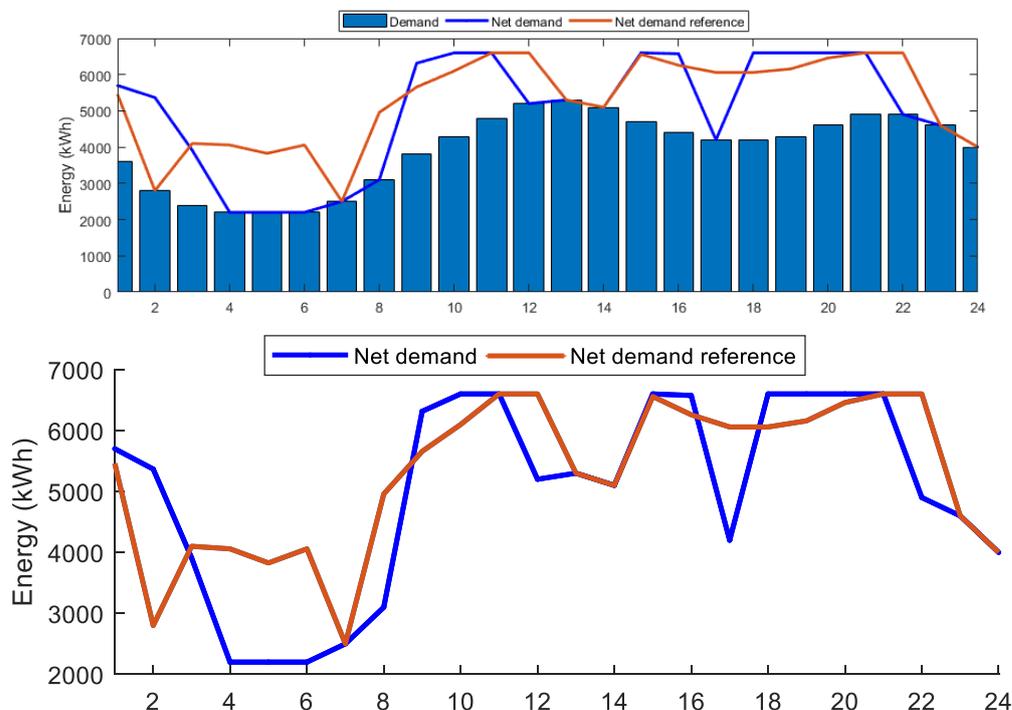


Figura 55. Demanda y generación eléctrica del caso de análisis básico con el parámetro Q_{max} duplicado. Fuente: Elaboración propia.

Todo lo anterior, hace que la curva de demanda tenga más variaciones entre los periodos de punta y valle que en el caso base, pero se consigue una reducción en el coste de la operación que, en este caso, asciende a 17.045,88 €.

4.2.5.2. Mitad

Al intentar reducir el caudal máximo que puede permear la desaladora, el problema de optimización no tiene solución. El caudal es insuficiente para satisfacer la demanda horaria de agua.

Se propone, por tanto, reducir el caudal un 25% para llevar a cabo el análisis de sensibilidad resultante de reducir la capacidad de producción de la planta de desalación. Así, se fija Q_{\max} en $750 \text{ m}^3/\text{h}$.

Los resultados obtenidos con el software Matlab se presentan a continuación.

Para poder alcanzar la demanda de agua en todas las horas del día, la planta desaladora trabaja en su máximo de operación la mayoría de ellas. Como se observa en la Figura 56, el sistema no puede concentrar la producción de agua en determinadas horas para poder desconectar la desaladora en otras con el objetivo de reducir la demanda eléctrica neta y, en definitiva, el coste de operación del sistema.

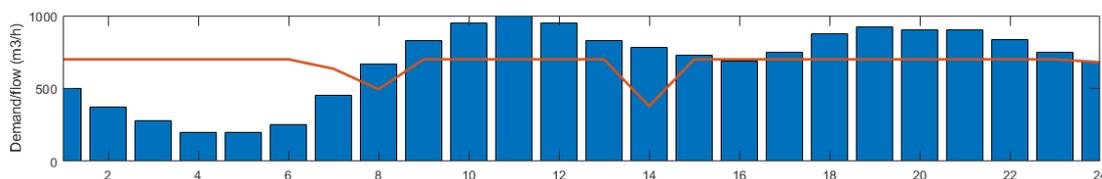


Figura 56. Producción de agua del caso de análisis básico con el parámetro Q_{\max} reducido. Fuente: Elaboración propia.

En cuanto al nivel del embalse, debido al límite de caudal permeado por hora, el embalse no llega a su límite máximo en ningún momento del día.

Debido a la escasa capacidad de producción de la planta desaladora, ésta debe trabajar en su máximo y la demanda neta de energía, como se ve en la Figura 57, se aproxima a la del caso de estudio básico en las horas en las que la planta desaladora está en funcionamiento. Sin embargo, existían ciertas horas en el caso de estudio básico en las que la demanda eléctrica se reducía drásticamente debido a la desconexión de la desaladora que en este caso de estudio no se llegan a producir.

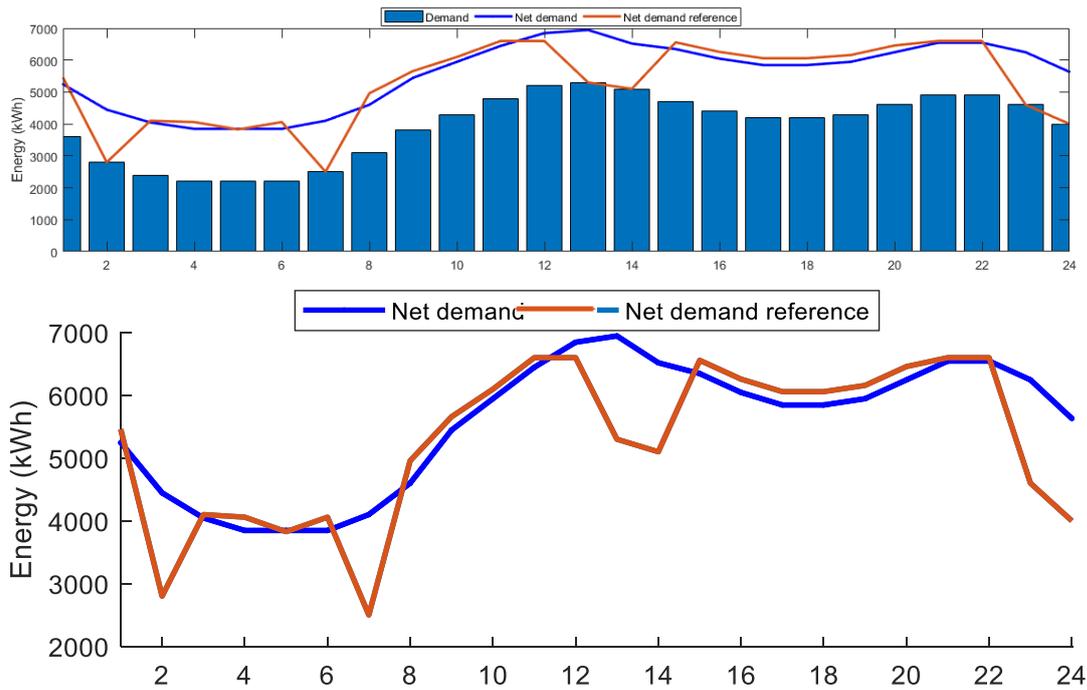


Figura 57. Demanda y generación eléctrica del caso de análisis básico con el parámetro Q_{max} reducido. Fuente: Elaboración propia.

Con todo lo anterior, se aprecia que la demanda eléctrica en este caso es más uniforme que en todos los casos de estudio anteriores debido a que el sistema no tiene margen de operación para generar más agua en algunas horas que en otras.

El coste de la operación es el más elevado de todos los casos de estudio y asciende a 18.828.92 €.

4.2.6. Resultados análisis de sensibilidad

En este apartado se sintetizan los resultados los resultados del apartado 4.2 con el fin de comprender cuál es la respuesta ante modificaciones en los parámetros del sistema y cuál de ellos tiene más influencia sobre éste.

En el caso de estudio básico, la respuesta del sistema se basa en producir agua en las horas de menor demanda eléctrica y de demanda eléctrica intermedia para vaciar el embalse de agua en las horas de punta.

En el momento en el se modifica el consumo de la planta desaladora (modificación de los parámetros k_1 y k_2), se modifica la demanda eléctrica neta de manera directa y, dependiendo de si la modificación de los parámetros incrementa o disminuye la demanda eléctrica neta, la respuesta del sistema es diferente:

- Aumentando k_1/k_2 . El sistema reacciona de manera similar al caso de estudio básico: produce agua en horas de demanda eléctrica baja e intermedia para

poder descargar el embalse y no producir agua en horas de demanda alta. La reducción del coste de operación del sistema proviene de las horas en las que la desaladora no está en funcionamiento.

- Reduciendo k_1/k_2 . En esta situación, al reducirse la demanda eléctrica neta, el sistema cambia de estrategia y opta por desacoplar grupos durante las horas de demanda baja e intermedia y producir agua en las horas de demanda alta.

En cuanto a la modificación de los parámetros que influyen a la demanda eléctrica neta de manera indirecta (nivel máximo del embalse y caudal máximo permeado), la respuesta del sistema:

- Aumentando N_{max} . El comportamiento es muy similar al estudio del caso básico, pero el aumento de la capacidad del embalse permite que la desaladora esté más horas sin producir agua en las horas de mayor demanda eléctrica, reduciendo los costes.
- Reduciendo N_{max} . En este caso el sistema no tiene tanta flexibilidad como en casos anteriores para distribuir la producción de agua debido a que la restricción del embalse toma mayor peso. Así, el coste del sistema aumenta.
- Aumentando Q_{max} . Al aumentar la capacidad de producción del agua, el sistema puede evitar producir agua en los momentos de demanda eléctrica baja y desacoplar grupos porque, el agua necesaria para alcanzar la demanda de agua en las horas de demanda eléctrica más alta, se puede concentrar en las horas de demanda eléctrica intermedia. Así, el coste de operación del sistema se reduce.
- Reduciendo Q_{max} . Al igual que al reducir N_{max} , el sistema no tiene flexibilidad alguna para distribuir la producción de agua y en todas las horas se produce el mismo caudal de agua. Así, los costes se incrementan, incluso volviéndose más caro que en el caso de estudio con gestión de demanda simple, ya que en este caso si que se tiene algo más de flexibilidad en la operación del sistema.

En la siguiente figura se recogen los resultados de todos los casos de estudio simulados con sus respectivos costes y el porcentaje de mejora respecto al caso de estudio básico donde se introduce en la operación de la planta desaladora en el problema de unit commitment.

	Costes (€)	Mejora (%)
Gestión demanda simple	18.511,73 €	-5,15%
Modelos consumo de la desaladora	17.605,11 €	-
Cambio del perfil de demanda de agua	17.182,34 €	2,40%
K1 (doble)	23.994,05 €	-36,29%
K1 (mitad)	16.054,05 €	8,81%
K2 (doble)	19.504,08 €	-10,79%
K2 (mitad)	17.150,12 €	2,58%
Nmax (doble)	17.501,22 €	0,59%
Nmax (mitad)	18.224,70 €	-3,52%
Qmax (doble)	17.045,88 €	3,18%
Qmax (mitad)	18.828,92 €	-6,95%

Figura 58. Resultados de todos los casos de simulación. Fuente: Elaboración propia.

Con todos los resultados obtenidos, se ve cómo el parámetro que más influye en el coste final de la operación del sistema es el término independiente del modelado del consumo energético de la planta eléctrica.

Es trivial ver que al doblar el parámetro k_1 , los costes se incrementan drásticamente, ya que este cambio en el parámetro repercute de manera directa en el consumo energético de la planta y, por tanto, en la demanda eléctrica neta. Como ya se comentó, este aumento de k_1 se traduce en un aumento de aproximadamente el 35% de la demanda neta final (kW), con los costes que esto trae consigo. Reducir el parámetro k_1 tiene unas consecuencias idénticas, pero en sentido contrario.

Otro parámetro que influye de manera significativa es el caudal de producción máximo de la planta desaladora.

Cambiar este parámetro se traduce en un cambio en la flexibilidad del sistema que permite que sea o no posible la concentración de la producción de agua necesaria para suplir la demanda en algunas horas para poder aliviar la producción de energía en otras.

4.3. Caso de estudio real

4.3.1. El archipiélago canario

Tras analizar un caso hipotético sencillo lo más realista posible, se propone integrar el modelo del consumo de energía de plantas desaladoras en el problema de unit

commitment de un sistema real para conocer los beneficios reales en términos de costes y flexibilidad que éste podría traer.

El archipiélago escogido ha sido el canario. El archipiélago cuenta con una gran historia de desalación, siendo la primera ubicación europea que logró implantar una planta desaladora en el año 1964.

A partir de ese momento la proliferación de desaladoras por el archipiélago ha tomado una forma exponencial como se puede ver en la Figura 59.

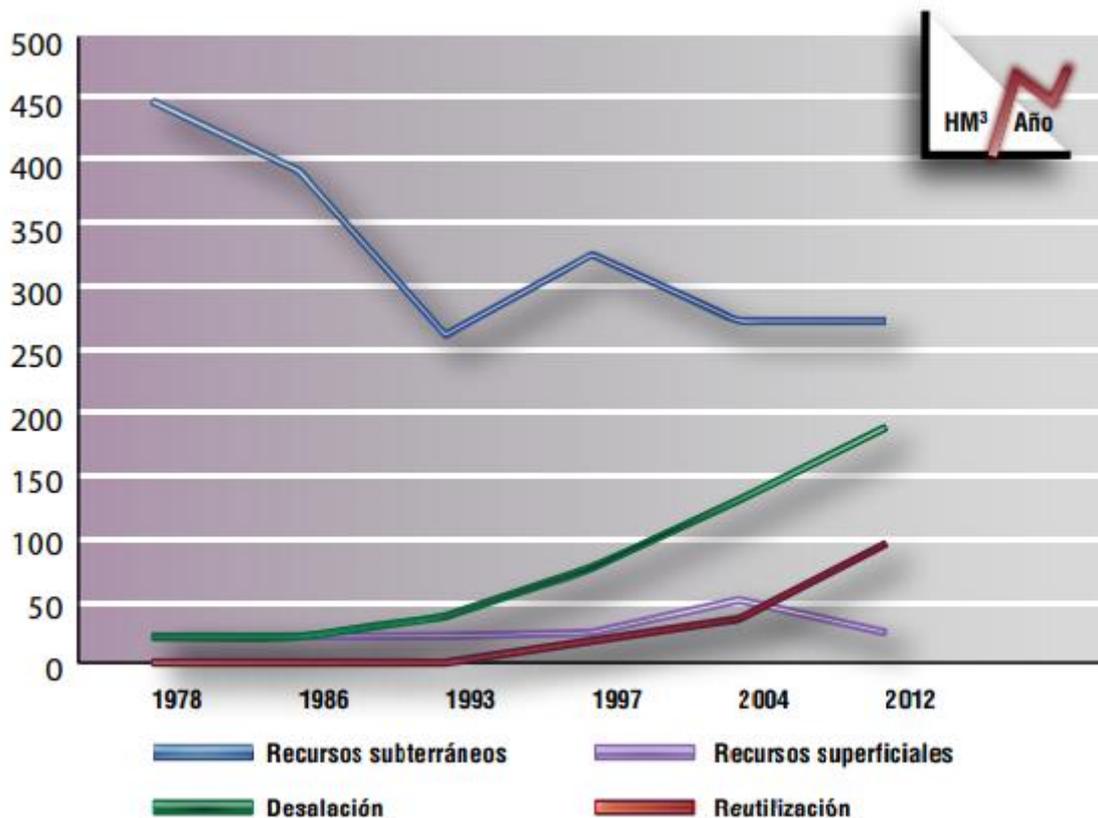


Figura 59. Evolución de la oferta de agua en Canarias. Fuente: Gobierno de Canarias (<http://www.gobcan.es/agricultura/temas/aguas/aguacanaria.htm>)

Las condiciones climáticas, fundamentalmente por la escasez de lluvia, como las características morfológicas del terreno han sido piezas claves de la proliferación de plantas de desalación.

Hasta hace cincuenta años la demanda de agua se suplía gracias a los recursos subterráneos del archipiélago. Sin embargo, la captación sin control de estas aguas sumado a la falta de recursos hídricos superficiales y a la sobreexplotación de los acuíferos ha provocado una disminución de los caudales captados y a la intrusión marina, un efecto que aumenta la salinidad de las aguas de los acuíferos costeros.

Todo lo anterior ha provocado la búsqueda de alternativas para suplir la demanda de agua del archipiélago que, a su vez, también crece de desorbitada debido a la presencia de grandes oleadas de turistas.

Por todo lo anterior, Canarias ha sido conocido en el siglo XX como un gran laboratorio de las diferentes técnicas de desalación. En la se observa la capacidad de desalación de la isla de Gran Canaria, que consigue ilustrar la importancia de la presencia y evolución de las plantas desaladoras en las últimas cuatro décadas.

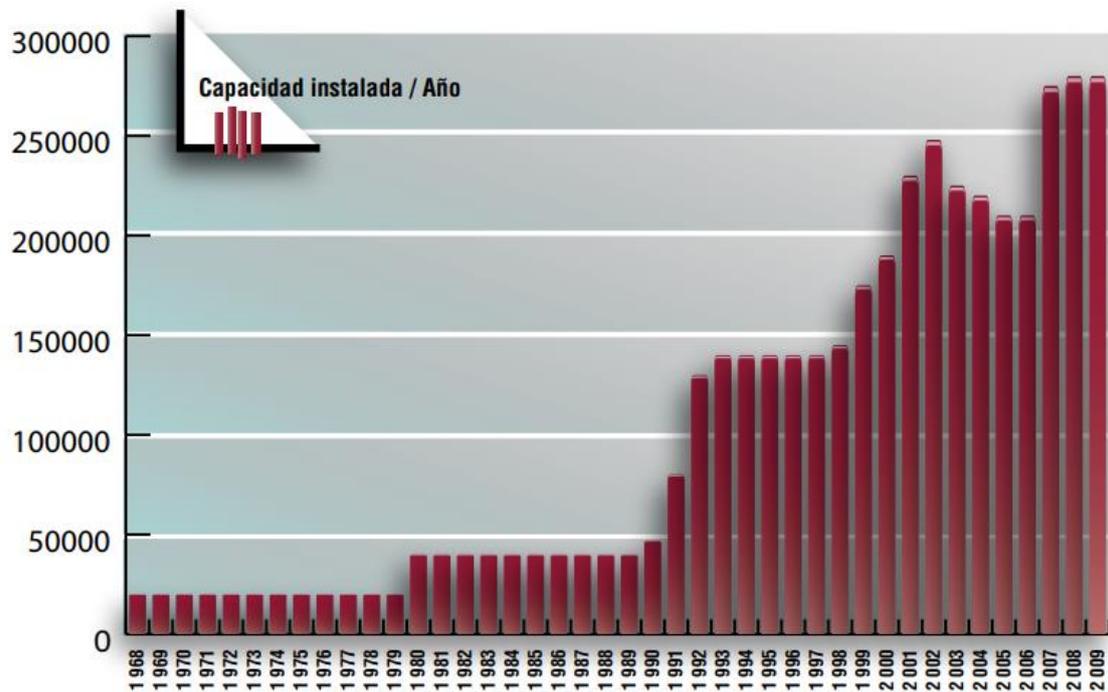


Figura 60. Evolución de la capacidad de desalación en la isla de Gran Canaria. (m³/d). Fuente: CIAGC.

Cada una de las islas está sujeta a unas condiciones que han marcado su desarrollo económico a lo largo de los años. Hasta hace unos años, la actividad económica que predominaba en el archipiélago era la agricultura; pero esta tendencia ha ido cambiando y, en la actualidad, el sector terciario (turismo y actividades relacionadas) genera más del 70% de la riqueza de la región.

Estas condiciones, de manera lógica, repercuten en la demanda de agua que tiene cada una de las islas. En la siguiente figura se muestra la demanda de agua por sector en 2015 de cada uno de los sectores según datos de DGA (Planes Hidrológicos Insulares en tramitación o avance).

Demanda de agua por sectores 2015 (hm³/año)

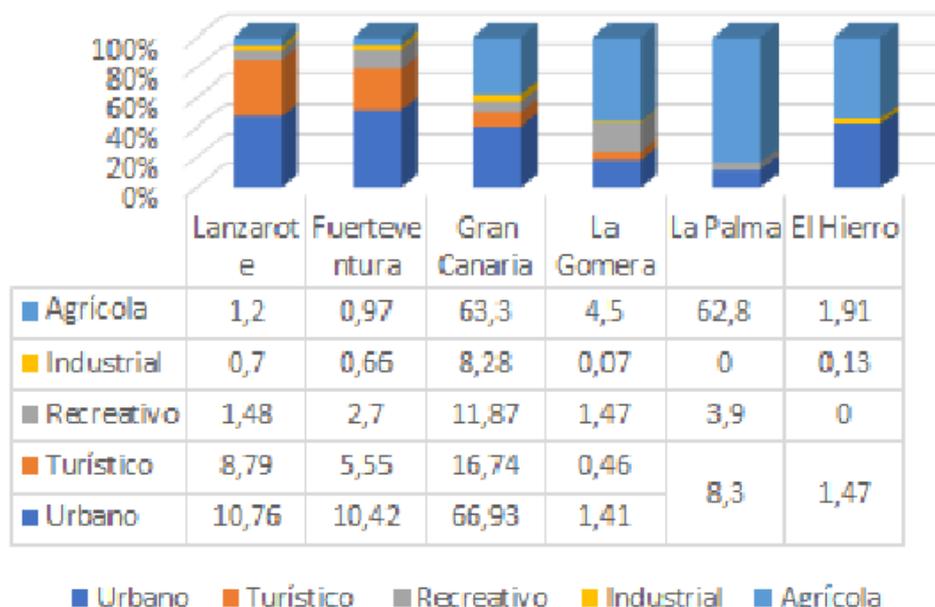


Figura 61. Demanda de agua por sectores en Canarias 2015. Fuente: Elaboración propia con datos de DGA.

Para alcanzar esta demanda de agua, es necesario, como ya se ha comentado previamente, el uso de producción industrial de agua dulce a través de plantas desaladoras.

Así, a día de hoy, existen en el archipiélago un total de 335 desaladoras que abastecen, en algunos casos, como el caso de Lanzarote, más del 95% de la demanda de agua total. Además, cerca del 90%, según FCCA (Fundación Centro Canario de Agua) en 2015, más de un 90% de las plantas desaladoras utilizan la tecnología de ósmosis inversa, estudiada en el presente documento.

Además, la demanda eléctrica debida a la producción de agua desalada supone un 14% a un 0% de la demanda eléctrica total dependiendo de la isla.

4.3.2. Unit commitment La Palma con modelo de desalación incluido

Con el fin de poder estudiar la utilidad de la propuesta en una situación real, se ha escogido la isla de la Palma debido a que su tamaño en población y en demanda y generación eléctrica hacen posible su estudio y análisis de manera más factible.

A continuación, en la Figura 62 se muestra la cobertura de la demanda eléctrica según la fuente en 2017 en la isla.

Cobertura de la demanda por fuentes (2017)

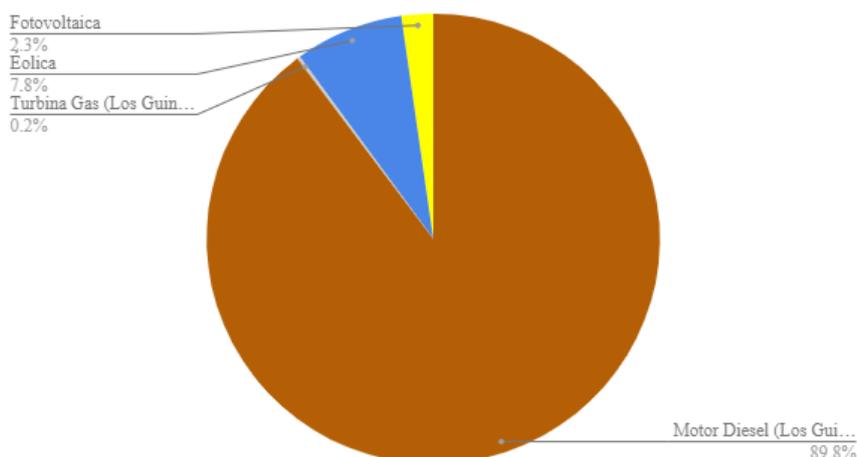


Figura 62. Cobertura de la demanda según la fuente en la isla de la Palma en 2017. Fuente: www.lapalmarenovale.es/energia-en-la-palma/

Según el “Plan de Ecogestión en la producción y distribución de agua de Canarias” del Instituto Tecnológico de Canarias en 2015, la demanda anual de agua de la isla asciende a 75 hm³/año (205.479,45 m³ diarios).

A continuación, se muestran los parámetros de generación del sistema de La Palma.

	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6	P_7	P_8	P_9	P_{10}	P_{11}
P_g^{max} (kW)	3800	3800	3800	4300	6700	6700	11500	11200	11500	11500	21000
P_0	2400	2400	2400	0	4800	0	10000	0	0	6600	0
P_g^{min} (kW)	2400	2400	2400	2800	3300	3300	6600	6600	6600	6600	4900
R_g^{up} (kW)	3800	3800	3800	4300	6700	6700	11500	11200	11500	11500	21000
R_g^{down} (kW)	3800	3800	3800	4300	6700	6700	11500	11200	11500	11500	21000
$nhsd$	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
$nhsu$	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
$nhtd$	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
$nhtu$	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
C_g^{fix} (€/kW)	52,7	52,7	52,7	89,9	134,9	134,9	120,6	125,92	125,92	125,92	639,3
C_g^{lin} (€/kW)	0,08	0,08	0,08	0,09	0,08	0,08	0,07	0,09	0,09	0,09	0,11
$C_g^{start-up}$ (€)	267,7	267,7	267,7	385,5	499,4	499,4	1416	586,5	586,5	586,5	1208,6
$C_g^{shut-down}$ (€)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabla 6. Parámetros de los grupos generadores en la isla de La Palma. Fuente: Elaboración propia.

Por otra parte, los parámetros de la desaladora se recogen en la siguiente tabla:

	Desaladora
N_{max} (m ³)	4500
N_0 (m ³)	800
N_{min} (m ³)	700
$q_{p,max}^{OI}$ (m ³ /h)	2000
$q_{p,min}^{OI}$ (m ³ /h)	0

k_1	1400
k_2	0,85

Tabla 7. Parámetros de la planta desaladora de La Palma. Fuente: Elaboración propia.

En cuanto a la demanda eléctrica, en la Figura 63 se presenta la demanda eléctrica de la isla en tres días representativos, además de la generación eólica y fotovoltaica en la Figura 64 y Figura 65 respectivamente.

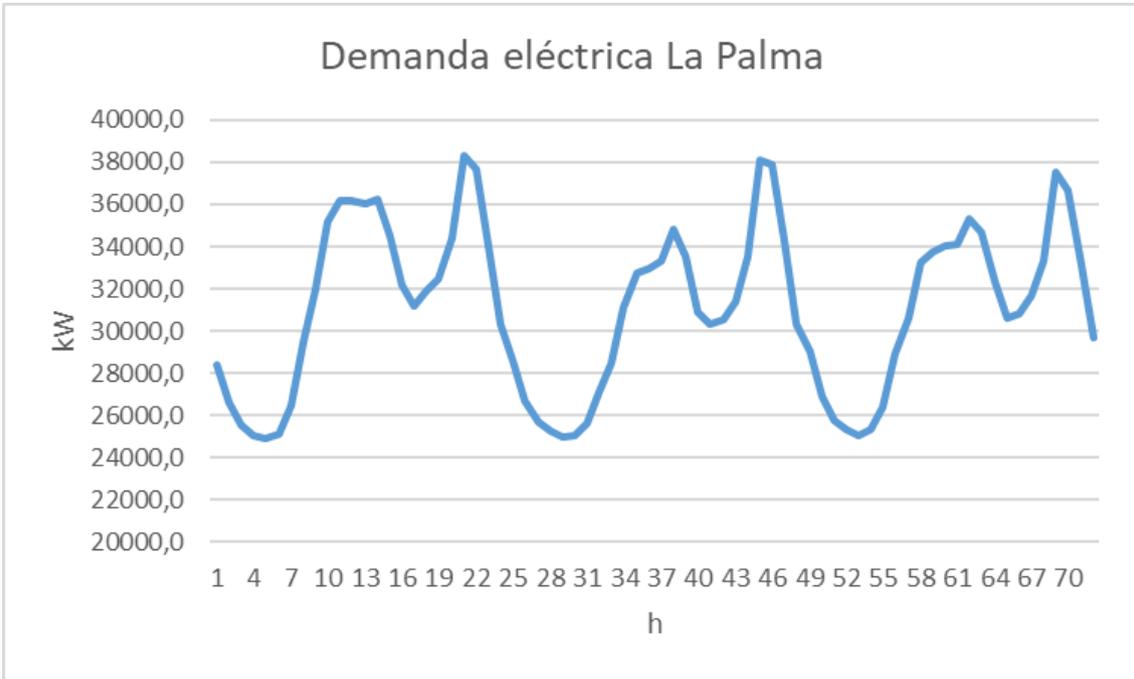


Figura 63. Demanda eléctrica de tres días característicos de la isla de La Palma. Fuente: Elaboración propia.

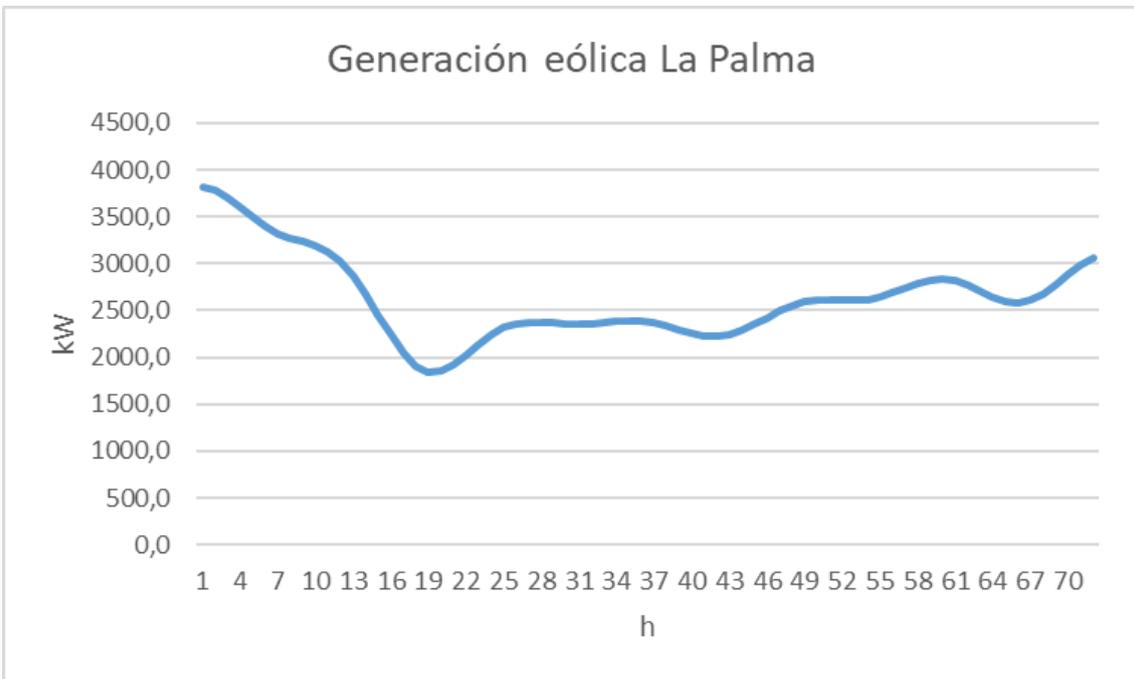


Figura 64. Generación eólica de tres días característicos de la isla de La Palma. Fuente: Elaboración propia.

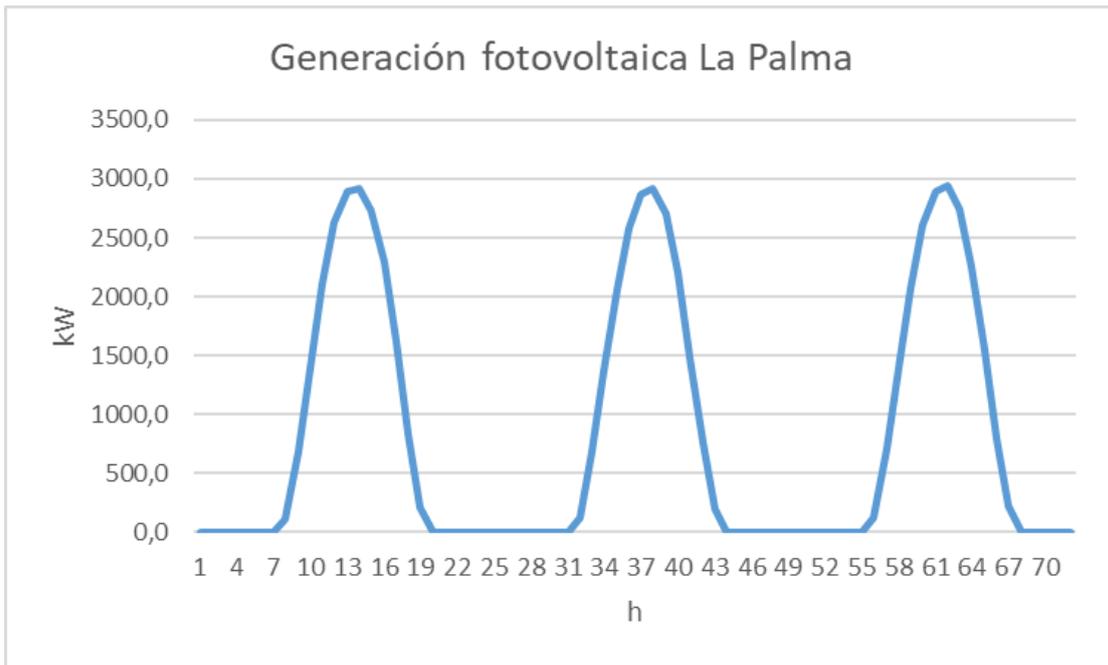


Figura 65. Generación fotovoltaica de tres días característicos de la isla de La Palma. Fuente: Elaboración propia.

En cuanto a la demanda de agua de la planta desaladora, se recoge en la Figura 66.



Figura 66. Demanda de agua de la planta desaladora en la isla de La Palma. Fuente: Elaboración propia.

El perfil de demanda de agua se ha llevado a cabo extrapolando el perfil de demanda de agua del apartado 4.2.1 y ajustándolo al caso de La Palma conociendo la demanda diaria de agua de la isla. Además, se ha supuesto que un 17,5% de esta demanda de agua

proviene de la desalación, como en el caso de otras islas del archipiélago con actividades económicas muy similares a las de La Palma.

Con todos los datos anteriores, se ha resuelto el problema de unit commitment en el software Matlab, los resultados se muestran en las

En el caso real se corrobora como en casos anteriores la tendencia de la planta desaladora a trabajar en caudales altos o nulos para reducir la demanda eléctrica a lo largo del día y, así, reducir el coste de operación del sistema. Esto se ve reflejado en la Figura 67.

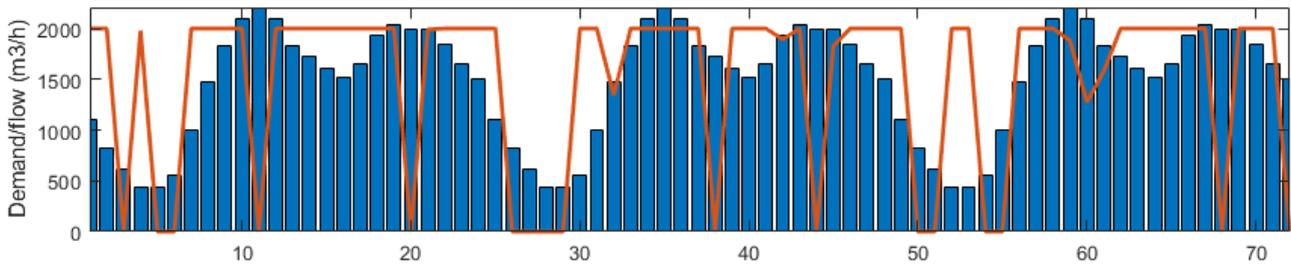


Figura 67. Variables relacionadas con la operación del agua del caso de estudio real en la isla de La Palma. Fuente: Elaboración propia.

Por una parte, gracias a esta gestión del agua se consigue que diecisiete de las setenta y dos horas la planta desaladora no añada demanda eléctrica al sistema y, por consiguiente, la demanda eléctrica media baje y se reduzcan con ella los costes.

Sin embargo, por otra parte, se producen variaciones de la demanda eléctrica significativas en ciertos momentos del día. Por lo que el sistema de generación debe estar provisto de elementos que permitan que esta subida sea factible.

La demanda eléctrica neta del sistema se representa en la Figura 68.

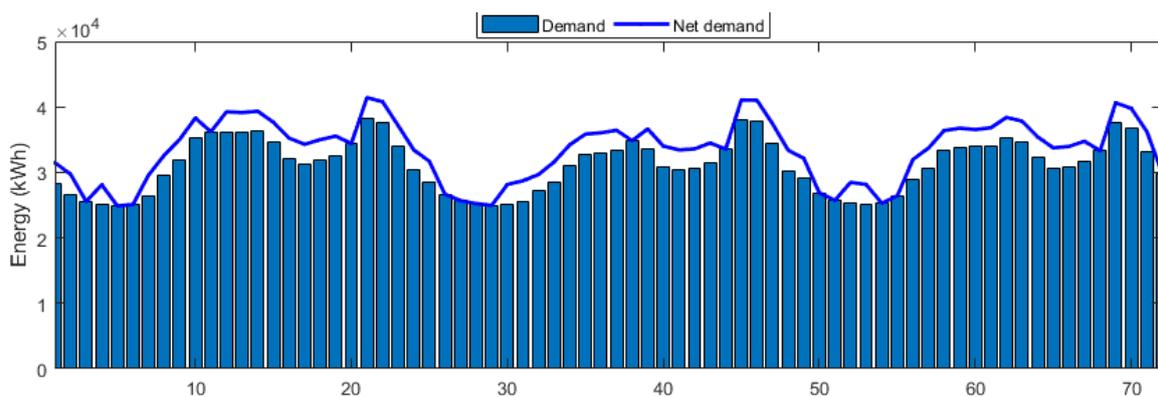


Figura 68. Demanda del caso de estudio real de la isla de La Palma. Fuente: Elaboración propia.

La solución óptima que se propone es dejar de producir agua en horas de periodos valle y así poder desacoplar grupos y reducir costes. Esto se puede contemplar principalmente en la horas 25 de la Figura 69.

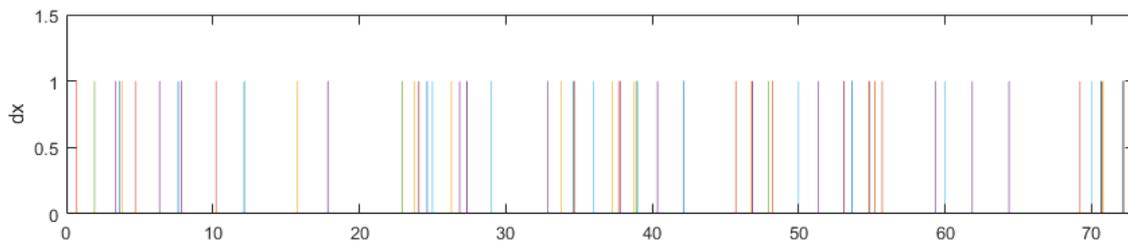


Figura 69. Conexión/Desconexión de los grupos generadores del caso de estudio real en la isla de La Palma. Fuente: Elaboración propia

Con todo esto se consigue un coste de la operación del sistema para los tres días de 260.591,68 €.

4.3.3. Unit Commitment La Palma con gestión de demanda simple

Al no existir ninguna planta de desalación en la isla de La Palma, en el apartado anterior se ha supuesto una demanda eléctrica adicional a la existente con el concepto de la nueva actividad de desalación.

En este apartado, como ya se hizo en el apartado 4.1.2, se propone estudiar el mismo problema que en el apartado 4.3.2, pero considerando que la planta desaladora produce en todas sus horas un caudal medio con una variación a subir y a bajar dentro de un rango. Esto es conocido como gestión de demanda simple.

En el caso real, la demanda media de agua al día es de 1500 m³ con una demanda máxima de 2208 m³ y una demanda mínima de 442 m³. Así, considerando que el consumo energético está modelado, como se expuso en la Tabla 7, por la ecuación:

$$P_W^{OI} = 1400 + 0,85 \cdot q_P^{OI} \quad (39)$$

Se consigue el consumo eléctrico medio de la planta desaladora y los límites máximos y mínimos que llega a consumir. Se representa en la Figura 71.

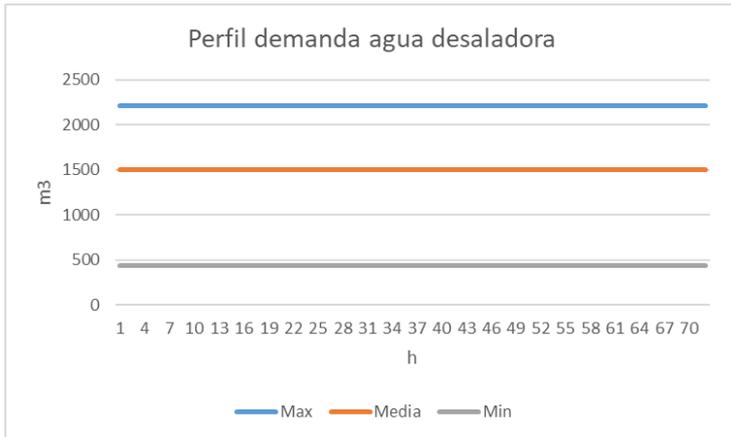


Figura 70. Perfil de demanda de agua media con rangos máximos y mínimos. Fuente: Elaboración propia.

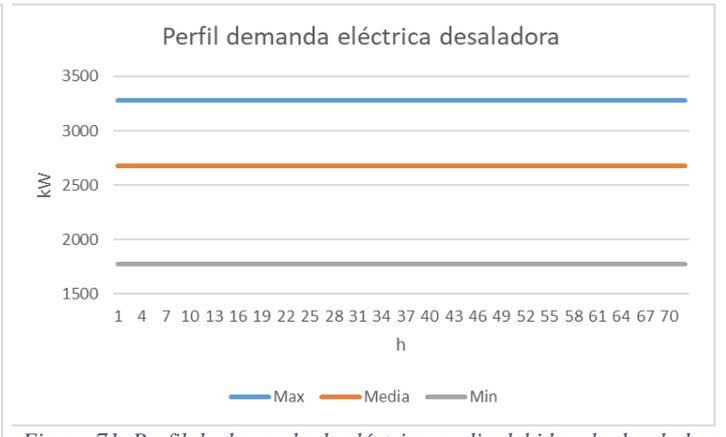


Figura 71. Perfil de demanda de eléctrica media debida a la desaladora con rangos máximos y mínimos de demanda. Fuente: Elaboración propia

El problema de unit commitment es idéntico al caso 4.3.2, pero sin introducir el modelo de consumo eléctrico de la planta desaladora y considerando que la planta produce 1500 m³ todas las horas con variaciones de 600 m³ a subir y 900 m³ en horas de demanda baja.

Con todo lo anterior, los resultados obtenidos en el software Matlab se presentan a continuación.

Al no incluir el modelo de la desaladora, se comprueba como no existe demanda eléctrica adicional de la operación de la desaladora, si no que esta demanda ya se encuentra incluida en la demanda eléctrica neta, como se ve en la Figura 72.

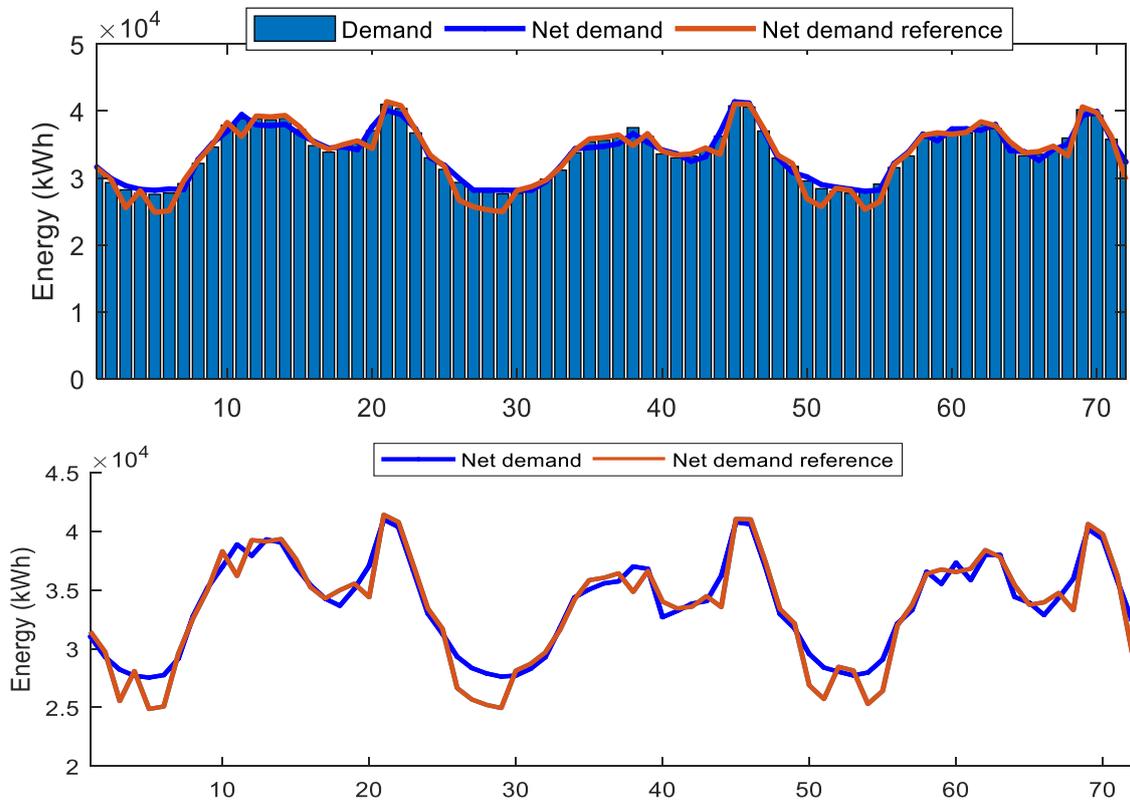


Figura 72. Demanda del caso de estudio real de la isla de La Palma con gestión de demanda simple. Fuente: Elaboración propia.

Se comprueba como la no optimización de la distribución del caudal permeado a lo largo del tiempo trae consigo una operación más ineficiente que incrementa los costes y disminuye la flexibilidad del sistema al no poder producir el agua en los periodos en los que venga mejor su producción.

Ambas curvas de demanda eléctrica neta son muy parecidas y siguen un mismo patrón excepto en las horas donde la desaladora deja de producir agua, que es donde se consigue la disminución de los costes de la operación del sistema.

Por otra parte, si se amplía la Figura 72 se puede observar cómo funciona la gestión de demanda simple: la demanda eléctrica está representado con el gráfico de barras, mientras que la demanda eléctrica neta se ve representado con la gráfica de color azul donde está sumada o restada la variación de la demanda debida a dicha gestión (Figura 73).

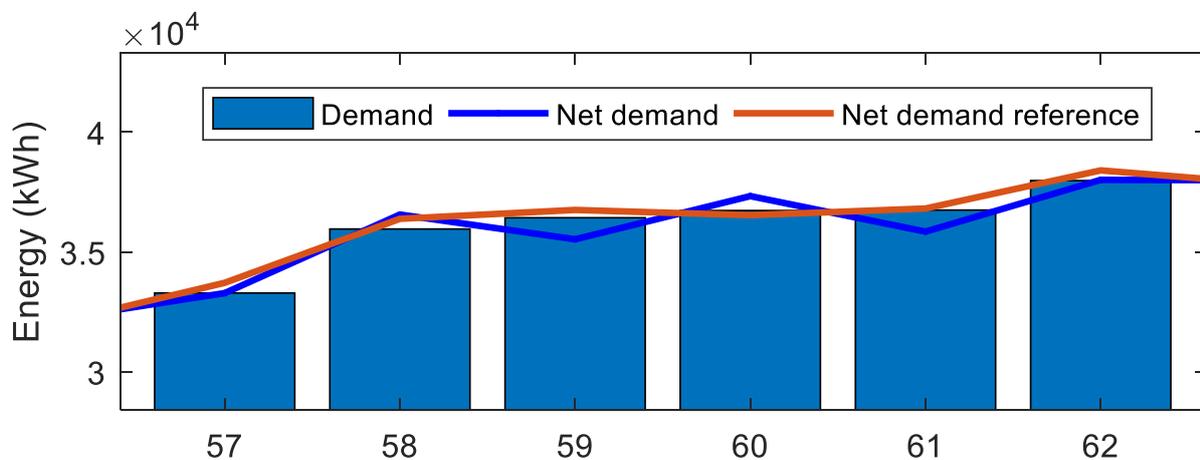


Figura 73. Detalle de la demanda eléctrica del caso de estudio real en la isla de La Palma.

Debido a que en todas las horas se ha supuesto que la desaladora está operando, la demanda eléctrica y, por tanto, el coste de la operación del sistema se eleva debido al término independiente del modelo de consumo que se explicó en apartados anteriores.

El coste total de la operación del sistema asciende a 268.126,24 €.

4.3.4. Unit Commitment La Palma con gestión de demanda pronunciada

En este apartado se estudia la reacción del sistema al aumentar las variaciones que puede asumir la gestión de la demanda. Se ha impuesto que la variación de bajada puede llegar a los 2675 kW: situación en la que la desaladora no produce agua.

En la Figura 74 se observan que el sistema tiene más flexibilidad que en el apartado anterior (4.3.3.) para distribuir la producción de agua a lo largo del día. Esto consigue una reducción de costes en la operación del sistema.

De hecho, darle la posibilidad de subir y bajar la demanda al sistema de manera que se pueda dar la situación en la que la planta desaladora esté sin funcionar, hace que los perfiles de demanda netos se parezcan al caso en el que está el modelo de consumo eléctrico del proceso de desalación.

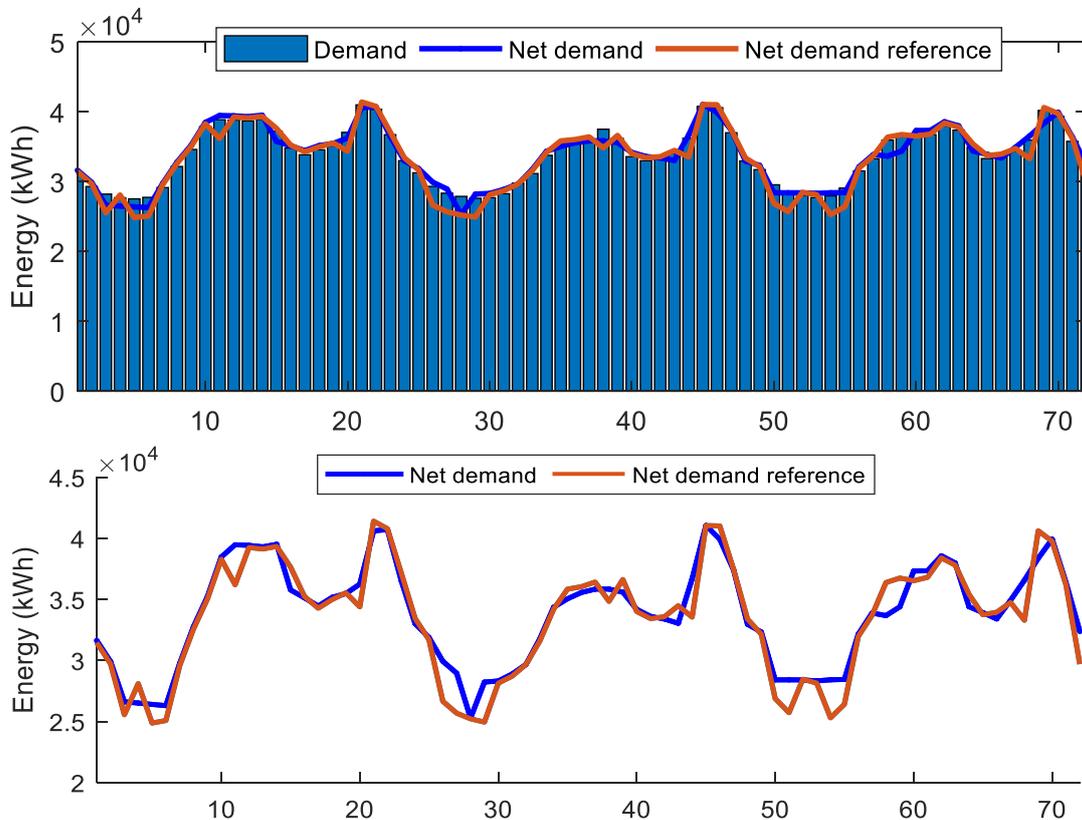


Figura 74. Demanda del caso de estudio real de la isla de La Palma con gestión de demanda simple pronunciada.
Fuente: Elaboración propia

Sin embargo, al igual que en el apartado anterior (4.3.3.), al no estar introducida la restricción de cumplir con la demanda de agua en todas las horas, no se puede afirmar que ésta se cumpla.

Además, hay que recalcar que este caso de estudio no es muy realista no únicamente debido a que la demanda de agua en todas horas puede no alcanzarse, si no porque la gestión de la demanda puede imponer que en una determinada hora el aumento de demanda eléctrica a la demanda eléctrica inicial esté entre cero y 1775 kW, lo que es imposible ya que la desaladora no puede consumir menos de 1400 kW en una hora (debido al término fijo del modelo de consumo eléctrico).

Con toda la flexibilidad que se le inyecta al sistema en este caso de estudio, el coste de la operación del sistema se reduce hasta 223.287,71 €.

En la siguiente figura se recogen los resultados del caso de estudio en la isla de La Palma.

	Costes (€)	Mejora (%)
Gestión demanda simple	268.126,24 €	-2,81%
Modelos consumo de la desaladora	260.591,68 €	-
Gestión demanda simple pronunciada	223.287,71 €	16,71%

Figura 75. Resultados de introducir el modelo de consumo energético en la operación del sistema en el caso real de La Palma. Fuente: Elaboración propia.

5. Conclusiones

La existencia del nexo agua-energía es evidente y encontrar elementos que permitan hacer un estudio de los dos elementos de manera conjunta es una actividad necesaria para poder mejorar la eficiencia del uso de los recursos y, con ello, la reducción de los costes de los procesos en general.

Uno de los elementos que pueden ser utilizados para hacer un estudio conjunto de ambas son las desaladoras, que utilizan energía eléctrica para poder producir agua para distintos consumos (doméstico, industrial, agricultura, etc.).

Los sistemas eléctricamente aislados de pequeño tamaño y con una red de infraestructuras eléctricas débilmente malladas, como el archipiélago canario, hacen que los sistemas sean menos estables y seguros que otros sistemas interconectados. Así, para mejorar la operación del sistema se podrían introducir sistemas de almacenamiento de energía o elementos que aporten flexibilidad al sistema.

Por todo lo anterior, y debido a la proliferación de las desaladoras en determinadas islas debido a la falta de recurso hídricos, las desaladoras son un elemento clave para aunar el estudio de la energía y el agua. En este trabajo se ha propuesto un modelo lineal para representar la desaladora en el despacho económico.

En primer lugar, se ha realizado una comparación entre la operación del sistema con una gestión de demanda simple, que incluye el consumo medio de la desaladora con variaciones en la misma, y la operación del sistema incluyendo el modelo de consumo eléctrico de la planta desaladora. También se compara el modelo desarrollado con un modelo que la gestiona de una manera más simple.

La conclusión de este primer caso de estudio es que la introducción del modelo del consumo eléctrico de la planta desaladora trae consigo relativas reducciones en el coste de la operación del sistema y un aumento en la flexibilidad del sistema.

El modelo con una gestión de la demanda simple puede servir para tener una idea general de cómo puede funcionar el sistema, pero no es un modelo eficaz en cuanto al cumplimiento de la demanda de agua en todas las horas del problema.

Para reducir los costes de la operación del sistema incluyendo el consumo eléctrico de la planta desaladora, el sistema opta por trabajar en la planta desaladora con caudales de permeado altos o nulos debido a que el término independiente (k_1) tiene un peso importante en el modelo del consumo de la planta desaladora.

Así, cuando el sistema tiene la opción de distribuir el agua producida a lo largo del día, el sistema produce agua en horas donde la demanda eléctrica es baja o intermedia para dejar de producir agua en las horas de mayor demanda eléctrica y conseguir reducir la demanda eléctrica neta en estas horas.

En segundo lugar, se ha realizado un análisis de sensibilidad de diferentes parámetros relacionados con las desaladoras. Se ha encontrado que los parámetros más influyentes desde el punto de vista de la respuesta del sistema son: el término independiente del

modelo lineal de consumo eléctrico de la planta desaladora y el caudal máximo que puede producir la misma.

Cuando se aumenta el término independiente del modelo de consumo eléctrico de la planta desaladora (k_1), el sistema reacciona de manera similar al caso de estudio básico. Sin embargo, al reducir el parámetro (k_2), el sistema cambia de estrategia y opta por desacoplar grupos durante las horas de demanda eléctrica baja e intermedia y producir agua en las horas de mayor demanda eléctrica.

En cuanto al caudal máximo que puede producir la planta de desalación, al aumentar la capacidad de producción del agua, el sistema puede evitar producir agua en los momentos de demanda eléctrica baja y desacoplar grupos porque, el agua necesaria para alcanzar la demanda de agua en las horas de demanda eléctrica más alta, se puede concentrar en las horas de demanda eléctrica intermedia. Así, el coste de operación del sistema se reduce.

Sin embargo, al reducir Q_{\max} el sistema deja de tener flexibilidad a la hora de distribuir la producción de agua a lo largo del día y el caudal producido en todas las horas es similar. Así, los costes de la operación del sistema aumentan.

Por último, en el caso de estudio real de la isla de La Palma, se llega a la conclusión de que, dependiendo de lo realista que sea la gestión de la demanda simple, la introducción del modelo del consumo eléctrico de la planta desaladora trae mejoras a nivel de flexibilidad y, en definitiva, a nivel de costes en la operación del sistema eléctrico.

La reducción de costes del modelo con el consumo eléctrico de las plantas desaladoras respecto a los modelos con una gestión de demanda simple se debe principalmente a la imposición de que la planta desaladora trabaje lo más cerca posible de su máximo técnico siempre que esté en funcionamiento ya que, si no se introduce una demanda eléctrica adicional que podría evitarse debido al término fijo del modelo lineal (k_1).

Además, es importante recalcar que, aparte de reducir los costes del sistema, la integración del nexo agua-energía le transfiere al sistema una flexibilidad extra a la hora de decidir cuándo producir agua y relajar la demanda eléctrica del sistema, permitiendo que los grupos generadores puedan adaptarse a condiciones dinámicas y cambiantes, manteniendo el equilibrio entre generación y demanda.

Esta flexibilidad es necesaria, especialmente en las islas canarias, debido a:

- Porcentaje de electricidad generada mediante recurso renovables variables.
- Dependencia de combustibles fósiles externos con la incertidumbre en los precios que trae consigo.

Aunque el estudio del caso real haya sido realizado en la isla de La Palma, debido al carácter genérico del modelo, puede ser extrapolado a otras poblaciones para analizar la respuesta del sistema ante la introducción del modelo de consumo energético de planta desaladoras en el problema de unit commitment.

6. Bibliografía

- [1] K. Oikonomou and M. Parvania, "Optimal Coordination of Water Distribution Energy Flexibility with Power Systems Operation," in *IEEE Transactions on Smart Grid*.
- [2] Afreen Siddiqi, Laura Díaz Anadon, "The water-energy nexus in Middle East and North Africa". 2011
- [3] K. Oikonomou, M. Parvania and S. Burian, "Integrating water distribution energy flexibility in power systems operation," *2017 IEEE Power & Energy Society General Meeting*, Chicago, IL, 2017.
- [4] W. Qi, J. Liu and P. D. Christofides, "Supervisory Predictive Control for Long-Term Scheduling of an Integrated Wind/Solar Energy Generation and Water Desalination System," in *IEEE Transactions on Control Systems Technology*.
- [5] W. Qi, J. Liu and P. D. Christofides, "A two-time-scale framework to supervisory predictive control of an integrated wind/solar energy generation and water desalination system," San Francisco.
- [6] L. House, "Water supply related electricity demand in california," Contract, no. 500-03, p. 026, 2006.
- [7] C. A. Scott, S. A. Pierce, M. J. Pasqualetti, A. L. Jones, B. E. Montz, and J. H. Hoover, "Policy and institutional dimensions of the water–energy nexus," *Energy Policy*, vol. 39, no. 10, pp. 6622–6630, 2011
- [8] U. Lele, M. Klousia-Marquis, and S. Goswami, "Good governance for food, water and energy security," *Aquatic Procedia*, vol. 1, 2013.
- [9] A. Santhosh, A. M. Farid, and K. Youcef-Toumi, "Real-time economic dispatch for the supply side of the energy-water nexus," *Applied Energy*, vol. 122, pp. 42–52, 2014
- [10] "The impact of storage facility capacity and ramping capabilities on the supply side economic dispatch of the energy–water nexus," *Energy*, vol. 66, pp. 363–377, 2014.
- [11] "Optimal network flow for the supply side of the energy-water nexus," in *Intelligent Energy Systems (IWIES)*, 2013 IEEE International Workshop on. IEEE, 2013
- [12] PETRUCCI, R. H., W. S. HARWOOD, F. G. HERRING. (2002). *General Chemistry Principles and Modern Applications (Eighth Edition)*. Table 14.3. Ed. CHIPS. Weimar, USA.
- [13] Alejandro Sánchez Alcaide. "Estudio comparativo de los principales procesos de desalinización y diseño de una planta desalinizadora de agua mediante ósmosis inversa con una capacidad de 10.000 m³/día" 2017.
- [14] Agustín M. Delgado Torres. "Diseño preliminar de un sistema de desalación por ósmosis inversa mediante energía solar térmica." Tesis doctoral. 2007.

- [15] Baltasar Peñate, Lourdes García-Rodríguez, Energy-Efficient Design of Seawater Reverse Osmosis Desalination Technology.
- [16] Carlos Tejedor. “Introducción a la Desalación por ósmosis inversa. Conceptos básicos” EOI. 2008.
- [17] Richard Stover, Antonio Ordoñez, Joan Galtes. “Permeate recovery rate optimization at the Alicante Spain SWRO Plant”. 2009.
- [18] “Energy consumption and recovery in reverse osmosis” Veera Gnanewgar Gude.
- [19] Claudia Viciano Fortes. “Estudio de los sistemas de recuperación de energía en plantas desaladoras por ósmosis inversa”. 2015.
- [20] Manuela Fernández Murcia. “Planta de Ósmosis inversa de un ferry tipo ROPAX”. 2015.
- [21] Alejandro Solís Hernández. “Eficiencia energética en el prediseño de plantas de desalación de agua de mar por ósmosis inversa”. 2015.
- [22] “Seawater Desalination Power Consumption”. White Paper. WaterReuse Association. 2011.
- [23] Estaban M. Gil Sagás. “Programación de la generación de corto plazo en sistemas hidroeléctricos usando algoritmos genéticos” Universidad Católica de Chile. 2001.
- [24] “Historia de la desalación en primera persona: de hitos pioneros, a referente internacional”. Asociación Española de Desalación y Reutilización.

Otros recursos bibliográficos consultados:

W. Qi, J. Liu and P. D. Christofides, "Supervisory Predictive Control for Long-Term Scheduling of an Integrated Wind/Solar Energy Generation and Water Desalination System," in IEEE Transactions on Control Systems Technology

I. Ben Ali, M. Turki, J. Belhadj and X. Roboam, “Energy management of a Reverse Osmosis desalination process powered by renewable energy sources” 2012 16th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference, Yasmine Hammamet, 2012, pp. 800-805.

"Water/Energy management approaches of an autonomous water desalination unit fed by a hybrid (Photovoltaic-Wind) system," 2014 International Conference on Electrical Sciences and Technologies in Maghreb (CISTEM), Tunis

D. Franjo, G. Stark, B. Hodge and A. Schoder “Integrated Energy Planning with a High Share of Variable Renewable Energy Sources for a Caribbean Island” 2018

F. J. Díaz Pérez, M. R. Pino Otín, A. G. Mouhaffel, R. D. Martín and D. Chinarro, “Energy and Water Consumption and Carbon Footprint in Tourist Pools Supplied by

Desalination Plants: Case Study, the Canary Islands” in IEEE Access, vol. 6, pp. 11727-11737, 2018.

M. Ammous and M. Chaabene, “Energy optimization for a photovoltaic/thermal desalination Plant” 2017 8th International Renewable Energy Congress (IREC), Amman, 2017, pp. 1-6.

M. Liu, Á. Ortega, A. C. Melhorn, D. Flynn and F. Milano, “Stability-constrained unit commitment with water network loads” 2016 IEEE International Conference on Power System Technology (POWERCON), Wollongong, NSW, 2016

Q. Wu, L. Wang and B. Li, “An optimized demand response strategy for electric water heaters and the associated impact on power system operational reliability” 2017 International Smart Cities Conference (ISC2), Wuxi, 2017,

I. Ben Ali, M. Turki, J. Belhadj and X. Roboam, “Using quasi-static model for water/power management of a stand-alone wind/photovoltaic/BWRO desalination system without batteries” 2016 7th International Renewable Energy Congress (IREC), Hammamet, 2016

F. Valenciaga, P. F. Puleston, and P. E. Battaiotto, “Variable structure system control design method based on a differential geometric approach: Application to a wind energy conversion subsystem,” IEE Proc. Control Theory Appl., vol. 151, pp. 6–12, 2004.

F. Valenciaga, P. F. Puleston, and P. E. Battaiotto, “Power control of a photovoltaic array in a hybrid electric generation system using sliding mode techniques,” IEE Proc. Control Theory Appl., vol. 148, pp. 448–455, 2001.

A. R. Bartman, P. D. Christofides, and Y. Cohen, “Nonlinear modelbased control of an experimental reverse-osmosis water desalination system,” Ind. Eng. Chem. Res., vol. 48, pp. 6126– 6136, 2009

S. Shobana, R. Janani “*Optimization of Unit Commitment Problem and constrained emission using genetic algorithm*” IJETAE (International Journal of Emerging Technology and Advance Engineering). 2018

Lukas Sigrist, Enrique Lobato, Francisco M. Echavarren, Ignacio Egado, Luis Rouco, “Island Power Systems”, CRC Press 2016.

G. Morales-España, J. M. Latorre and A. Ramos, "Tight and Compact MILP Formulation for the Thermal Unit Commitment Problem," in IEEE Transactions on Power Systems, vol. 28, no. 4, pp. 4897-4908, Nov. 2013.

K. Dietrich, J. M. Latorre, L. Olmos and A. Ramos, "Demand Response in an Isolated System With High Wind Integration," in IEEE Transactions on Power Systems, vol. 27, no. 1, pp. 20-29, Feb. 2012.

7. Anexos.

7.1. Nomenclatura

Parámetros

- C_g^{fix} coste fijo del grupo generador g [€]
- C_g^{lin} término lineal del coste variable del grupo generador g [€/MWh]
- C_g^{qua} término cuadrático del coste variable del grupo generador g [€/MWh²]
- $C_{g,st}^{start-up}$ coste de arranque del tipo de arranque st del grupo generador g [€]
- $C_g^{shut-down}$ coste de parada del grupo generador g [€]
- D_h^e demanda eléctrica en la hora h [MWh]
- $P_{g,i}^{SU}$ potencia generada del generador g durante el intervalo de arranque i [MW]
- $P_{g,i}^{SD}$ potencia generada del generador g durante el intervalo de parada i [MW]
- P_g^{\min} mínimo técnico del grupo generador g [MW]
- P_g^{\max} generación máxima del grupo generador g [MW]
- $P_{dr}^{up,\min}$ aumento mínimo de la demanda gestionable dr [MW]
- $P_{dr}^{up,\max}$ aumento máximo de la demanda gestionable dr [MW]
- $P_{dr}^{down,\min}$ reducción mínima de la demanda gestionable dr [MW]
- $P_{dr}^{down,\max}$ reducción máxima de la demanda gestionable dr [MW]
- R_g^{up} rampa de subida del grupo generador g [MW/h]
- R_g^{down} rampa de bajada del grupo generador g [MW/h]
- $Minhdown_g$ número de horas un grupo generador tiene que estar parado
- $Minhup_g$ número mínimo de horas un grupo generador tiene que estar funcionando por encima de P_g^{\min}
- $F_{genloss}$ porcentaje de la generación convencional del sistema que hay que cubrir con la reserva a subir [%]
- $F_{resloss}$ porcentaje de la generación renovable del sistema que hay que cubrir con la reserva a subir [%]

F_{resvar} porcentaje de la variación prevista de la generación renovable del sistema que hay que cubrir con la reserva a subir [%]

F_{demvar} porcentaje de la variación prevista de la demanda eléctrica del sistema que hay que cubrir con la reserva a subir [%]

$F_{up2down}$ Fracción de la reserva a subir del sistema que hay que cubrir con la reserva a bajar [-]

F_{limpg} fracción de la potencia máxima del sistema de almacenamiento eléctrico que la generación convencional no debería sobrepasar [-]

Variables continuas

$p_{g,h}^e$ potencia generada por el grupo generador g en la hora h [MW]

$p_{g,h}^{e,net}$ potencia neta generada por el grupo generador g en la hora h [MW]

$p_{dr,h}^{up}$ potencia demandada incrementada por la demanda gestionable dr en la hora h [MW]

$p_{dr,h}^{down}$ potencia demandada reducida por la demanda gestionable dr en la hora h [MW]

$resgen_{g,h}^{up}$ reserva a subir proporcionada por el grupo generador g en la hora h [MW]

$resgen_{g,h}^{down}$ reserva a subir proporcionada por el grupo generador g en la hora h [MW]

Variables binarias

$cx_{g,h}$ arranque del grupo generador g en la hora h [0/1]

$dx_{g,h}$ parada del grupo generador g en la hora h [0/1]

$\delta_{g,h}$ estado de conexión del grupo generador g en la hora h [0/1]

7.2. Creación de matrices

Debido a que la mayor dificultad de la resolución del problema se basa en la creación de las matrices, en este apartado se va a comentar su procedimiento.

Es necesario crear matrices que recogen todas las restricciones de igualdad por una parte (Aeq), y las restricciones de desigualdad por otra (A). En estas matrices se recogen los coeficientes lineales de las restricciones.

A su vez, se crean dos vectores que recogen las constantes de las restricciones: uno para las restricciones de igualdad (beq) y otro para las restricciones de desigualdad (b).

Es importante recalcar que las restricciones de desigualdad deben tener la forma $A \cdot x \leq b$, en el caso de ser una restricción del tipo \geq , habrá que modificarlas para ponerla en la forma correcta.

Así, las matrices tendrán dimensión [número de restricciones x número de variables de decisión] y los vectores [número de restricciones].

Para clarificarlo, se muestra a continuación un ejemplo.

$$\begin{array}{ll} 3x_1 - 4x_2 + 8x_4 = 15 & x_1 \leq 85 \\ 6x_2 + x_4 = 9 & -9x_4 + x_3 \geq 27 \\ 7x_1 + x_3 = 37 & 5x_2 - x_4 \leq 49 \\ & x_2 \geq 3 \end{array}$$

Con estas restricciones creamos las matrices Aeq y A con los coeficientes que multiplican a las variables de decisión (x_1, x_2, x_3, x_4)

$$Aeq = \begin{bmatrix} 3 & -4 & 0 & 8 \\ 0 & 6 & 0 & 1 \\ 7 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 9 \\ 0 & 5 & 0 & -1 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Y, por último, se obtienen los vectores beq y b.

$$beq = \begin{bmatrix} 15 \\ 9 \\ 37 \end{bmatrix} \quad b = \begin{bmatrix} 85 \\ -27 \\ 49 \\ -3 \end{bmatrix}$$

7.3. Resolución del problema

Una vez conseguidas las matrices, la función objetivo y las posiciones del vector de variables de decisión que deben ser enteras, se resuelve el problema con el comando `intlinprog`.

Los argumentos de entrada del comando son:

- Vector coeficiente (f). En este vector están representados los coeficientes de la función objetivo.
- Vector de restricciones de enteros (intcon). Está especificado como un vector de enteros positivos. Dentro de este vector se indica que posiciones del vector de las variables de decisión toman valores enteros.
Por ejemplo, intcon = [3;5;9] significa que x(3), x(5) y x(9) deben tomar valores enteros.
- Matriz de restricción de desigualdad lineal (A).
- Matriz de restricción de igualdad lineal (Aeq).
- Vector de restricción de desigualdad lineal (b).
- Vector de restricción de igualdad lineal (beq).
- Límites inferiores (lb). Es un vector que recoge los límites inferiores que limitan la solución de las diferentes variables de decisión.
- Límites superiores (ub). Vector de las mismas características que lb, pero limitando las soluciones hasta un máximo.
ub = [6;Inf;58] significa que x(1) y x(3) deben ser mayor o igual que 6 y 58, respectivamente y que x(2) no tiene limitación superior.

Las salidas del comando intlinprog:

- La solución al problema (x). Es un vector con todos los valores que deben tomar las variables de decisión para minimizar la función objetivo de manera que se cumplan todas las restricciones a las que está sujeto el problema. Si un problema es inviable o ilimitado, el vector de la solución es devuelto vacío.
- Valor objetivo (fval). Escalar que representa el valor de la función objetivo en su valor óptimo. Al igual que en la solución, cuando el problema es inviable o ilimitado, este valor objetivo es [].
- Algoritmo que detiene la condición (exitflag). Devuelve un número entero que indica la razón por la cual el algoritmo de resolución se detuvo. Este argumento de salida puede tomar los siguientes valores:

2	intlinprog se detuvo prematuramente. Punto factible entero encontrado.
1	intlinprog convergió a la solución x.
0	intlinprog se detuvo prematuramente. No se encontró ningún punto factible entero.
-1	intlinprog detenido por una función de salida o función de trazado.
-2	No se encontró ningún punto factible.
-3	El problema de la raíz LP es ilimitado.

- Resumen del proceso de solución. Devuelve una estructura que contiene información sobre el proceso de optimización. Esta información se compone de los números de punto factibles enteros encontrados, infracción de la restricción que es positiva para las restricciones infringidas, etc.

