



GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

Nexus agua-energía: Representación de una desaladora en el despacho económico.

Autor: Eduardo Benavente Martínez

Director: Lukas Sigríst

Madrid

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

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

El autor D. Eduardo Benavente Martínez

DECLARA ser el titular de los derechos de propiedad intelectual de la obra:
Nexus agua-energía: Representación de una desaladora en el despacho económico,

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) Reproducir la 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 28 de septiembre de 2020

ACEPTA

Fdo..... Eduardo Benavente Martínez



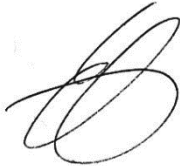
Motivos para solicitar el acceso restringido, cerrado o embargado del trabajo en el Repositorio Institucional:

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título
Nexus agua-energía: Representación de una desaladora en el despacho económico.
en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el
curso académico 2019/2020 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.: Eduardo Benavente Martínez

Fecha: 28 / 09 / 20...



Autorizada la entrega del proyecto
EL DIRECTOR DEL PROYECTO

Fdo.: Lukas Sigrist

Fecha: 29 / 09 / 2020



RESUMEN DE PROYECTO

El nexo agua-energía se define como la relación directa que existe entre estos dos recursos. Por regla general, estos dos recursos se analizan y se estudian desde un punto de vista independiente, pero está demostrado que en muchas aplicaciones la integración y optimización de ambos sistemas toman un papel importante para el desarrollo sostenible del medioambiente y el aspecto económico a la hora de reducir costes gracias a la profunda comprensión de las interacciones de estos recursos.

Por este motivo este proyecto utiliza las plantas desaladoras para llevar a cabo un estudio de este nexo entre el agua y la energía. Estas plantas son idóneas para llevar a cabo este estudio, ya que toman un papel muy relevante en sistemas donde los recursos hídricos no son suficientes para satisfacer la demanda de agua de una región concreta.

En primer lugar, para llevar a cabo el estudio de este nexo, se va a empezar revisando el estado del arte para estudiar como funcionan y como han evolucionado las plantas desaladoras a lo largo de los años incorporando nuevas tecnologías para lograr una eficiencia mejor.

Tras esto, se propone un modelo de solución de problemas de unit commitment en Matlab. Se trata de un despacho económico en el que se incluye la demanda eléctrica, la demanda de agua, las características de los grupos generadores, y los parámetros de la planta desaladora, con el objetivo de optimizar el consumo energético cubriendo la demanda de agua dada y de aportar flexibilidad al sistema.

El proyecto parte de un modelo dado que incluye un modelo de aproximación lineal, es decir, trata el consumo de la bomba de alta presión como si de una recta se tratase. Este proyecto propone mejorar el modelo dado implementando un modelo por linealización por tramos para representar de manera más clara la curva real de la bomba.

Una vez construido el modelo se realizarán diferentes simulaciones con el objetivo de comprobar que beneficios aporta al modelo esta nueva linealización por tramos.

Se han realizado tres modelos, uno linealizado con tres tramos, uno lineal, y por último uno linealizado con tres tramos con un mayor gradiente entre ellos. Por regla general estas son las conclusiones que se han obtenido en todas las simulaciones:

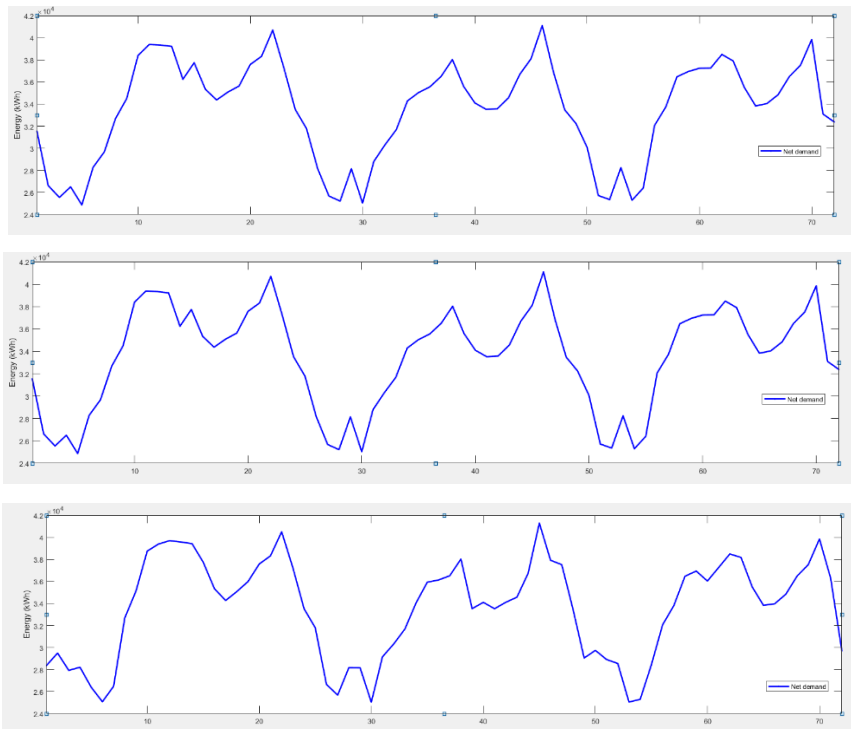
Con el objetivo de reducir los costes finales de operación, la resolución del problema de unit commitment determina que la forma más óptima de trabajar es hacerlo lo más cerca posible de su máxima potencia o desacoplar la planta, es decir, es mejor trabajar a tope y luego no trabajar para así evitar recaer en los costes fijos que supondría trabajar a media carga.

Las horas donde el gasto económico de operación es más barato se dan en las últimas horas del día, ya que el depósito de agua se vacía para aprovechar de una manera óptima el gasto energético que se ha invertido anteriormente en llenarlo, con el objetivo de abaratar costes.

El depósito se llena en las horas donde la demanda eléctrica es menor, de manera que al llegar a las horas donde existe una demanda eléctrica elevada no haga falta generar caudal de permeado para cubrir la demanda de agua. Una vez que el depósito está próximo a alcanzar sus valores mínimos se empieza a llenar, aunque la demanda eléctrica siga en niveles elevados ya que el sistema debe de cubrir la demanda y no le queda otra que incrementar la producción de agua durante el resto de las horas.

El objetivo de este proyecto, no es otro que el de estudiar y analizar las ventajas y los inconvenientes que le supone al despacho económico el hecho de incluir un modelo linealizado por tramos frente a uno lineal. El mejor indicador para determinar el nivel de mejora es el estudio de la demanda eléctrica neta del sistema. Estas gráficas aparecen representadas a continuación.

Estas figuras corresponden al modelo linealizado por tres tramos, al modelo lineal y al modelo linealizado por tres tramos más exagerados respectivamente.



Como se puede apreciar, no hay diferencias significativas entre los tres modelos, es decir, la gestión de consumo eléctrico que plantea el sistema es muy similar entre los tres modelos. Por este motivo las variaciones en el coste de operación final de cada una de las simulaciones van a ser muy pequeñas y podemos afirmar que no merece la pena la inclusión de este modelo debido a la similitud entre los resultados finales y la carga computacional extra que se le exige al despacho económico.

Estas variaciones aparecen representadas en la siguiente tabla.

Simulaciones	Coste final (€)	Mejora (%)
Linealización por 3 tramos	229.485,07 €	0,34
Modelo lineal	230.263,17 €	0%
Linealización por 3 tramos bruscos	227.508,24 €	1,20
3 bombas en paralelo	232.984,72 €	1,18
Doble capacidad de depósito	227.314,35 €	1,3

Es importante destacar que se han realizado dos casos extra en los que se ha estudiado el comportamiento del sistema ante la inclusión de una tercera bomba en paralelo, y otro en el que se ha aumentado la capacidad del depósito al doble.

En el primer caso de estudio extra, el resultado es que el rendimiento del sistema es peor, aumentando tanto el coste de operación, como los gastos fijos y variables que suponen mantener una tercera bomba de alta presión.

Finalmente, en el último caso de estudio se determina que aunque haya habido una ligera mejora en los costes de operación finales, no es suficiente para que sea rentable instalar otro depósito en la planta desaladora.

ABSTRACT

The nexus between water-energy is defined as the direct relation that exists among these two resources. Usually these two resources are analyzed and studied from an independent point of view, nevertheless it has been proved that in many applications the integration and optimization of both systems takes a very major place on the sustainable development of the environment, and also in the economic aspect when reducing costs, thanks to the deep understanding of the interaction of these resources.

The aim of this project is to use the desalination plants in order to accomplish a study of the nexus between water and energy. These desalination plants are considered impeccable to carry out this survey, since it takes a crucial part in this approach where the hydraulic resources are not enough in order to meet the needs of water in a certain region.

In the first place, with the purpose of performing the study of this nexus, revising the state of the art so to study how they work and how they had improved throughout the years, including new technologies to achieve better efficiency will go first.

Then a new solution of the problems about the unit commitment in Matlab should be proposed. It is an economic dispatch which includes the electric demand, the water demand, the characteristics of the generating units, and the parameters of the desalination plant, with the purpose of optimize the energetic consumption covering the demand of water given and providing flexibility to the system.

The project emanates from a reference given that includes a type of lineal approximation, in other words, it deals with the consumption of the high-pressure pump, as if it we were talking about a straight line. This assignment is proposing on

how to improve the sample implementing a model by linearization by segments in order to represent in a clearer way the real bending of the pump.

Once it is constructed, the model will be made in different simulations with the target of testing which benefits are provided to the new linearization by segments.

Three prototypes have been made, one of them is linearization with three portions, one lineal and the last one linearization with again three portions with a bigger slope between them. Generally, these are the conclusions that have been made in all of the simulations:

With the aim of reducing the final expenses of operation, the resolution of the problem of unit commitment establish that the best way of working is doing it the nearest possible from its maximum power, in other words, is better to work hard and then do not work, this will avoid us from recurring to the fixed costs that will make us to work half load.

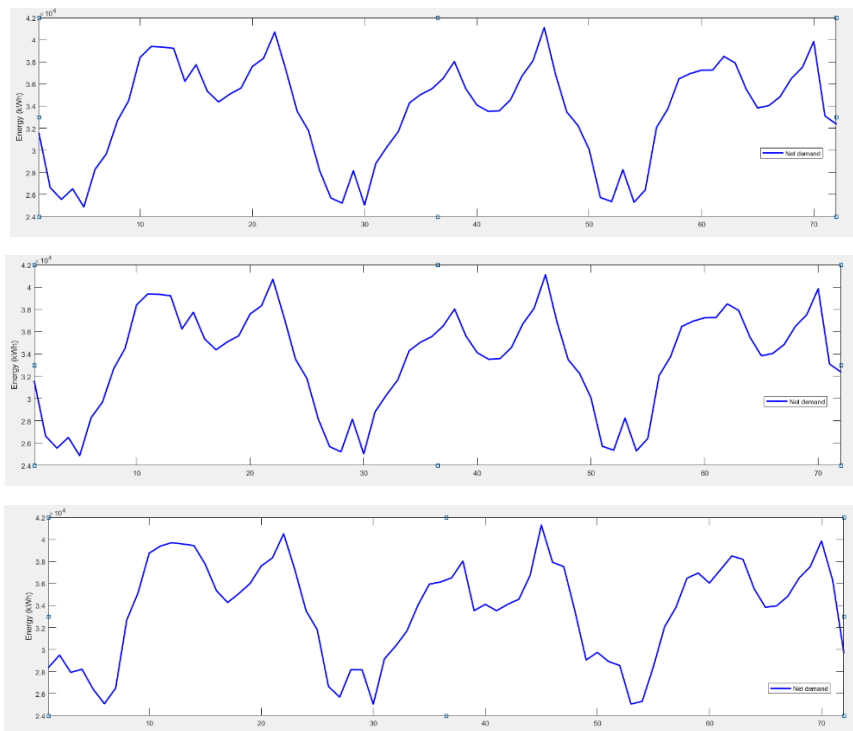
The hours where the economic operation is cheaper are produced in the last hours of the day, since the water deposits empties to take advantage the energetic output that had been invested lately in filling it, with the purpose of reducing expenses.

The deposits fill within the hours where the electric demand is less, so when the hours of more electric demand arrives, it is not necessary to generate permeable flow in order to cover the water demands. Once the deposit is near to reach their minimum values it starts to fill, although the electric demand stills in high levels since the system should be covering the demand and it has no other choice other than incrementing the production of water during the next hours.

The aim of this project, is no other than study and analyze the advantages and the disadvantages that involves the economic dispatch the fact of including a prototype

linearization by segments in front of a lineal one. The best flag to determinate the level of the improvement is the study of the electric demand net of the system. These graphics are provided below.

These diagrams show the model linearization by three segments, the lineal model and the linearization model of three segments exaggerated respectively.



As you can see, there is no big differences between the three models, in other words, the management of the electric consumption system that has been planned is very similar between the three models. Because of this the variations in the final operation cost of each one of them will be very small and we can say that it is not worth the inconclusion of this prototype due to the similarity between the final results and the computational load that the economic dispatch demands.

These variations appear represented in the following chart.

Simulaciones	Coste final (€)	Mejora (%)
Linealización por 3 tramos	229.485,07 €	0,34
Modelo lineal	230.263,17 €	0%
Linealización por 3 tramos bruscos	227.508,24 €	1,20
3 bombas en paralelo	232.984,72 €	1,18
Doble capacidad de depósito	227.314,35 €	1,3

It is crucial to highlight that it has been made two extra cases in which it has been studied the behavior of the system in the presence of the inconclusion of a third parallel pump, and another that has increased the capacity of the deposit to the double.

In the first case of the extra study, the result is the efficiency of the system is worse, increasing the operation cost and the fixed and variable costs entailing to keep a third high-pressure pump.

Finally, the last case of the study determinates that although it has been a minor improvement in the costs of the final operation, it is not enough to make economical installing another deposit in the desalination plant.

Índice

1. Introducción	22
1.1 estado del arte	24
1.2 Motivación y objetivos	25
2. Proceso de desalación.....	28
2.1 ¿Qué es la ósmosis?.....	28
2.1.1 Ósmosis inversa.....	29
2.1.2 Determinación analítica de la presión osmótica.....	31
2.2 Descripción del proceso de desalación	32
2.2.1 Captación de agua salada	35
2.2.2 Pretratamiento	36
2.2.3 Etapa de la ósmosis inversa	42
2.2.3.1 Tecnologías de Membrana.	43
Configuración Plato-Marco	43
Configuración Tubular.....	45
Configuración Fibra hueca	46
Arrollamiento en espiral.....	47
2.2.3.2 Modelos de planta (Diseño)	49
Diseño de una etapa	52
Diseño de dos etapas.....	52
Diseño de tres etapas.....	53
Diseño de pasos.....	54
2.2.4 Postratamiento.....	55
Descarbonatación o Eliminación de CO ₂	56
Intercambio Iónico.	56
Remineralización del agua.	57
2.4 Sistemas de recuperación de energía.....	59

Turbina Francis (Bomba invertida).....	61
Turbina Pelton.....	62
Turbobomba y Turbocharger.....	63
Cámaras de intercambio de presión.....	65
<i>Cámaras de intercambio de presión de desplazamiento:</i>	65
<i>Cámaras de intercambio de presión de rotación:</i>	66
2.5 Aspectos energéticos de una planta desaladora	67
2.5.1 Ejemplo de modelado de consumo energético.....	75
2.5.2 Representación a tramos de la bomba para caso práctico.....	76
3. Modelo de la operación de un sistema con nexa agua-energía.....	80
3.1 Despacho Económico.....	80
3.2 Descripción del modelo matemático.....	81
3.2.1 <i>Función objetivo</i>	81
3.2.2 <i>Restricciones</i>	82
3.2.2.1 <i>Balance de la demanda eléctrica</i>	83
3.2.2.2 <i>Balance de la demanda de agua</i>	84
3.2.2.3 <i>Balance neto cero de la demanda gestionable</i>	84
3.2.2.4 <i>Límites de potencia activa</i>	85
3.2.2.5 <i>Límites de rampa de los grupos generadores</i>	85
3.2.2.6 <i>Decisiones de arranque y parada</i>	85
3.2.2.7 <i>Restricciones de reserva</i>	86
3.2.2.8 <i>Restricciones de caudal permeado</i>	88
3.2.2.9 <i>Restricciones de capacidad del embalse</i>	88
3.3 Resolución Unit Commitment.....	88
3.3.1 <i>Resolución MILP en Matlab</i>	89
4. Simulaciones.....	92
4.1 Modelo 3 Tramos.....	92
Presentación.....	92
Resultados.....	97
4.2 Modelo lineal.....	103
Presentación.....	103
Resultados.....	105

4.3 Modelo 3 Tramos bruscos	111
Presentación	111
Resultados	113
4.4 Casos extra.....	117
Tres Bombas en Paralelo	117
Aumento de la capacidad del depósito.....	120
4.5 Comparación de resultados.....	122
5. Conclusiones.....	124
6. Bibliografía.....	128
7. Anexos	132
7.1 Anexo ODS	132
7.2 Anexo Nomenclatura.....	136
Parámetros	136
Variables continuas	137
Variables binarias	137

Índice de Figuras

Figura 1: Evolución en el tiempo de la desalación en el mundo.	23
Figura 2: Modelo para co-despacho económico de suministro de energía y agua	25
Figura 3: Representación de proceso osmótico natural.	29
Figura 4: Procesos de ósmosis natural y ósmosis inversa	30
Figura 5: Proceso planta desaladora.	32
Figura 6: Relación agua-energía proceso industrial.	34
Figura 7: Partes de toma de captación de toma abierta.	36
Figura 8: Reja de desbaste automática.	38
Figura 9: Proceso coagulación-floculación.	39
Figura 10: Efectos de la incrustación en OI.	41
Figura 11: Esquema de configuración plato-marco.....	44
Figura 12: Esquema de una membrana en disposición tubular	45
Figura 13: Esquema de una membrana en disposición Fibra hueca.	46
Figura 14: Esquema de membrana en fibra hueca 2.....	47
Figura 15: Esquema de membrana en arrollamiento de espiral.....	48
Figura 16: Esquema básico de un sistema de membranas.	50
Figura 17: Configuración en una etapa.	52
Figura 18: Configuración en dos etapas	53
Figura 19: Configuración en tres etapas.	54
Figura 20: Configuración simplificada dos pasos..	54
Figura 21: Proceso de remineralización de agua osmotizada.....	58
Figura 22: Consumo energético específico y coste de desalación en tres décadas.	60
Figura 23: Diagrama de Sankey de una planta con turbina Francis	62
Figura 24: Representación de la turbina Pelton.....	63
Figura 25: Sistema OI con turbocharger.....	64
Figura 26: Esquema de cámara de intercambio de presión	65
Figura 27: Cámara de intercambio de presión por rotación..	66

Figura 28: Porcentajes de consumos energéticos de una planta desaladora y costes.	67
Figura 29: Esquema de núcleo de agua salada mediante ósmosis inversa.....	69
Figura 30: Consumo específico de energía de membrana.	72
Figura 31: Consumo específico total de energía de una desaladora en función del factor de conversión.....	73
Figura 32: Variación de consumo para diferentes presiones.....	74
Figura 33: Variación del consumo específico para diferentes presiones.....	74
Figura 34: Bomba SULZER de alta presión.....	75
Figura 35: Gráfica Potencia consumida // Caudal permeado final.....	76
Figura 36: Aproximación lineal curva bomba SULZER	78
Figura 37: MILP en Matlab	89
Figura 38: Esquema de resolución del problema UC.	90
Figura 39: Uso del agua desalada Canarias 2006.....	94
Figura 40: Demanda diaria de agua.....	95
Figura 41: Demanda eléctrica de La Palma.....	95
Figura 42: fig 42.a: Demanda eléctrica y demanda eléctrica neta // fig 42.b: Generación por grupos generadores.	97
Figura 43: fig43.a: Grupos generadores funcionando cada hora h // fig.b: Acople al sistema de grupo generador. //fig.c: Desacople del sistema de grupo generador.....	99
Figura 44: fig44.a: Demanda y caudal permeado de agua en cada hora h. // fig44.b Consumo eléctrico cada hora h. // fig44.c: Nivel del depósito en cada hora h.....	100
Figura 45: fig 45.a: Demanda eléctrica y demanda eléctrica neta // fig 42.b: Generación por grupos generadores.....	105
Figura 46: fig46.a: Grupos generadores funcionando cada hora h // fig.b: Acople al sistema de grupo generador. //fig.c: Desacople del sistema de grupo generador.	106
Figura 47: fig47.a: Demanda y caudal permeado de agua en cada hora h. // fig47.b Consumo eléctrico cada hora h. // fig44.c: Nivel del depósito en cada hora h.....	108
Figura 48: Comparación linealizaciones 3 tramos vs lineal	110
Figura 49: Linealización por 3 tramos // Caso de estudio 3.....	111
Figura 50: fig 50.a: Demanda eléctrica y demanda eléctrica neta // fig 42.b: Generación por grupos generadores.....	113
Figura 51: Demanda eléctrica neta del tercer caso de estudio.....	114

Figura 52: Demanda eléctrica neta del modelo lineal..	114
Figura 53: fig53.a: Demanda y caudal permeado de agua en cada hora h. // fig53.b Consumo eléctrico cada hora h. // fig53.c: Nivel del depósito en cada hora h.	115
Figura 54: Curva de la bomba para cada caso de estudio.....	116
Figura 55: Caudal permeado por la planta con tres bombas en paralelo.....	118
Figura 56:Nivel del depósito para cada hora con tres bombas en paralelo.	118
Figura 57: Demanda eléctrica neta del caso de estudio con tres bombas en paralelo. .	119
Figura 58: Demanda eléctrica neta del caso de estudio con dos bombas en paralelo ..	119
Figura 59: Nivel del depósito con el doble de capacidad	120
Figura 60: Nivel del depósito del caso de estudio 1.....	120
Figura 61: Demanda eléctrica neta del sistema con doble capacidad de depósito.	121

Índice de Tablas

Tabla 1: Estándares de calidad pretratamiento del agua de alimentación	37
Tabla 2: Función de tramos simulada.....	93
Tabla 3: Características y costes referidos a los grupos generadores.....	93
Tabla 4: Demanda eléctrica y demanda de agua en la isla de La Palma en 72 horas.....	96
Tabla 5: Datos de la planta desaladora en la simulación 1.....	96
Tabla 6: Modelo de sistema lineal.....	104
Tabla 7: Parámetros desaladora simulación 2.	104
Tabla 8: Puntos de operación caso 3	112
Tabla 9: Datos desaladora simulación 3.....	112
Tabla 10: Comparación de resultados respecto de la lineal.....	122

1. Introducción

El nexo agua-energía se define como la relación directa que existe entre estos dos recursos. La producción y el aprovechamiento de uno de ellos está relacionado estrechamente con el otro de manera que para producir electricidad se necesita agua para procesos como accionar turbinas hidráulicas o como medio de refrigeración [1]. En el caso contrario podemos decir que para obtener agua apta para el aprovechamiento humano necesitamos energía que transporte el agua, primero hasta las plantas de tratamiento donde se le aplicará el proceso necesario ayudado de electricidad y luego hasta nuestras ciudades y campos.

Normalmente, estos dos recursos se analizan y se estudian desde un punto de vista independiente, pero está demostrado que en muchas aplicaciones la integración y optimización de ambos sistemas toman un papel importante para el desarrollo sostenible del medioambiente y el aspecto económico a la hora de reducir costes gracias a la profunda comprensión de las interacciones de estos recursos.

La superficie de la Tierra está cubierta por un 71% de agua. De esta cantidad total el 96,5% es agua salada, mientras que el otro 3,5% restante corresponde a agua dulce superficial y de esta última solo está disponible un 30% para uso humano ya que el resto está en forma de hielo [2]. En zonas donde la demanda de agua es superior a los recursos hídricos toman una gran importancia las plantas de desalación que además son un ejemplo perfecto para el estudio del nexo agua-energía.

Actualmente, según un estudio realizado por AQUAE Fundación, en el mundo se consumen más de 200 millones de kilovatios hora cada día en el proceso de desalinización del agua. Este consumo es repartido entre las más de 15000 plantas desaladoras que hay repartidas por la geografía mundial abasteciendo de agua a la población.

Cabe destacar que los principales productores de agua dulce a partir de agua salada debido a sus escasos recursos hídricos son los países conocidos como GCC (Gulf Cooperation Countries), situados en Medio Oriente y Arabia Saudí, estos territorios utilizan para el consumo humano y el regadío agrícola un 80% y un 98% respectivamente de agua desalada. Además, se sabe que producen aproximadamente un 65% del agua desalada total en el mundo y que pueden llegar a consumir un 12% de la energía total del país para la obtención de agua dulce [3].

Una de las ventajas más destacables de la desalación del agua es la existencia de una materia prima prácticamente ilimitada. S principal inconveniente es el alto coste que tiene producir el agua dulce, pero con el paso de los años y el avance de la tecnología se está reduciendo considerablemente alcanzando así precios competitivos [3].

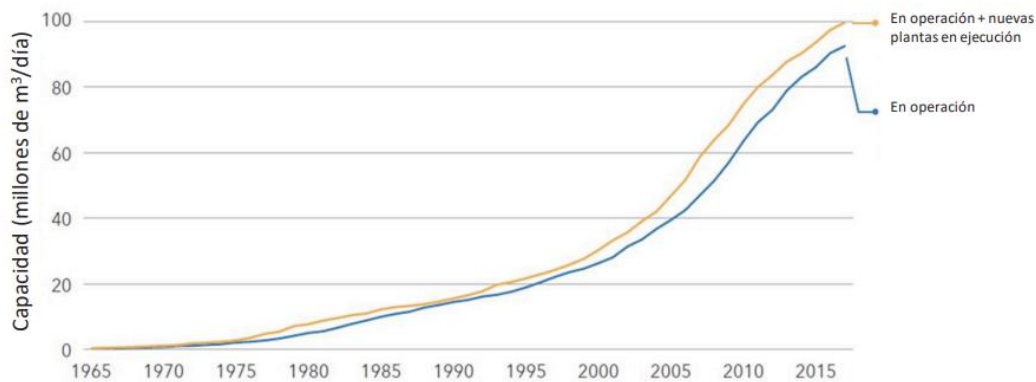


Figura 1: Evolución en el tiempo de la desalación en el mundo. Fuente: [3]

En la Figura 1 se representa la evolución que ha tenido a lo largo de los años esta tecnología en función de los $m^3/día$ de agua desalada se producen globalmente.

Generalmente, cuando pensamos en un sistema eléctrico rápidamente lo identificamos con un sistema que tiene que ajustarse para satisfacer una demanda dada en cada instante, de manera que cuanto más demanda haya en un momento concreto, más generación eléctrica tiene que haber.

No obstante, esto no es siempre así, por ejemplo, en las plantas desaladoras que funcionen bajo el principio de economía circular, es decir, que cuenten con alimentación por energías renovables, se puede ajustar la producción de energía en función de la reserva existente de agua y la disponibilidad de los recursos energéticos aprovechando las horas valle para producir y almacenar permeado.

1.1 ESTADO DEL ARTE

A lo largo de la última década ha habido múltiples avances en el modelado y la comprensión del nexo entre agua y energía centrándose en aspectos políticos de diversas índoles, tales como la regulación de la demanda de agua para consumo humano y la prevención contra el cambio climático debido a la implicación de la producción de energía, promoviendo el imperativo de reducir las emisiones de gases contaminantes a la atmósfera.

No obstante, aunque el agua sea un bien a nivel local o regional, para el análisis de este nexo se trata como si de un recurso global se tratara para relacionarla con la energía y determinar el impacto social y ambiental producidas por estas interrelaciones [4]. Además es importante destacar que estos dos recursos también tienen una fuerte relación con la alimentación [5], ya que es necesario el agua para regar nuestros cultivos o nutrir a los animales y a su vez la energía es necesaria para poder mantenerlos y para garantizar su aprovisionamiento. Esta relación forma un triángulo fundamental [5] en el estudio del desarrollo sostenible del planeta.

Por otro lado, hay estudios que tratan este nexo desde un punto de vista económico. El estudio [6] trata de un despacho económico que minimiza los costes de producción de la energía necesaria consiguiendo una planta más eficiente. Una de las ventajas más importantes de este despacho económico es que el modelo sirve para cualquier planta de generación sin importar sus características físicas y sus restricciones.

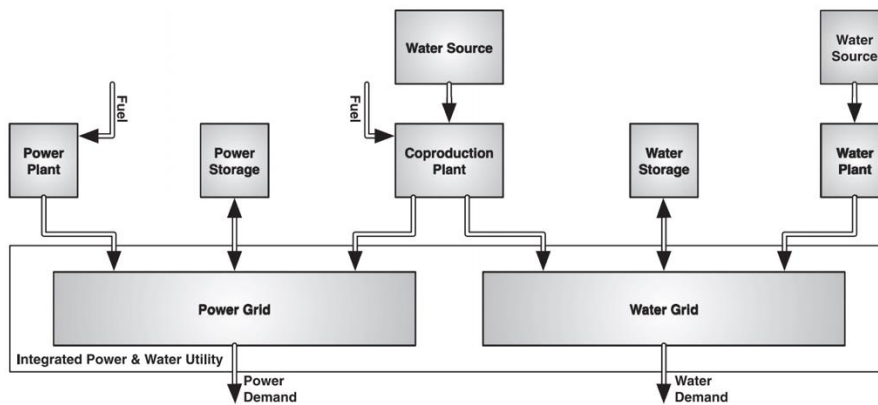


Fig. 1. Model for the co-dispatch of power and water supply.

Figura 2: Modelo para co-despacho económico de suministro de energía y agua

Otro ejemplo del estudio de la relación entre el agua y la energía es el estudio del despacho económico centrándose en el impacto de la implantación de depósitos de almacenamiento en plantas de coproducción [7].

1.2 MOTIVACIÓN Y OBJETIVOS

Queda demostrado que el conocimiento y la interpretación de la relación entre el agua y la energía, resulta ser una herramienta muy potente a la hora de optimizar el aprovechamiento de estos dos recursos. Nos vamos a centrar en satisfacer la demanda de agua en cada instante utilizando la energía de la forma más óptima posible.

En países o regiones con agua superficial limitada y con altos picos de demanda de agua están en auge las plantas desaladoras. Estas regiones suelen tratarse de sistemas insulares o de zonas áridas como los países del golfo Pérsico. Estas máquinas desaladoras tienen un elevado consumo eléctrico por litro de agua tratada, lo que hace que sean idóneas para aplicar el concepto nexus agua-energía para optimizar su rendimiento y proporcionar flexibilidad a el sistema eléctrico.

El objetivo del proyecto es mejorar un modelo existente de una desaladora en el despacho económico de un sistema insular. La desaladora junto al tanque de agua podría proporcionar flexibilidad al sistema insular. El modelo existente es un modelo que aproxima la relación entre potencia eléctrica consumida por la desaladora y el caudal producido por una función lineal. Se propone modificar esta aproximación por una aproximación lineal por tramos. Las tareas del proyecto son las siguientes:

1. Revisión del estado de arte en cuanto a la representación de desaladoras y el nexus agua-energía en despachos económicos
2. Desarrollo del modelo usando la aproximación lineal por tramos
3. Implantación del modelo en un despacho económico en Matlab
4. Comparación de los modelos

2. Proceso de desalación

En una planta de desalación el proceso más importante es el que elimina las sales del agua. Por este motivo la elección del tipo de proceso es vital. Estos son algunos ejemplos de métodos que existen para conseguir la desalación del agua:

- Desalación flash multietapa (MSF)
- Destilación multiefecto con tubos horizontales (MED)
- Intercambio Iónico
- Ósmosis inversa
- Termocompresión de vapor
- Electrodialisis

De todas estas las únicas técnicas que consiguen obtener un caudal de agua lo suficientemente elevado son la (MSF) y la ósmosis inversa. No obstante, actualmente en el mundo predomina la ósmosis inversa gracias a su mejor rendimiento y a los avances tecnológicos que han potenciado el desarrollo de las membranas. Por este motivo este trabajo se va a centrar en este tipo de plantas.

2.1 ¿Qué es la ósmosis?

La ósmosis es el proceso por el cual un solvente pasa a través de una membrana semipermeable, de una solución diluida a una concentrada, hasta igualar la diferencia de concentraciones a ambos lados de la membrana. Es importante destacar que este fenómeno se produce de forma espontánea y sin gasto energético.

A la presión que ejerce el solvente sobre la cara de la membrana donde la concentración es menor hacia el compartimento con mayor concentración se le conoce como presión osmótica[8] [9]. También se puede definir la presión osmótica como la presión

hidrostática generada por la diferencia de niveles entre las disoluciones de ambos compartimentos [10].

En la Figura 3 se representa visualmente el proceso de ósmosis natural y la disposición en la que se encuentra la membrana semipermeable.

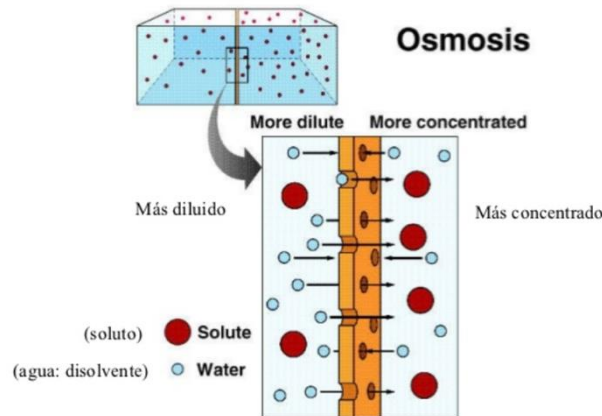


Figura 3: Representación de proceso osmótico natural. Fuente: M. en I. Alan Paz Martínez

2.1.1 ÓSMOSIS INVERSA

A diferencia del proceso osmótico natural, la ósmosis inversa sí necesita de aporte de energía. Este proceso consiste en obligar a pasar el solvente de la solución de mayor concentración al lado de la membrana con menor concentración. Para ello se aumenta la presión en la zona donde la solución está más concentrada por encima de la presión osmótica (entre 24 y 28 bar) para que el flujo resultante cambie al sentido contrario al que tendría en la ósmosis natural [9].

El resultado de aplicar la ósmosis inversa resulta en una solución muy concentrada y otra muy diluida, dependiendo de la magnitud de la presión aplicada en lado de la membrana mencionado anteriormente.

En la Figura 4, se representan gráficamente ambos procesos osmóticos.

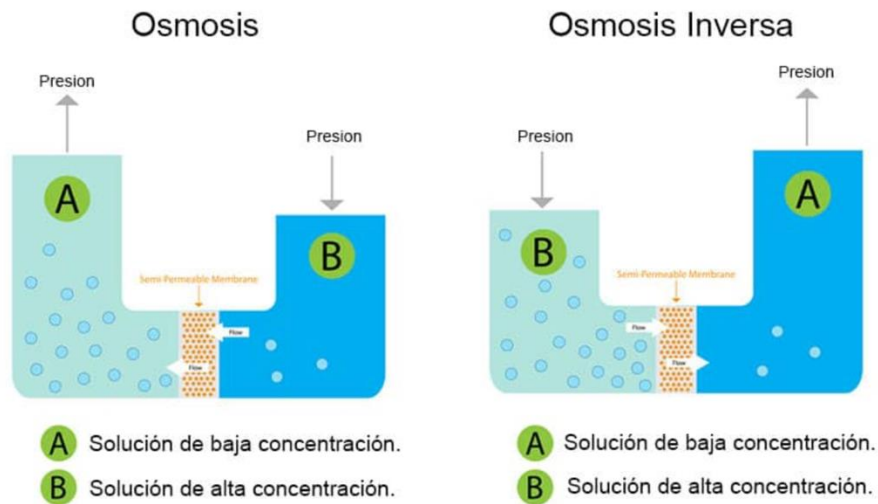


Figura 4: Procesos de ósmosis natural y ósmosis inversa. Fuente: osmosisinversa.top

Las aplicaciones en la industria de la ósmosis inversa son muy variadas. Algunos ejemplos de industrias donde se necesita agua osmotizada son los siguientes:

- Industria farmacéutica.
- Industria alimentaria.
- Industria cosmética.
- Industria electrónica.
- Tratamiento de agua salada.
- Tratamiento de aguas residuales.

La osmosis inversa es el primer paso para la obtención de “agua ultrapura”.

2.1.2 DETERMINACIÓN ANALÍTICA DE LA PRESIÓN OSMÓTICA

Aunque existen varios métodos para el cálculo de la presión osmótica, vamos a utilizar a ley de Van't Hoff que se basa en que la presión osmótica es el resultado de las colisiones de las moléculas de soluto contra la membrana semipermeable mientras que las partículas de disolvente no contribuyen de ninguna manera [11].

$$\pi = i \cdot M \cdot R \cdot T$$

Ec. 1

Nomenclatura:

π es la presión osmótica y su unidad de medida es en atmósferas [atm].

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

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

T es la temperatura medida en grados kelvin [°K].

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

2.2 Descripción del proceso de desalación

Para llevar a cabo el proceso de desalación, el agua tiene que pasar por diferentes etapas para que sea apta para el consumo humano. En este apartado se van a explicar estas etapas teniendo en cuenta el consumo energético de cada una de ellas para mantener el concepto clave del proyecto que no es otro que el nexo agua-energía.

Como hemos mencionado anteriormente, a pesar de que a lo largo de la historia se han desarrollado diferentes tipos de plantas desaladoras, vamos a centrarnos en las que funcionan bajo el principio de ósmosis inversa.

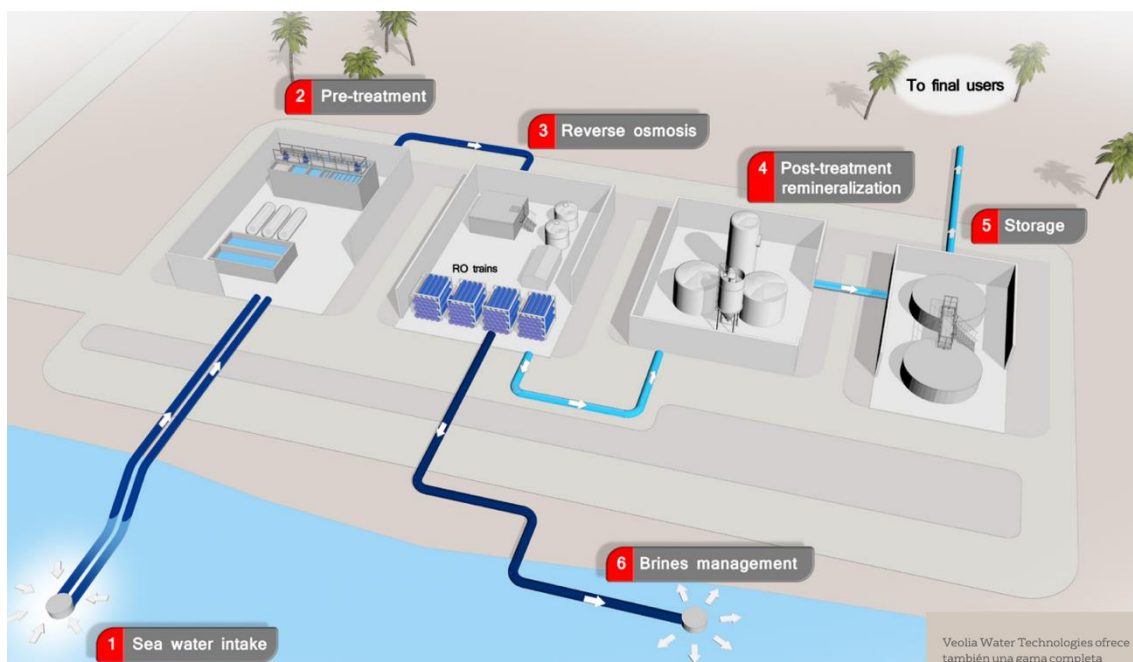


Figura 5: Proceso planta desaladora. Fuente: veoliawatertechnologies.es

En la Figura 5 se representa las diferentes etapas por las que pasa el agua durante el proceso. Como se puede apreciar el proceso consta de 6 etapas principales [12]:

1. Para empezar, se capta el agua marina y se transporta hasta la planta por medio de bombas hidráulicas.
2. Después el agua entra en la fase conocida como pretratamiento. En esta etapa se filtra el agua y se modifican sus propiedades químicas para favorecer el proceso de desalación.
3. A continuación, el agua pasa a las cámaras donde se produce la ósmosis inversa y se separa el agua limpia de la salmuera. Esta salmuera es devuelta al mar [13].
4. Una vez el agua ha sido desalada se le aplica un post-tratamiento para dotarla de las características necesarias para que sea apta para el consumo humano.
5. Normalmente, una vez se ha completado el proceso, el agua es almacenada en depósitos lista para ser enviada a los usuarios finales. Las plantas desaladoras no siempre cuentan con capacidad de almacenaje pero bajo el punto de vista de optimización del nexus agua-energía el contar con estos depósitos aportan mucha flexibilidad al sistema a la hora de satisfacer la demanda.
6. Como hemos mencionado en el punto 3, la salmuera se separa y es devuelta al mar.

En la Figura 6, aparecen representados los elementos que consumen energía existentes en cada una de las etapas por las que pasa el agua de captación hasta convertirse en permeado y salmuera.

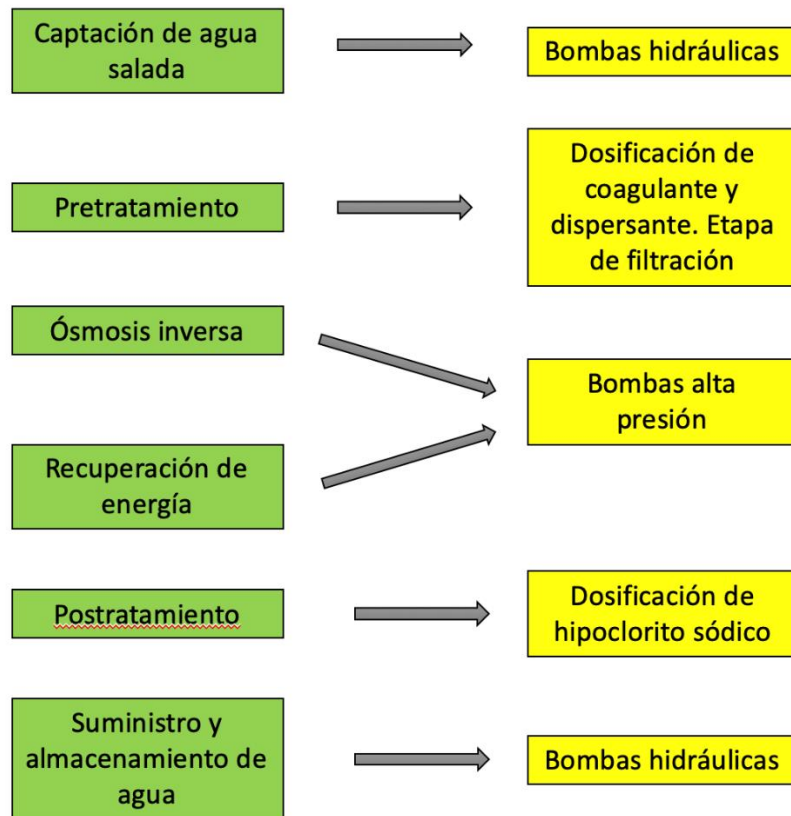


Figura 6: Relación agua-energía proceso industrial. Elaboración: Eduardo Benavente. Idea: [30]

Es importante mencionar que este esquema parte de un modelo de planta desaladora totalmente genérico, ya que cada una de las plantas existentes tienen sus propias particularidades.

No obstante, en todas y cada una de ellas intervienen de una u otra manera los elementos señalados en el esquema.

2.2.1 CAPTACIÓN DE AGUA SALADA

Al igual que las tecnologías de recuperación de energía y de ósmosis inversa, las técnicas de captación han evolucionado a lo largo de los años para mejorar su rendimiento y ajustarse a la normativa ambiental vigente. Es importante destacar que las tomas de captación de agua salada son puntos que se caracterizan por tener una elevada carga ambiental pues se desarrollan generalmente próximos a ecosistemas marinos [14].

Actualmente los principales sistemas de captación de agua salada son:

- Tomas abiertas.
- Pozos verticales.
- Drenes horizontales.
- Tomas mixtas.

Centrándonos en la calidad del agua captada, la toma abierta es la que genera más incertidumbres, ya que es más vulnerable a las variaciones externas que sufre el agua. Sin embargo, el agua proveniente de pozos y drenes es más homogénea.

No obstante, la toma abierta es la manera más segura de garantizar un caudal suficiente independientemente de las mareas. Según el estudio [14], la experiencia demuestra la dificultad de asegurar el caudal en pozos y drenes. Por este motivo para plantas de producción media/alta es más frecuente el uso de las tomas abiertas.

Finalmente, el agua es transportada hasta la planta desaladora mediante bombas hidráulicas. Estas bombas son las principales responsables del consumo de energía en esta fase.

En la Figura 7 se representan las diferentes partes de una fase de captación por toma abierta.

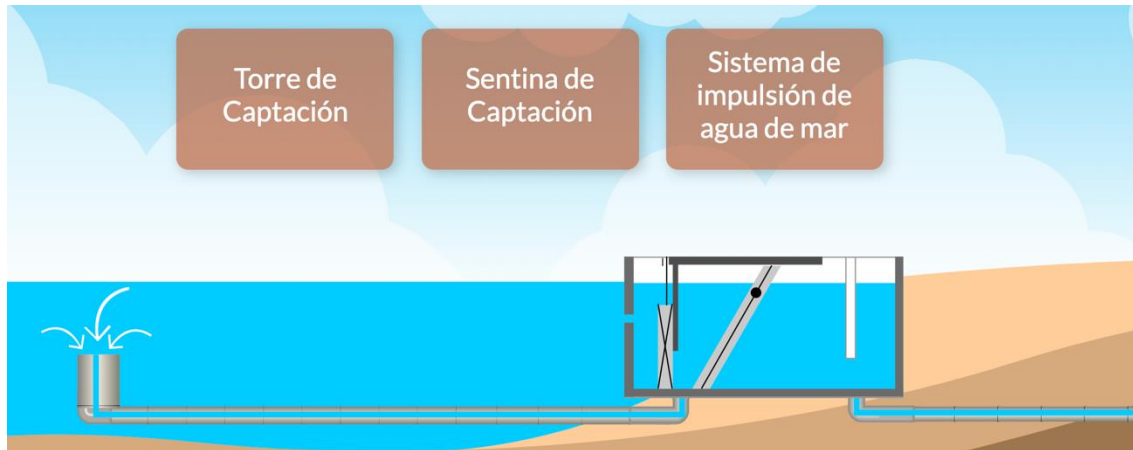


Figura 7: Partes de toma de captación de toma abierta. Fuente. Cap.cl

2.2.2 PRETRATAMIENTO

El pretratamiento es una fase fundamental en el proceso de desalación del agua, ya que además de aportar al agua de características físicas y químicas necesarias para su correcto tratamiento, juega un papel muy importante en la conservación de la planta industrial evitando averías y alargando su vida útil.

Para una planta que funciona bajo el principio de la ósmosis inversa (OI) en el pretratamiento del agua primordialmente se evitan las incrustaciones en las membranas y los óxidos metálicos que puedan dañarlas, así como el sulfuro de hidrogeno, los sólidos suspendidos en el agua de mar, el crecimiento biológico y bacterias, que les causan graves daños a las membranas osmóticas [15].

Es importante cumplir con unos estándares de calidad antes de avanzar a la siguiente fase. La Tabla 1 muestra los requerimientos de calidad para el agua destinada para la alimentación en una planta OI.

	Espiral CA	Espiral PA	EDR
Material Suspendido			
a) Turbidez, NTU	<1,0	<1,0	<5
b) SDI	<4,0	<4	<15
Contenido Iónico			
a) Hierro, mg/l (ferroso)	<2,0	<2	<0,1
b) Magnesio, mg/l	<0,5	<0,5	<0,1
c) Estroncio, en porcentaje de saturación	2000%	3000%	4000%
d) Bario, en porcentaje de saturación	5000%	5000%	7000%
e) Sílice, mg/l en concentración	<160	<160	<saturación a la entrada
Aditivos Químicos			
a) Cloro residual, ppm	<1,0	ND	ND
b) Inhibidor de incrustaciones, mg/l	12-18	12-18	CR
c) Acidificación, pH	5,5-6,0	4-10	CR
Temperatura, Saturación, solubilidad			
Máxima temperatura a la entrada °C	40	45	43
Máximo LSI con inhibidor de incrustaciones	Nota	+2,4 - +2,8	2,1
Solubilidad (CaSO ₄) con inhibidor de incrustaciones	150%	150%	650%
ND = No Detectable CR = Como se Requiera SDI = Grado de Bloqueo NTU = Unidades de turbiedad nefelométrica LSI = Índice de Saturación de Langelier Tipo de Membrana PA = Poliamida CA = Acetato de celulosa EDR = Electrodiálisis			

Tabla 1: Estándares de calidad pretratamiento del agua de alimentación

En el pretratamiento del agua se pueden distinguir por regla general las siguientes fases:

- **Desbaste y tamizado:**

Esta primera etapa se encarga de filtrar el agua para atrapar los sólidos de mayor tamaño. Estos sólidos pueden obstruir y dañar los equipos de la planta desaladora, es por eso por lo que es muy importante retirarlos.

Primero, el agua pasa por unas rejillas en las cuales se quedan atrapados los sólidos más grandes. Esta técnica se conoce como desbaste. Acto seguido, vuelve a pasar por otras rejillas con menor separación atrapando sólidos más pequeños (tamizado) [16].



Figura 8: Reja de desbaste automática. Fuente: blogdelagua.com

Las rejas de desbaste normalmente están compuestas por las siguientes etapas.

- Recipiente.
- Tapa de registro.
- Tubería de entrada y salida.
- Reja con separación a definir.

- **Coagulación y floculación:**

Las materias en suspensión pueden tener un tamaño adecuado para eliminarse por simple sedimentación, pero hay otras partículas que por sus características físicas necesitan de un proceso de coagulación-floculación para su eliminación. Estas partículas se conocen como partículas coloidales y tienen un tamaño de micras además de una carga eléctrica superficial que hace que se repelan unas con otras [15].

En la Figura 9, se representa el proceso de coagulación y floculación.



Figura 9: Proceso coagulación-floculación. Fuente: elaguapotable.com

El proceso de coagulación en una planta desaladora consiste en desestabilizar y agrupar estas partículas coloidales, como por ejemplo añadiendo un coagulante que neutralice la carga eléctrica de estos. Una vez están desestabilizadas, el agua se mezcla provocando colisiones entre estas partículas para que se agrupen formando microflóculos. Algunos de los coagulantes más empleados son el sulfato de alúmina, el sulfato ferroso y el cloruro férrico [17].

Después, el agua se somete a una agitación más lenta y poco a poco estos microflóculos se van juntando creando flóculos más grandes que ya pueden decantar por sedimentación.

- **Desinfección-oxidación:**

Como se ha comentado anteriormente, el principio de esta etapa es eliminar microorganismos y cargas biológicas perjudiciales para el ser humano y capaces de dañar las membranas osmóticas afectando a su rendimiento.

La desinfección se lleva a cabo mediante la dosificación de un oxidante-desinfectante químico como el hipoclorito de sodio (NaClO), o el dióxido de cloro (ClO_2). También se puede llevar a cabo mediante algún procedimiento físico como la radiación ultravioleta.

Es importante mencionar que como las membranas osmóticas son sensibles a los oxidantes, de haber utilizado un compuesto como el hipoclorito sódico que posee una gran capacidad oxidante será necesario añadir un agente reductor como el bisulfito sódico al agua para eliminar el exceso de oxidante y proteger las membranas [18].

- **Antiincrustante:**

La incrustación se refiere a la deposición y acumulación de partículas en una membrana que hace que se tapone. En este caso la afectada sería la membrana osmótica que generalmente se taponan por acumulación de sales como el sulfato de calcio, el sulfato de bario o el sulfato de estroncio. La formación de estos cristales favorece la acumulación de otras partículas nocivas para el sistema [19].

En la Figura 10 se representan los efectos que produce la incrustación en la tasa de permeado de la membrana osmótica.

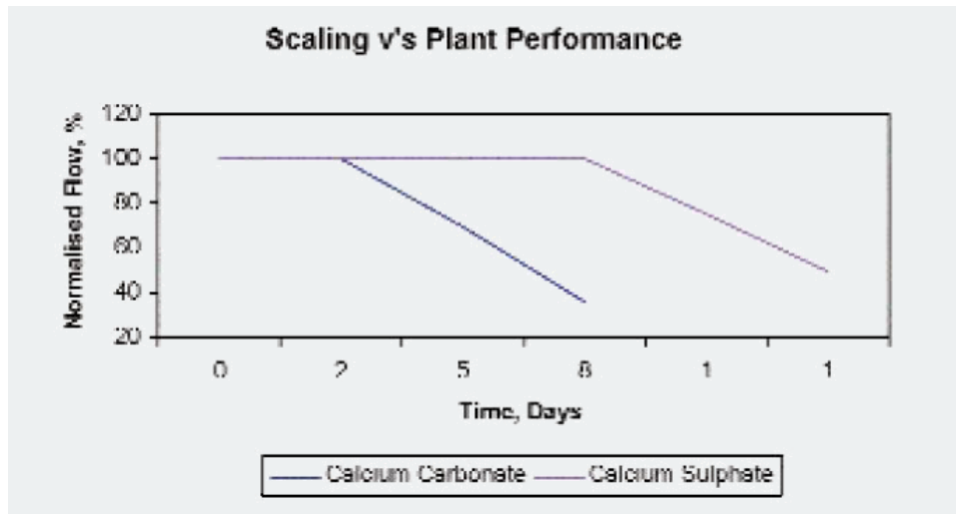


Figura 10: Efectos de la incrustación en OI. Fuente: lenntech.es

Como se puede apreciar en la imagen, después de un período de inducción, el caudal de agua circulando por la planta disminuye de manera brusca. La duración de este descenso viene dado principalmente por el tipo de incrustación y el grado de súper-saturación que tenga la sal [19].

Existen muchos tipos de incrustaciones posibles en las membranas ya que en el agua salada hay muchos tipos de iones y para cada uno de ellos es necesario emplear un tipo de antiincrustante diferente. El principio de funcionamiento de estos antiincrustantes es evitar la acumulación de partículas y la formación de cristales en las membranas por medio de tres maneras principales:

- *Inhibición del umbral:* Se define como la habilidad de un antiincrustante de mantener soluciones súper saturadas de sales poco solubles.
- *Modificación del cristal:* Se encarga de distorsionar la forma cristalina de las incrustaciones atacando a el núcleo de la carga iónica de estos cristales. El resultado es una incrustación suave y no adherente.

- *Dispersión:* La dispersión imparte una alta carga aniónica que sirve para mantener los cristales separados.

Durante la última década han surgido nuevos tipos de antiincrustantes compuestos de mezclas de distintos pesos moleculares tales como los policarboxilatos y los poliacrilatos [19].

- **Adsorción- Desgasificación:**

Si se da el caso en el que el agua contenga una concentración elevada de MO, se debe reducir empleando técnicas de adsorción utilizando filtros de carbón activo (CA). Una de las desventajas de estos sistemas es que los lechos de carbón activo tienden a acumular microorganismos que pueden causar problemas de proliferación biológica en las membranas osmóticas.

Del mismo modo, cuando existen gases en la captación de agua salada con capacidad de perjudicar el funcionamiento de la planta se deberán emplear técnicas de desgasificación como el arrastre por aire o en vacío utilizando arrastre por vapor.

En el pretratamiento podemos identificar el principal consumo energético con la maquinaria de dosificación de sustancias químicas y su control, además de la maquinaria de filtración y su mantenimiento como la limpieza de los sólidos.

2.2.3 ETAPA DE LA ÓSMOSIS INVERSA

Como ya ha sido mencionado en la presentación del apartado 2, el proceso de ósmosis inversa (OI) es el corazón del modelo de planta desaladora que estamos estudiando. Sabemos que consiste en la aplicación de una presión externa necesariamente superior a la presión osmótica para separar el soluto del disolvente, es decir, separar el agua de la salmuera. Este proceso necesita de membranas semipermeables que separan ambas disoluciones. En este apartado se van a estudiar los distintos tipos de membranas que se

utilizan actualmente y las posibles configuraciones posibles que tienen las plantas desaladoras.

2.2.3.1 TECNOLOGÍAS DE MEMBRANA.

Para el diseño de estas membranas se tienen en cuenta 3 factores principales, el empaquetado de la membrana, el soporte y el diseño mecánico del paso de coloides. Las dos primeras tienen como misión maximizar el flujo de agua minimizando el paso de sales a través de la membrana, mientras que la tercera es una característica mecánica que busca evitar la acumulación de partículas en la membrana para alargar su vida útil y reducir los costes de mantenimiento [18].

Además de las características mecánicas mencionadas anteriormente, estas propiedades tienen un peso muy importante en el rendimiento de la desaladora ya que afecta directamente en su consumo energético. Hay 4 tipos de tipos de membranas a nivel comercial:

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

CONFIGURACIÓN PLATO-MARCO

Esta configuración fue la más utilizada en los inicios de la tecnología de ósmosis inversa. Está compuesta por un soporte rectangular o circular por el que circula el agua de un lado a otro y dispone de un plato colocado a ambos lados de la membrana para recoger el permeado producido por el proceso de ósmosis inversa.

Estas plantas tienen como ventajas a destacar que disponen de una vida útil muy larga y que para pequeñas cantidades de agua salada tienen un rendimiento considerable [20]. Para ser capaces de purificar volúmenes grandes de agua se tienen que disponer este tipo de membranas en serie generando mayores pérdidas de carga lo que aumenta los costes energéticos y además se vuelven poco accesibles para los operarios encargados de su mantenimiento. Por este motivo hoy en día se utilizan otras tecnologías en las planta desaladoras, aunque sí que tienen un peso importante en otras industrias, como por ejemplo en la industria de la alimentación en aplicaciones como la concentración de los zumos envasados [18].

En la Figura 11 aparece representado el esquema de una membrana plato-marco.

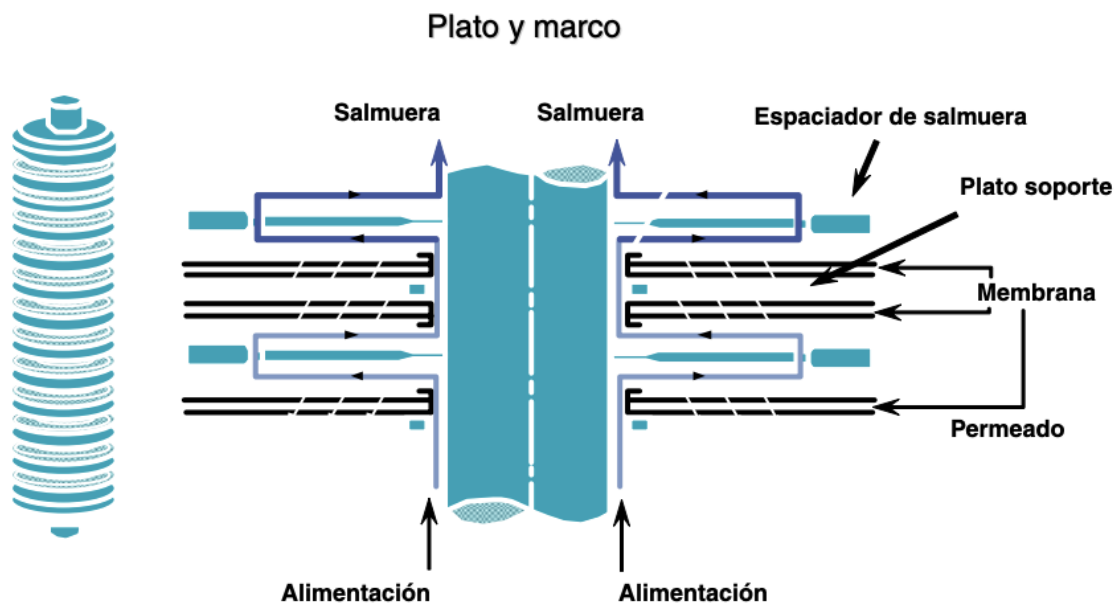


Figura 11: Esquema de configuración plato-marco. Fuente: https://www.msbs.gob.es/profesionales/saludPublica/docs/Guia_desalacion.pdf

CONFIGURACIÓN TUBULAR

La configuración tubular funciona bajo el mismo principio que la de plato-marco y fue también una de las primeras tecnologías en aplicarse. Al igual que en la configuración anterior, la membrana tubular presenta una alta densidad de empaquetado lo que hace que se incremente el coste económico de producción de la planta, es por eso que actualmente tienen las mismas aplicaciones que la membrana plato-marco y no se utiliza en las plantas desaladoras.

Como se puede apreciar en la Figura 12, este tipo de configuración está compuesto por un cilindro normalmente de PVC que se encarga de soportar la presión y actúa de carcasa envolviendo membranas semipermeables en forma de tubo con un diámetro de [0.5, 1] cm normalmente. El agua entra a la membrana por su interior y atraviesa la pared del tubo, este aspecto se le conoce como el “sudor” del tubo. De esta forma la salmuera sale por el extremo final del tubo.

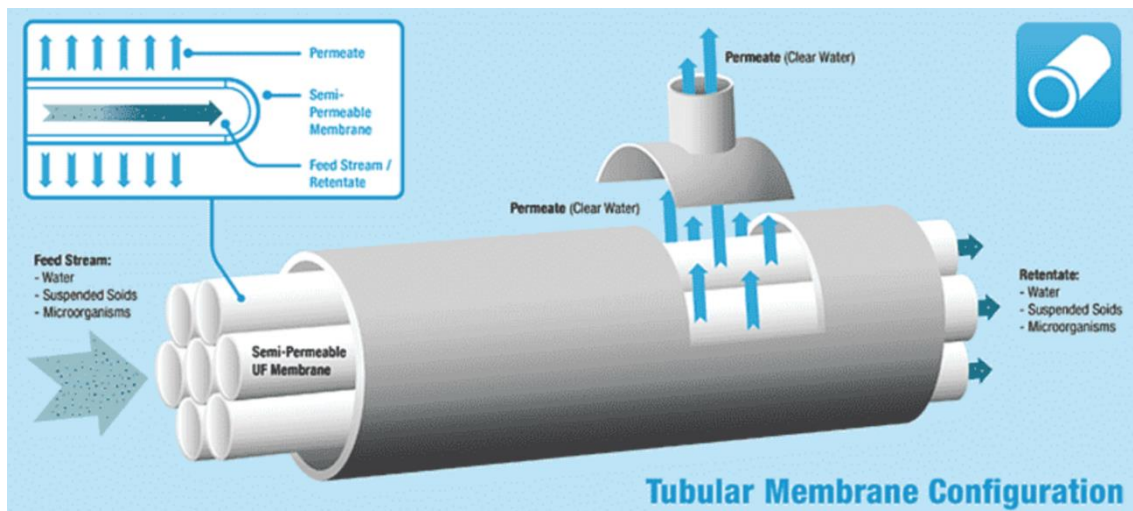


Figura 12: Esquema de una membrana en disposición tubular. Fuente: <https://www.pngwing.com/es/free-png-dcsmy>

CONFIGURACIÓN FIBRA HUECA

Este tipo de membrana osmótica tiene una configuración muy parecida a la estudiada anteriormente, ya que tienen la misma forma y se rigen bajo el mismo principio. La diferencia principal entre la membrana tubular y la membrana de fibra hueca es que en este último caso los diámetros de las fibras están en el orden de magnitud de cien micrómetros. Esta característica supone un aumento considerable del área efectiva de permeabilidad para un mismo volumen de espacio. Además, estas fibras al tener un diámetro tan pequeño tienen una elevada resistencia a la presión.

En la Figura 13, se representa el esquema de una membrana en configuración fibra hueca.

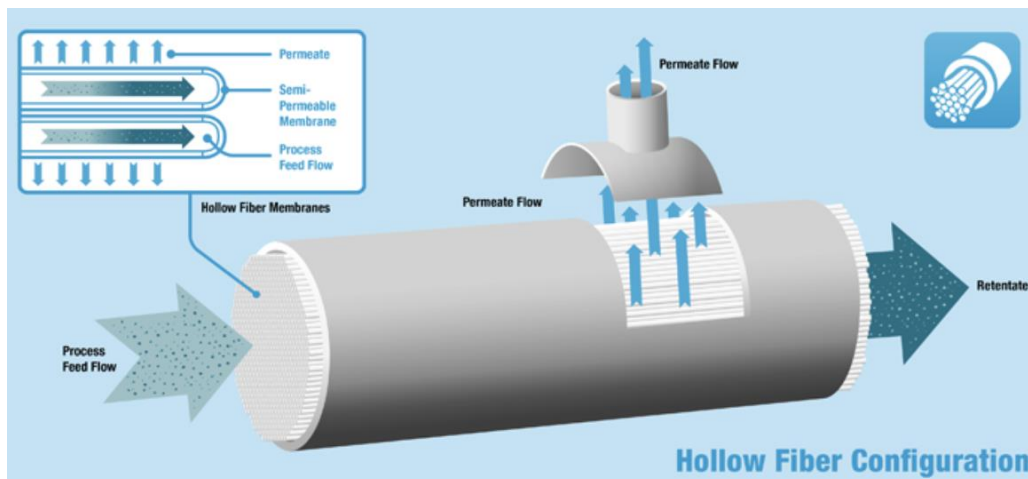


Figura 13: Esquema de una membrana en disposición Fibra hueca. Fuente: <https://ingenieromarino.com/sistema-de-osmosis-inversa-como-generador-de-agua-dulce/>

Esta configuración consigue la mayor densidad posible de empaquetado consiguiendo una mayor relación de agua producida por volumen de espacio ocupado. Sin embargo, esta alta densidad hace que quede muy poco espacio entre las fibras provocando obstrucciones debidas a partículas coloidales o sólidos en suspensión que se hayan podido colar en el sistema aumentando los costes de mantenimiento. Por otro lado, estas fibras son muy fáciles de instalar y se pueden reemplazar rápidamente por bloques.

En la Figura 14, se muestra claramente los flujos en una membrana de fibra hueca.

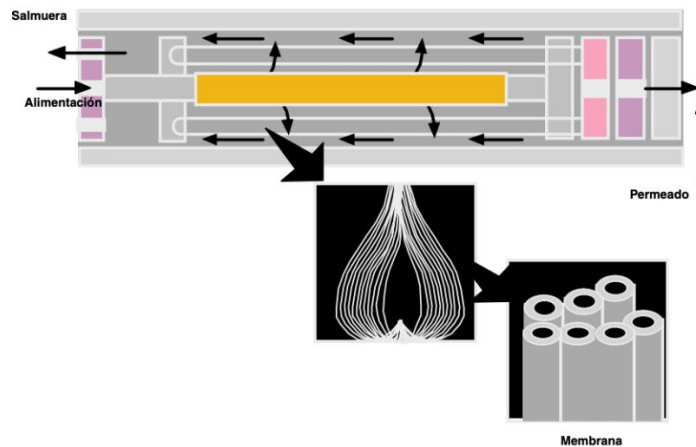


Figura 14: Esquema de membrana en fibra hueca 2. Fuente:

https://www.mschs.gob.es/profesionales/saludPublica/docs/Guia_desalacion.pdf

ARROLLAMIENTO EN ESPIRAL

Las configuraciones de membranas en forma de arrollamientos en espiral se fabrican en forma de lámina sobre un material que actúa como soporte, típicamente es una multicapa compuesto de poliéster en disposición tejido-no tejido. Estas láminas se agrupan entre sí, pero con un separador en posición opuesta formando un canal por donde va a fluir el flujo permeado al final del proceso de desalación. La capa activa de la membrana se encuentra en la parte de fuera por debajo de la malla de sujeción. Los dos extremos se sellan mediante un pegamento para constituir un grupo de láminas a modo de “sobre”. El extremo abierto tiene arrollada una red de plástico de modo que quede una separación suficiente entre las capas para que pueda circular el agua de alimentación. Finalmente se completa el conjunto añadiendo unas piezas de plástico en los extremos que tienen como objetivo eliminar un posible “efecto telescópico”.

En la Figura 15, se representa el esquema de la configuración de arrollamiento en espiral.

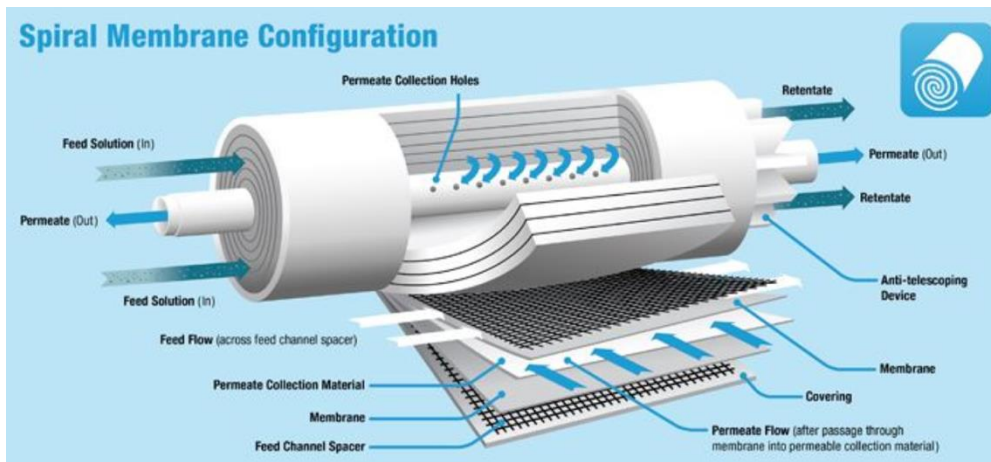


Figura 15: Esquema de membrana en arrollamiento de espiral. Fuente: : <https://ingenieromarino.com/sistema-de-osmosis-inversa-como-generator-de-agua-dulce/>

Es importante destacar que estas configuraciones disponen de unos recipientes en forma de tubo o cilindro conocidos como cajas de presión. Estos elementos son de vital importancia en la tecnología de la ósmosis inversa ya que son los encargados de soportar las altas presiones de operación, necesarias para el correcto funcionamiento de este principio.

Entonces, la alimentación de agua entra por uno de los extremos fluyendo en sentido paralelo al tubo que se encarga de captar el permeado. El agua que atraviesa la membrana avanza en espiral y llega a dicho tubo. Por otro lado, el agua que no pasa la membrana semipermeable avanza por el tubo arrastrando a su paso las sales hacia la salida donde se acumula el concentrado antes de su eliminación.

Este tipo de membranas son las más utilizadas en la actualidad en la industria de la desalación de agua ya que tienen una serie de ventajas que la diferencian del resto de tecnologías [21] [22].

- Esta configuración es considerablemente más barata que el resto de tecnologías.
- Tiende a obstruirse menos, lo cual abarata el coste de mantenimiento y se puede utilizar un caudal de agua más cargado.
- Esta tecnología tiene un control mucho más preciso en la calidad del agua pura resultante del proceso de ósmosis inverso.

2.2.3.2 MODELOS DE PLANTA (DISEÑO)

Las plantas desaladoras que funcionan bajo el principio de OI necesitan de bombas de alta presión (High pressure pump) que alimentan al sistema del agua que viene después del pretratamiento al bastidor que es el lugar donde se encuentran las cajas de presión que contienen a las membranas semipermeables, a las tuberías que se encargan de evacuar la salmuera y finalmente la línea de permeado que conduce el agua desalada a la siguiente fase de la planta.

El consumo energético de la planta varía significativamente en función de la configuración en la que se dispone la etapa osmótica. Por este motivo es importante estudiar las distintas configuraciones posibles para hacer un análisis de nexus agua-energía.

En la Figura 16 aparece representado el esquema básico de un sistema de membranas semipermeables en arrollamiento en espiral.

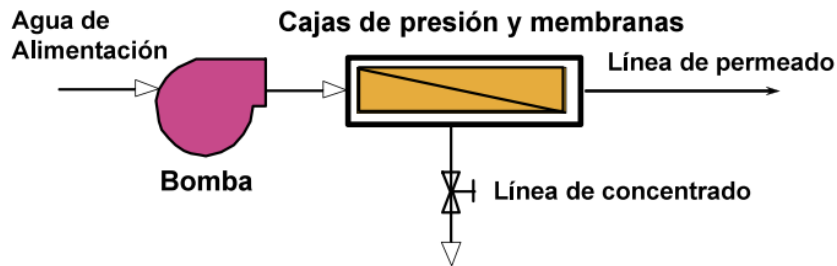


Figura 16: Esquema básico de un sistema de membranas. Fuente: [18]

Es importante tener presente que en las plantas desaladoras existe un factor de conversión que relaciona en tanto por ciento la cantidad de permeado que se obtiene de un cierto caudal de agua captada. Este es un indicador de rendimiento de las membranas muy interesante y viene dado por la siguiente expresión [18]:

$$Z = \frac{Q_p}{Q_f} * 100 = \left(1 - \frac{Q_c}{Q_f} \right) * 100$$

Ec. 2

Donde:

- Q_p = Caudal de permeado.
- Q_f = Caudal de agua captada (alimentación).
- Q_c = Caudal de rechazo (salmuera).
- Z = Factor de conversión en tanto por uno.

Además, sabemos que cuanto mayor sea el factor de conversión resultante de la planta mayor será la concentración de material de rechazo. Este aspecto se puede relacionar con la siguiente función:

$$FC = \frac{1}{1 - Z}$$

Ec. 3

Teniendo en cuenta que:

- FC= Factor de concentración de salmuera.
- Z = Factor de conversión en tanto por uno.
-

No obstante, para determinar la calidad del permeado obtenido al final del proceso de ósmosis inversa el mejor indicador es el factor de rechazo. Esta expresión determina en tanto por ciento la cantidad de sales que se han eliminado del agua tratada y se rige bajo la siguiente expresión:

$$R = \frac{C_f - C_p}{C_f} \cdot 100$$

Ec. 4

Donde:

- C_f = Concentración de sales en el agua captada (antes del tratamiento) [Kg/m^3].
- C_p = Concentración de sales en el permeado final [Kg/m^3].
- R = % de sales rechazadas.

Una vez conocido el concepto del factor de conversión del sistema hay que destacar que este depende de manera directa de las cajas de presión instaladas y de la longitud del sistema debido a las pérdidas de carga. Es por eso que para obtener valores razonables del factor de conversión es necesario instalar tramos cortos de cajas de presión (como máximos un metro en serie). Según el estudio realizado por el Ministerio de Sanidad del gobierno español, para alcanzar rendimientos del 45% en agua de mar y del 75% en agua salada sería necesario disponer de mínimo 6 etapas en serie compuestas de membranas en arrollamiento en espiral [18].

En resumen, tanto el consumo energético como el rendimiento hídrico de la planta dependen del tipo de configuración empleado en cada caso. Por este motivo procedemos a analizar las configuraciones más usadas en esta industria [3]:

DISEÑO DE UNA ETAPA

La capacidad de caudal de agua que tiene un sistema osmótico se mide por la cantidad de cajas de presión montadas en paralelo.

La configuración de una etapa está formada por una bomba de alta presión que se encarga de aportar caudal de agua salada a una serie de cajas de presión dispuestas de forma paralela. El permeado resultante es recogido del bastidor de cada una de estas cajas. En la Figura 17 se representa el esquema de la configuración en una etapa:

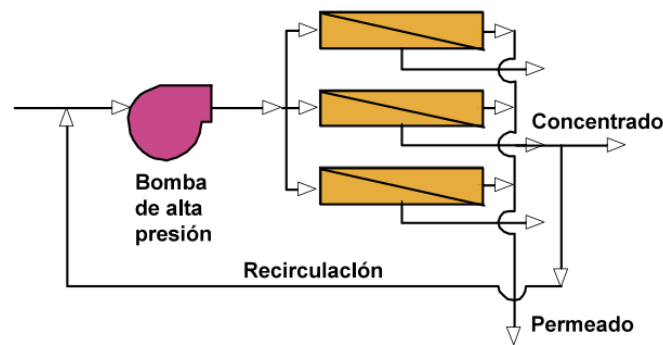


Figura 17: Configuración en una etapa. Fuente: [18]

DISEÑO DE DOS ETAPAS

Una manera de mejorar el rendimiento de la planta es utilizar una técnica que consiste en recircular el caudal de concentrado para obtener un Z mayor. Para ello es necesario aumentar la longitud del sistema y hacer pasar este caudal por otro juego de membranas que se conoce como la segunda etapa. En la segunda fase la presión que ejerce el caudal es mayor que en la primera, ya que en esta etapa entra el concentrado con mayor contenido de salmuera por litro de agua.

Este tipo de plantas tiene el siguiente esquema:

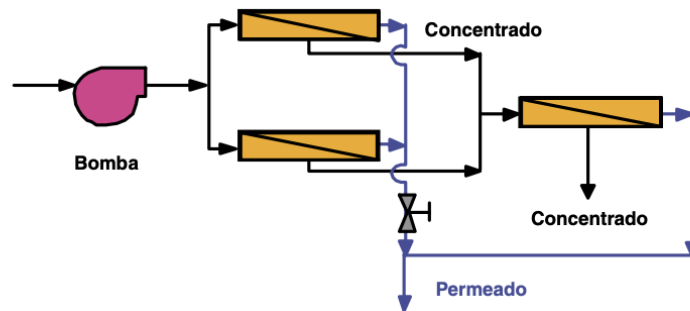


Figura 18: Configuración en dos etapas. Fuente: [11]

DISEÑO DE TRES ETAPAS

Uno de los problemas más comunes en el proceso de desalación es el desequilibrio que se genera en la producción de permeado por unidad de superficie de membrana instalada. Este fenómeno se debe a las fluctuaciones de presión entre las cajas de presión de cada etapa, ya que como se ha mencionado anteriormente, la presión osmótica va aumentando a lo largo del sistema debido al incremento de concentración de sal en el concentrado. Uno de los métodos más empleados a la hora de regular la presión entre etapas en sistemas donde la salinidad es elevada, es instalar una bomba conocida como “bomba booster” para elevar la presión equilibrando de esta manera el sistema.

Una vez queda regulada la presión, obtenemos una planta con un mejor rendimiento y menor costo energético. Cuando se mueven volúmenes elevados de agua es frecuente que se necesite de la conexión de tres etapas para obtener un buen rendimiento y un valor de conversión aceptable [21].

En la Figura 19, se representa el esquema de una instalación de tres etapas:

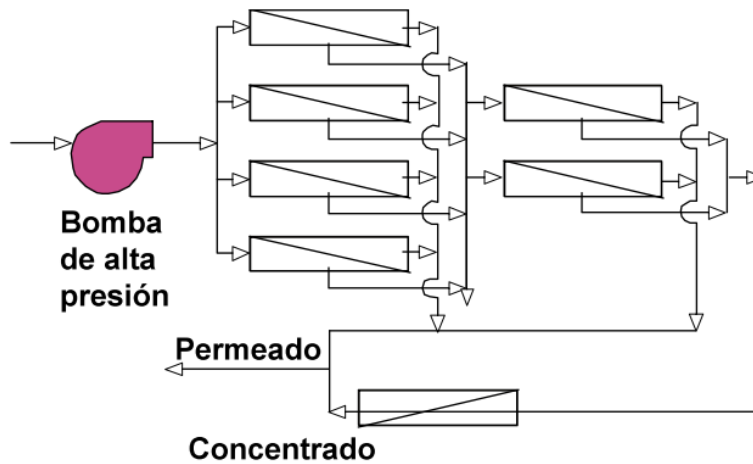


Figura 19: Configuración en tres etapas. Fuente [11].

DISEÑO DE PASOS

Como el R (rechazo) de sales en el permeado resultante no es perfecto, el agua desalada tendrá una concentración un otra en función de variables que afectan al sistema como por ejemplo la concentración inicial, el FC dado o la temperatura del agua. Según el estudio [18], cuando se trabaja con agua salada la concentración de sal en la salida del permeado esta entorno a [200 , 300] mg/L.

Esta concentración no es aceptable para el consumo humano ni el industrial, es por eso por lo que la solución pasa por instalar otra etapa de ósmosis inversa a la salida de la primera como se muestra de manera simplificada en la Figura 20.

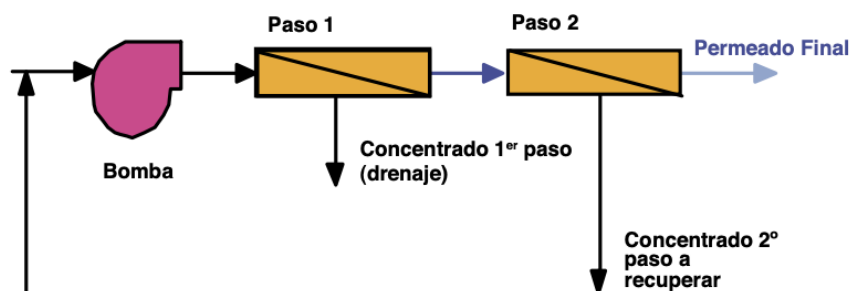


Figura 20: Configuración simplificada dos pasos. Fuente: [11].

Es importante indicar que para su correcto funcionamiento es necesario incluir una bomba entre los pasos para aumentar la presión que ejerce el agua de alimentación. Según el estudio mencionado anteriormente, el valor de concentración de sal a la salida del paso 2 es de aproximadamente 10mg/L. Además cabe destacar que la realimentación de concentrado del paso dos se recircula hacia el paso 1, lo cual hace que el flujo de agua de alimentación entrante en las cajas de presión sea más alto que con un solo paso.

En conclusión, se puede decir que mientras que la adición de etapas supone un aumento en la masa de agua tratada, el número de pasos supone una mejoría de calidad en el permeado resultante.

2.2.4 POSTRATAMIENTO

Una característica fundamental del permeado resultante de desalar el agua es que suele tener una dureza y una alcalinidad excesivamente bajas debido a la potente acción de las membranas, por este motivo son aguas muy agresivas. Por lo tanto, esta agua no es apta para el consumo humano ya que no cumple con ninguna normativa.

Para que sea apto para su distribución y posterior consumo es necesario aplicar un proceso de postratamiento, empezando por la remineralización del agua agregando sustancias como magnesio, calcio y bicarbonatos. Además de esta corrección es necesario fijarse en el pH y en el índice de turbidez antes de proceder a la desinfección y distribución de la misma.

El tipo de tratamiento de corrección a emplear viene determinado por el proceso de desalación utilizado y por la calidad de permeado final. Existen varios procesos que pueden ser necesarios o no dependiendo de las características del permeado:

DESCARBONATACIÓN O ELIMINACIÓN DE CO₂.

Es necesario fundamentalmente cuando en el pretratamiento se ha empleado CO₂ para disminuir el nivel de pH para no dañar la membrana osmótica, este CO₂ puede atravesar la membrana acumulándose en el agua resultante provocando un descenso en el pH lo que resulta en un agua aún más agresiva.

Como parámetro aproximado podemos indicar que el objetivo reside en mantener el índice de Langenier en el intervalo de $\pm 0,5$ para garantizar un correcto ajuste del pH [18].

INTERCAMBIO IÓNICO.

El intercambio iónico se define como el intercambio de iones entre un sólido o resina y un líquido. Este tratamiento se utiliza en la industria de la desalación fundamentalmente para ablandar el agua, aunque tiene otras aplicaciones importantes como la eliminación del exceso de boro para ajustar el agua a la normativa vigente.

Se utilizan cámaras de resinas por donde pasa el agua y se clasifican en 4 tipos:

- Resinas intercambiadoras de cationes.
- Resinas intercambiadoras de aniones.
- Resinas selectivas.
- Polímeros de adsorción.

REMINERALIZACIÓN DEL AGUA.

Como se ha mencionado anteriormente, el permeado resultante de la desalación no tiene la alcalinidad ni la dureza suficiente para cumplir con la normativa vigente. Por este motivo es necesaria la remineralización del agua producto. Existen dos métodos que se pueden dar conjuntamente [25]:

- Remineralización mediante mezcla de aguas.
- Remineralización química.

Sabemos que el índice de Langenier tiene que estar próximo a cero, pero no hay que olvidar que también es necesario conseguir un agua que sea estable en contacto con la atmósfera.

Remineralización mediante mezcla de aguas:

Esta técnica se basa en la mezcla de un agua que haya sido pretratada con el agua producto comprobando los parámetros químicos necesarios para dar a este resultado como válido. Es importante destacar que esta técnica solo será aplicable en el supuesto de que tengamos acceso a otra fuente de agua que no sea agua salobre o agua marina.

Remineralización química:

En el supuesto de que no se pueda aplicar la técnica de la mezcla de aguas, o que esta no sea suficiente para tratar el agua producto, se utiliza la remineralización química. Este procedimiento se puede realizar de dos maneras principales:

- Dosificación de CO₂ e hidróxido cálcico.
- Dosificación de CO₂ y lechos de carbonato cálcico (calcita).

En la Figura x se representa el principio de remineralización desde el punto de vista de



para un agua desalada normal (pH=6; 1,5mg HCO₃⁻; 3mg CO₂/L; 200mg STD/L y T=20°C).

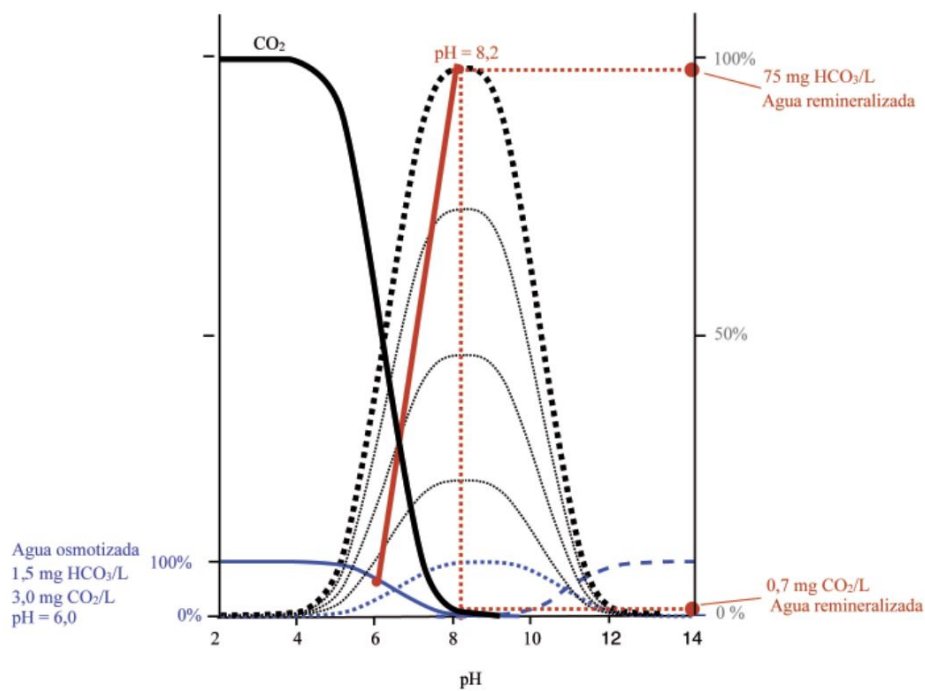
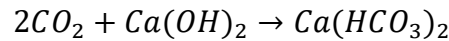


Figura 21: Proceso de remineralización de agua osmotizada. Fuente: [19].

Actualmente, en España y la mayoría de los países GCC la técnica de remineralización química más empleada es la dosificación de CO₂ e hidróxido cálcico, la cual se rige por la siguiente ecuación:



Se sabe que el hidróxido cálcico es un sólido que se debe de dosificar en modo de disolución. Por ello se prepara una solución conocida como “leche de cal” al 10-15% con el permeado resultante del proceso osmótico.

No obstante, en plantas de gran capacidad el permeado se hace pasar primero por unos saturadores para diluir el hidróxido cálcico en un volumen mayor de agua logrando así concentraciones del 5-7%. Esta agua saturada se mezcla con agua a remineralizar en un intercambiador donde se le añade CO₂ para controlar los niveles de pH [24].

2.4 Sistemas de recuperación de energía

Hoy en día uno de los retos a los que se enfrenta la industria es mejorar a la hora de optimizar los recursos energéticos y reducir costes de producción. En las plantas desaladoras estos dos conceptos van de la mano, ya que su principal fuente de gastos se encuentra en la energía consumida. En un proceso de OI el principal gasto de energético se da en las bombas de alta presión, es por eso que a lo largo de los años se han estudiado procesos de recuperación de energía a través del rechazo a alta presión.

Como se ha explicado anteriormente, para el correcto funcionamiento de la planta OI es necesario superar la presión osmótica correspondiente al flujo de agua a tratar. Esta presión es muy elevada ya que se necesitan (dependiendo de las características del agua y de la planta) 70-100 bares a la entrada. Por lo tanto la presión a la salida de las membranas será la presión de entrada menos las pérdidas de carga generadas en las mismas.

El principio de funcionamiento de estos sistemas se basa en aprovechar la alta presión del flujo de rechazo que se genera a la salida del proceso de ósmosis recirculando este flujo a la entrada para conseguir así reducir la cantidad de energía a suministrar por las bombas de alta presión.

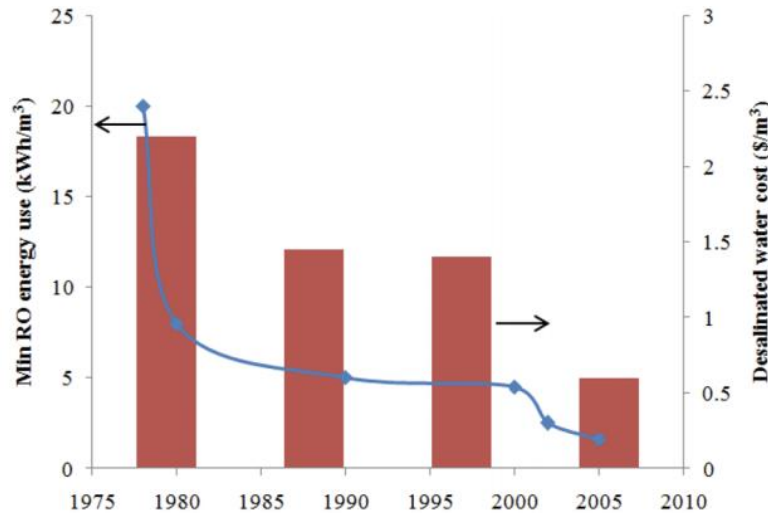


Figura 22: Consumo energético específico y coste de desalación en tres décadas. Fuente [17].

Cuando empezaron a funcionar las plantas de ósmosis inversa, los avances tecnológicos estaban centrados exclusivamente en el desarrollo de las membranas y no se aprovechaba la energía que genera esta presión de salida. Se utilizaba una válvula reductora de presión para poder enviar el flujo de rechazo de nuevo al mar.

No obstante, con la introducción de estos sistemas también conocidos como ERDs fundamentalmente en los años 90 se produjo una mejora significativa de rendimiento energético y costes tal y como se puede apreciar en la figura x donde a principios de siglo se produjo un escalón considerable en la gráfica de gastos y recursos utilizados.

Como ejemplo práctico, podemos destacar el estudio realizado en [23], donde dice que la implantación de los ERDs consigue bajar el consumo de una planta que consume aproximadamente 6.6 kWh/m^3 a 3 kWh/m^3 para el tratamiento de agua salada.

Con el paso del tiempo se han desarrollado diversas tecnologías para la recuperación de energía. A continuación, se describen las principales tecnologías que existen en la actualidad.

TURBINA FRANCIS (BOMBA INVERTIDA).

La Turbina Francis fue la primera idea que se estudió para recuperar energía. Consiste en la incorporación de una bomba invertida a la salida del flujo de rechazo para que sea accionada por la salmuera. El principal inconveniente de esta tecnología es que es poco flexible con las variaciones de presión de operación en la planta, ya que su funcionamiento viene determinado por la curva caudal-altura de la bomba, por este motivo al variar la presión a la entrada de la planta debía de variar también el caudal que circula por la bomba con la curva. Para lograr esto se incorporaba una válvula bypass encargada de regular el caudal de salmuera que era recirculado [24].

Hoy en día esta tecnología ha quedado obsoleta y ya no se utiliza en las plantas desaladoras, aunque es la manera más didáctica de entender cómo funcionan estos sistemas. Es por eso que se representa el diagrama de Sankey de una planta de OI con una turbina Francis.

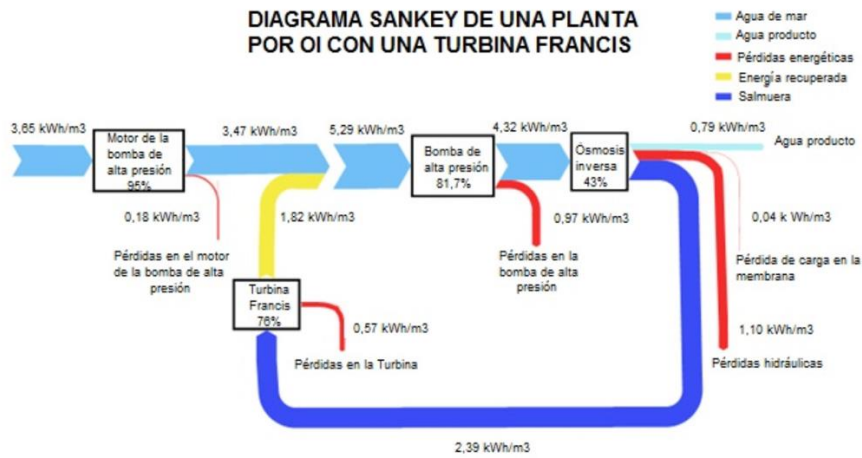


Figura 23: Diagrama de Sankey de una planta con turbina Francis. Fuente:[18].

TURBINA PELTON.

La introducción de la turbina Pelton supuso una revolución en la industria desaladora, ya que tenía un mayor rendimiento en la recuperación de energía que la turbina Francis, 88% contra el 76% de rendimiento teórico. Además, solucionaba los problemas de flexibilidad que existían en la turbina Francis admitiendo variaciones en la presión de entrada sin que ello afecte al rendimiento de la planta.

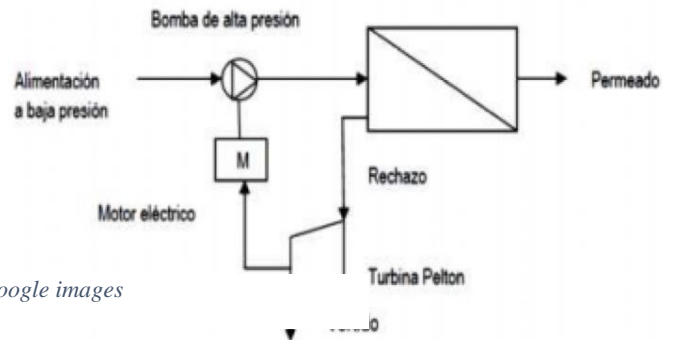
Al igual que en el caso anterior, la potencia recuperada se utiliza para ayudar a la bomba de alta presión aportando energía a la entrada. Esto permite utilizar bombas de menor tamaño y así ahorrar energía. En la siguiente Figura se muestra una imagen de la turbina Pelton y un diagrama de bloques de su funcionamiento.

Igual que la turbina Francis, la Pelton ha quedado obsoleta en favor a los siguientes sistemas que se van a exponer a continuación.

TURBOBOMBA Y TURBOCHARGER.



Figura 24: Representación de la turbina Pelton. Fuente: google images



Intentando reducir gastos y mejorar el rendimiento de la planta, se intentó crear una forma compacta de englobar la bomba de alta presión y la turbina de recuperación en un mismo bloque. Por este motivo se optó por unir la bomba y la turbina invertida en un único eje, a esta unión se le conoce como Turbobomba. Más adelante se mejoró esta tecnología y se desarrolló el Turbocharger que funciona bajo el mismo principio que la Turbobomba pero de un tamaño mucho menor que esta [24].

El objetivo de esta tecnología es transformar, por medio de la turbina, la energía hidráulica en energía mecánica utilizable por la bomba de alta presión para elevar la presión del fluido en la entrada.

Para explicar el funcionamiento de este sistema nos ayudamos de la Figura 25. Como se ha mencionado anteriormente la función del turbocharger es producir un impulso de presión en la entrada

de flujo al proceso osmótico (A, C y E) utilizando la presión hidráulica que hay en la corriente de flujo de rechazo (G).

En el esquema se pueden distinguir dos elevaciones de presión, una en (C-A) debida a la bomba y posteriormente una en (E-C) debida al turbocharger. A continuación, el agua salada entra en las cámaras de ósmosis inversa para producir la desalinización del agua. El flujo permeado sale por (F) mientras que el flujo de rechazo o salmuera sale por (G) y pasa por (G-H) para absorber la energía aportada.

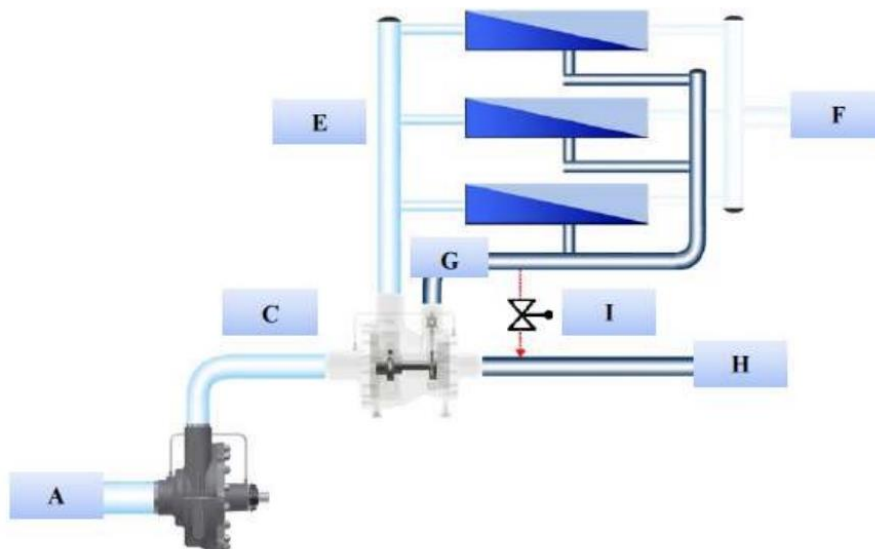


Figura 25: Sistema OI con turbocharger. Fuente: [18].

Es importante destacar la existencia de la válvula de derivación que se encuentra en (I), ya que es necesaria cuando se tienen variaciones bruscas en la presión de entrada al sistema. Cuando la presión que aporta la salmuera no es suficiente para mover la turbina, la válvula de derivación desvía parte del flujo en (G) a el escape de salmuera (H) para regular el caudal y obtener así el flujo deseado [18].

CÁMARAS DE INTERCAMBIO DE PRESIÓN DE ROTACIÓN:

El principio de físico por el que se rige su funcionamiento es el mismo que en las cámaras de desplazamiento diferenciándose únicamente en el principio de rotación por el cuál, se intercambia la presión entre dos flujos.

En el caso anterior lo que se mueve son las válvulas y los pistones dando paso a una corriente u otra, en este caso se utiliza un rotor cilíndrico como se puede apreciar en la Figura 27.

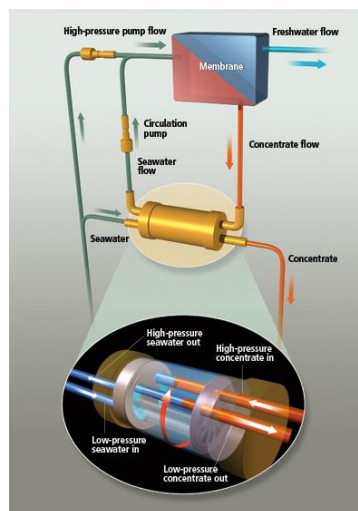


Figura 27: Cámara de intercambio de presión por rotación. Fuente: [17].

El tipo más común de este mecanismo es conocido como ERI (Energy-Recovery Inc.) los cuales destacan por su alta eficiencia de transferencia de presión llegando al 98% de rendimiento. En términos económicos este rendimiento supone el ahorro de hasta el 60% en costes energéticos. Además, estos sistemas se caracterizan por su gran flexibilidad de operación siendo viable variar significativamente la presión del flujo de agua salada en la entrada de la planta.

Por todos estos motivos no es de extrañar que esta tecnología se haya impuesto a las demás a la hora de implantar un sistema de recuperación de energía en una planta de ósmosis inversa.

2.5 Aspectos energéticos de una planta desaladora

Hasta este apartado en esta memoria se ha estudiado el proceso por el que pasa el agua de captación en una planta desaladora por ósmosis inversa de manera genérica y haciendo más hincapié en la parte hidráulica de la misma. Aunque a lo largo de los distintos tramos que conforman la planta se han mencionado características sobre el modelo energético de cada una de las fases, este apartado tiene como objetivo ilustrar de manera matemática la partida energética de una desaladora y proponer un modelo energético.

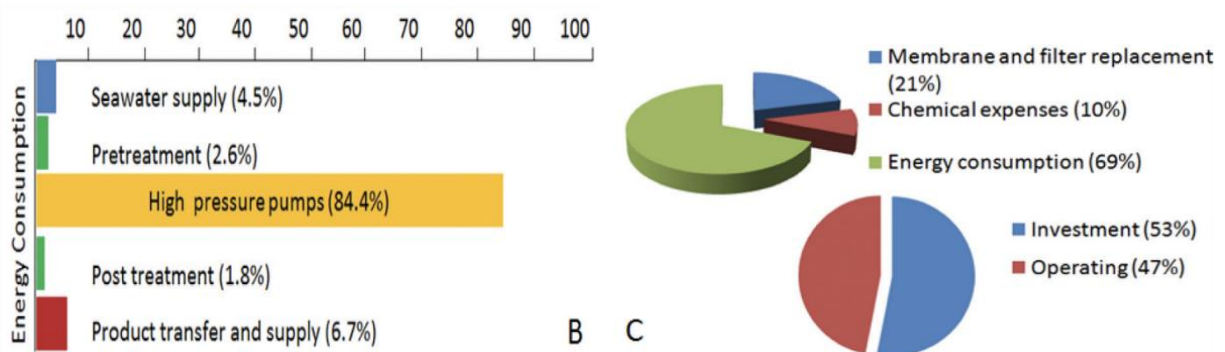


Figura 28: Porcentajes de consumos energéticos de una planta desaladora y costes. Fuente: [25].

Como ya se ha mencionado anteriormente, los componentes que más influyen en el consumo energético de la planta son las bombas de alta presión y los boosters (bombas intermedias entre pasos o realimentaciones) seguidos de las bombas encargadas de captar y distribuir el agua.

En la Figura 28, aparece representado un diagrama donde se detallan los principales porcentajes de consumo energético en función de cada elemento de la planta.

De acuerdo al diagrama B podemos reafirmarnos en la teoría de que las bombas HP son las que más afectan al consumo energético de la planta. Mientras que en el diagrama C se puede comprobar que el gasto de energía supone casi un 70% de los costes totales de la planta. Por este motivo es tan importante encontrar un punto óptimo de operación y poder así reducir los costes económicos de la estación.

Atendiendo a la información obtenida en el diagrama B analizado anteriormente, se propone un modelo del consumo energético en el que se tiene en cuenta el gasto producido por una bomba HP y una bomba booster utilizada en el intercambiador de presión situado en la realimentación del sistema.

Así mismo, para representar el modelo matemático de manera esquemática, se va a utilizar el estudio [21] donde se representa un esquema de una planta desaladora compuesta por un paso y una única etapa. Como podemos apreciar el diagrama de bloques representado en la Figura 29 se trata como un volumen de control en el que se aplica el principio de la conservación de la masa en función de un caudal q .

Como subíndices que representan el tipo de flujo tenemos:

- A = Flujo de alimentación.
- P = Flujo de permeado.
- R = Flujo de rechazo (Salmuera).

Además, existen unos superíndices que representan la etapa de la planta desaladora por donde están circulando.

- OI = Flujo que entra y sale de la etapa donde se produce la ósmosis inversa.
- IP = Flujo que entra y sale de la cámara de intercambio de presión (Sistema de recuperación de energía).
- AP = Flujo que entra y sale por la bomba de alta presión.

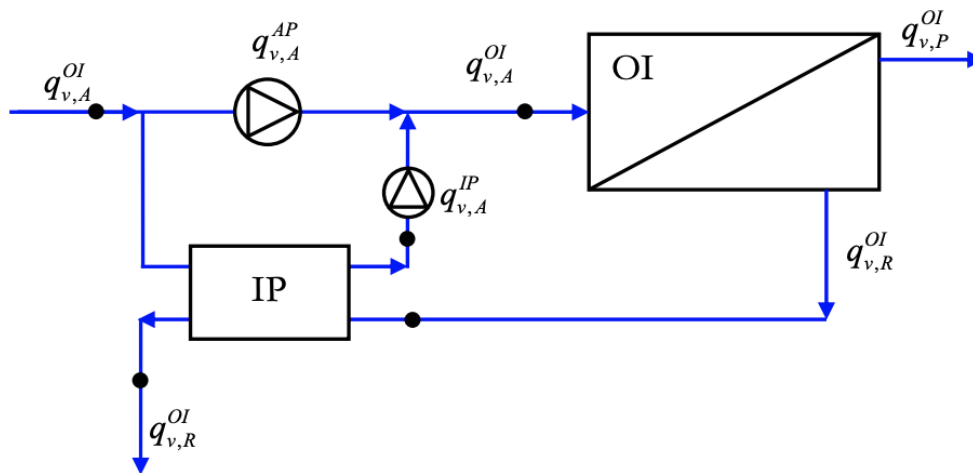


Figura 29: Esquema de núcleo de agua salada mediante ósmosis inversa. Fuente: [14].

Según este estudio, el módulo OI se encuentra compuesto por n permeadores conectados en paralelo con m membranas dispuestas en arrollamiento en espiral (vimos anteriormente que estas son las más utilizadas debido a su mayor rendimiento).

También se sabe que el módulo IP se trata de una cámara intercambiadora de presión por rotación debido a las múltiples ventajas que tiene sobre el turbocharger y la cámara de intercambio de presión lineal. En conjunto con esta etapa se encuentra una bomba conocida como bomba booster, cuya misión es elevar la presión del flujo recirculado para compensar las pérdidas de carga que se hayan podido generar en las membranas en el

proceso osmótico inverso. El consumo de esta bomba es mucho menor que el de la bomba de alta presión.

A la hora de constituir el modelado de una planta desaladora por ósmosis inversa es importante definir el factor de conversión del sistema (f_r) como el cociente entre el caudal volumétrico de producto y el caudal volumétrico de alimentación. Este factor expresado en (%) se conoce como (R_{OI}) atendiendo a la siguiente ecuación [21].

$$R_{OI} = 100 \cdot f_R = 100 \cdot \frac{q_{v,p}^{OI}}{q_{v,A}^{OI}}$$

Ec. 5

Esta expresión $q_{v,p}^{OI}$ y $q_{v,A}^{OI}$ se refiere a los caudales de permeado y captación que circulan por el bloque de las cámaras osmóticas. Por otro lado, las variaciones de concentración y presión durante el tratamiento producen cambios en la densidad del agua, pero la temperatura se mantiene prácticamente invariable durante el mismo.

Tal y como se ha mencionado anteriormente el caudal que entra y sale de la planta es el mismo, es decir, se cumple la conservación de la masa. Por lo tanto, si establecemos un volumen de control englobando el diagrama de bloques de la Figura x se cumple:

$$q_{v,A}^{OI} = q_{v,p}^{OI} + q_{v,R}^{OI}$$

Ec. 6

$$q_{v,p}^{OI} = q_{v,A}^{AP}; \quad q_{v,R}^{OI} = q_{v,A}^{IP}$$

Ec. 7

Finalmente, antes de entrar en los cálculos de los consumos energéticos es necesario definir los siguientes superíndices [21].

- Baja Presión (BP): Se refiere a la presión de alimentación de la bomba HP antes de ser presurizado y la presión de rechazo que sale por el intercambiador de presión.
- Alta Presión (AP): Se refiere a la presión que lleva el agua en la entrada al módulo OI.
- Presión Intermedia (PI): Se refiere a la presión propia del flujo de alimentación a la salida de la cámara de intercambio de presión.

Se puede decir que el gasto de energía producido durante la etapa OI (P_W^{OI}) es el resultado de sumar la potencia consumida en la bomba de circulación (P_W^C) y la de la bomba de alta presión (P_W^{AP}). Estos dos términos de potencia se pueden expresar en función del rango de presiones, el caudal de permeado resultante y el factor de conversión f_R (η_{AP}, η_C).

Teniendo en cuenta la notación establecida se tiene que:

$$P_W^{OI} = P_W^{AP} + P_W^C = \frac{q_{v,A}^{AP} \cdot (P_A^{AP} - P_A^{BP})}{\eta_{AP}} + \frac{q_{v,A}^{IP} \cdot (P_A^{AP} - P_A^{PI})}{\eta_C}$$

Ec. 8

Apoyándonos en las dos primeras ecuaciones, se puede escribir la expresión anterior en función del caudal de agua producto y del factor de conversión, resultando [14]:

$$P_W^{OI} = P_W^{AP} + P_W^C = q_{v,P}^{OI} \cdot \left[\frac{(P_A^{AP} - P_A^{BP})}{\eta_{AP}} + \frac{(1 - f_r) \cdot (P_A^{AP} - P_A^{PI})}{f_r \cdot \eta_C} \right]$$

Ec. 9

Analizando estas dos expresiones, se puede llegar a la conclusión de que el gasto energético de un proceso de desalación depende de manera directa del caudal de permeado obtenido y del factor de conversión. También podemos destacar que los

rendimientos (η_{AP}, η_C) son constantes para un amplio rango de caudal de permeado [26],[14].

Además, es importante mencionar que el factor de conversión de una planta en la que se utilizan tecnología de membrana en configuración de arrollamiento en espiral debe estar en torno al 45%, tal y como podemos observar en la siguiente Figura.

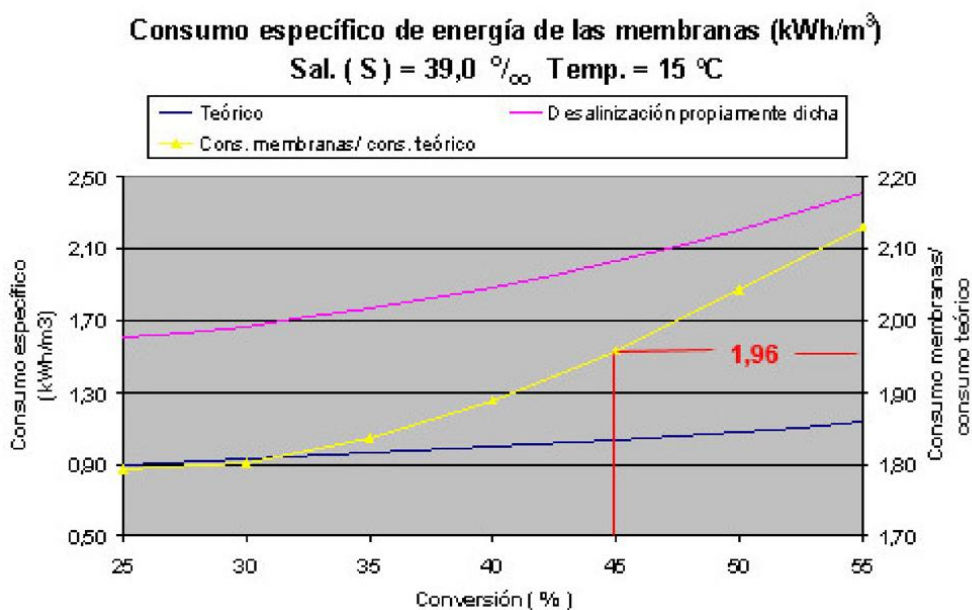


Figura 30: Consumo específico de energía de membrana. Fuente: [21].

Como podemos ver en esta gráfica desarrollada por Acciona, el consumo teórico óptimo de energía se da en el 45% del factor de conversión [27].

Como ejemplo práctico [21], en la siguiente Figura se representa el consumo energético en función del factor de conversión de una planta desaladora compuesta por un pretratamiento convencional con un gasto de $0,32 \text{Kwh}/\text{m}^3$ y con un rango de temperaturas que comprende el intervalo de $[15-35]^\circ$. En este caso dadas las características de la planta podemos comprobar como el factor de conversión óptimo se encuentra alrededor del 40%.

**Consumo específico total de energía - Sal. (S) = 39,0 ‰
Pretratamiento convencional con un grado de complejidad bajo**

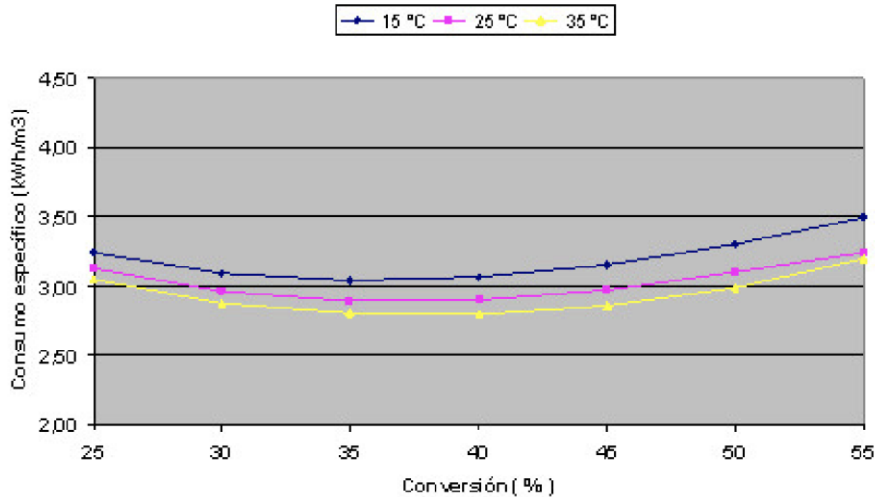


Figura 31: Consumo específico total de energía de una desaladora en función del factor de conversión. Fuente: Acciona.com

A continuación, se analizarán los consumos energéticos de una desaladora con unas características de agua captada dadas y una membrana comercial tipo 30HRLE 440i. Para ello es importante definir la unidad de consumo K [28]. Esta manera de representar el consumo de una planta desaladora se basa en el mismo principio que la potencia consumida total explicada anteriormente, fijando una presión de alimentación constante y un efecto de las variaciones de temperatura también constante. Se rige bajo la siguiente expresión.

$$K = q_{v,p}^{OI} + (q_{v,A}^{OI} - q_{v,p}^{OI}) \cdot \frac{\Delta P_{v,a}^{PI}}{\Delta P_{v,a}^{AP}}$$

Ec. 10

Una vez definido el parámetro de consumo K, se procede a analizar el consumo y el consumo energético específico a presiones de alimentación constantes y a 18° de temperatura en función del caudal de alimentación [22].

En la Figura 32, aparece representada la variación del parámetro K para 51, 56 y 59 bares de presión en función del caudal de alimentación:

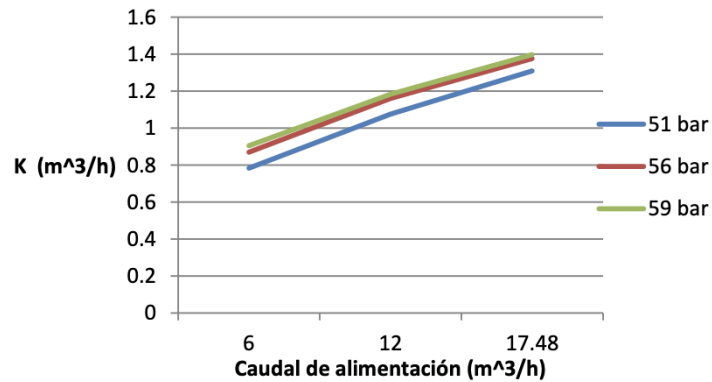


Figura 32: Variación de consumo para diferentes presiones. Fuente:[22].

Se puede apreciar claramente que el consumo aumenta con la presión, y lo hace de forma lineal con la presión de operación.

En la Figura 33, aparece representado el consumo específico de la planta para 51, 56 y 59 bares de presión en función del caudal de alimentación:

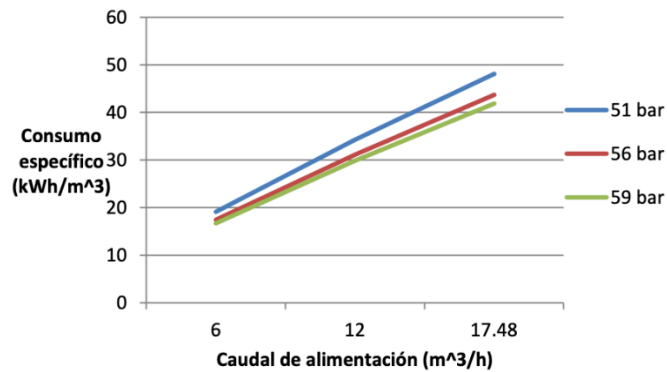


Figura 33: Variación del consumo específico para diferentes presiones. Fuente [22].

En este caso podemos comprobar que el consumo específico también crece de forma lineal conforme aumenta el caudal de alimentación. Analizando la expresión de K y

estas gráficas podemos demostrar la fuerte dependencia que tiene el consumo energético en función del caudal de permeado resultante [22].

2.5.1 EJEMPLO DE MODELADO DE CONSUMO ENERGÉTICO

Como es sabido, el elemento de la planta desaladora que más contribuye al gasto energético de la misma es la bomba de alta presión que introduce el agua en las cámaras osmóticas para obtener el permeado final. Por este motivo, en este apartado se va a representar un ejemplo real de una bomba hidráulica de alta presión con el fin de estudiar el consumo eléctrico de la misma en función del caudal de permeado resultante.

Para ello se ha seleccionado una bomba que comercializa uno de los fabricantes de bombas hidráulicas con más prestigio en el mercado, se trata de la bomba MSD-RO axially split multistage pump de SULZER. Esta familia de bombas de alta presión está diseñada para cubrir los requisitos necesarios de las plantas desaladoras. La bomba en cuestión aparece representada en la Figura34 y sus características nominales son [29]:



Características nominales:

- Capacidad: Hasta $1600 \frac{m^3}{h}$
- Heads: Hasta 730 m
- Presión max: 90 bar
- Temp: 60°C

Figura 34: Bomba SULZER de alta presión.

Con el fin de analizar la relación entre consumo energético y caudal permeado se va a utilizar el modelo de la curva que relaciona la potencia consumida (Kw) por una bomba

similar a la propuesta anteriormente con el caudal de producto final (m^3/h). Esta relación se muestra en la Figura 35 [29] [30].

Un aspecto a destacar es que con el propósito de evitar manipular un modelo extremadamente complejo y con demasiada carga matemática, se va a proponer una aproximación lineal por tramos. En esta aproximación vamos a acercarnos de la forma más fiel posible a la curva real medida de ensayos prácticos realizados por el fabricante.

A continuación, se representa la curva en la Figura 35:

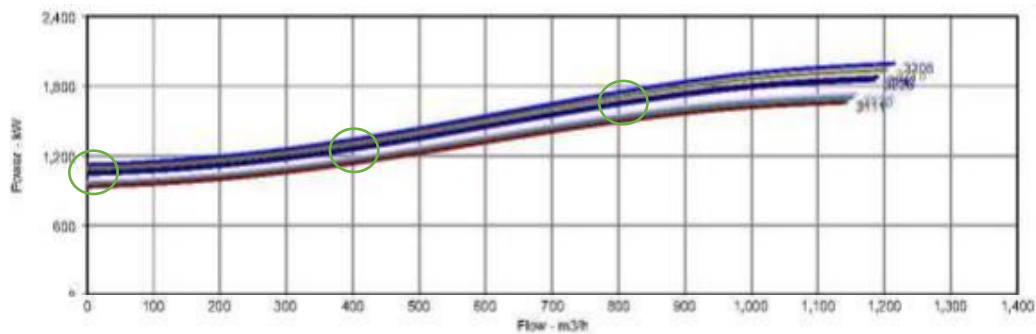


Figura 35: Gráfica Potencia consumida // Caudal permeado final. Fuente: [30] y SULZER.

2.5.2 REPRESENTACIÓN A TRAMOS DE LA BOMBA PARA CASO PRÁCTICO

Para representar el gasto energético de la bomba de una desaladora de forma lineal, es necesario expresarlo de la siguiente manera:

$$P_W^{OI} = c + m q_P^{OI}$$

Ec. 11

No obstante, como se va a realizar una aproximación lineal por tramos, se va a dividir la curva en tres tramos principales obteniendo una función a trozos basada en la función anterior.

Se ha decidido realizar los cortes de la función en los siguientes puntos marcados por círculos de color verde en la Figura 36:

- $q_P^{OI} = 0 \text{ m}^3/h$
- $q_P^{OI} = 400 \text{ m}^3/h$
- $q_P^{OI} = 800 \text{ m}^3/h$

De esta manera, aprovechando las curvas de la Figura 36 que muestran un mayor rendimiento se obtiene la siguiente función a trozos:

$$P_W^{OI} = \begin{cases} 1150 + \frac{10}{20} \cdot q_P^{OI}, & 0 < q_P^{OI} < 400 \\ 1200 + \frac{83}{80} \cdot (q_P^{OI} - 400), & 400 < q_P^{OI} < 800 \\ 1650 + \frac{11}{20} \cdot (q_P^{OI} - 800), & 800 < q_P^{OI} < 1200 \end{cases}$$

Ec. 12

Una vez se tiene definida la función que representa la aproximación lineal a trozos deseada, se puede esbozar la curva con la que vamos a trabajar. Esta curva queda definida en la Figura 36.

Como se puede comprobar, en el eje de ordenadas se mide el consumo que tiene la planta desaladora en (Kw), mientras que en el eje de abscisas se mide el caudal permeado en el proceso osmótico en (m^3/h).

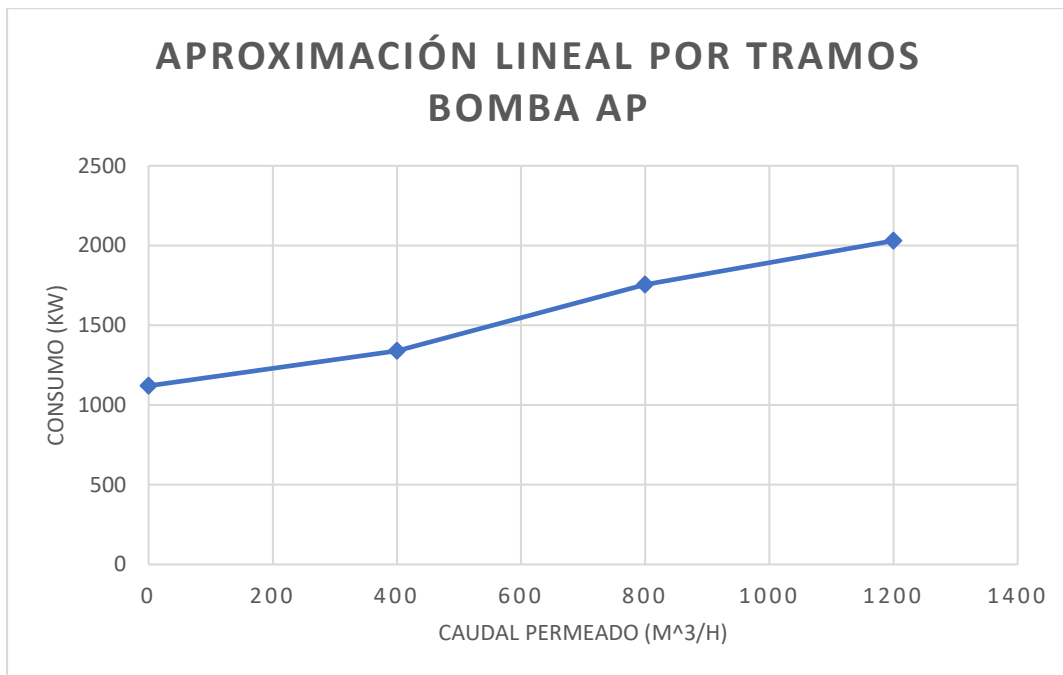


Figura 36: Aproximación lineal curva bomba SULZER . Fuente: Elaboración propia.

Este modelo lineal por tramos de una bomba de alta presión será el utilizado en el problema de unit commitment para simular el funcionamiento de la planta desaladora.

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

3.1 DESPACHO ECONÓMICO.

Para poder abordar el estudio del nexo agua-energía es necesario implantar un sistema de gestión de energía y producción que típicamente se implanta en forma de un despacho económico con restricciones.

La problemática de un despacho económico generalmente consiste en asignar la demanda total entre los distintos grupos generadores existentes con el objetivo de optimizar, y de esta manera reducir los costes económicos que surgen al satisfacer dicha demanda. Estas unidades de generación tienen distintos costes de producción en función de múltiples parámetros, es por este motivo que en muchas industrias se hace imprescindible contar con un sistema de gestión capaz de reducir estos gastos.

En este proyecto los costes de generación serán los costes energéticos que produzca la bomba de alta presión, mientras que la demanda será el flujo de permeado necesario para abastecer una demanda dada y cumplir con una serie de condiciones. Por este motivo, el despacho económico se formulará como un problema de optimización lineal por enteros (MILP), con el objetivo de minimizar los costes variables totales de una planta desaladora.

El despacho económico que se plantea, parte de un modelo lineal ya establecido en el estudio [30] el cuál será modificado para obtener un modelo lineal por tramos, con el fin de comparar los resultados obtenidos en ambos modelos y determinar cuál tiene un mayor impacto en la reducción de costes.

3.2 DESCRIPCIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO

En este apartado se va a explicar detalladamente los fundamentos matemáticos que gobiernan el despacho económico que plantea este proyecto y va a estar dividido en los siguientes subapartados.

- Función objetivo.
- Restricciones.
- Resolución del unit commitment.

3.2.1 FUNCIÓN OBJETIVO

La función objetivo, es por definición la ecuación que debe de ser optimizada una vez han sido especificadas las limitaciones y las variables del sistema. En este caso la función objetivo va a minimizar el coste variable de consumo eléctrico para un tiempo definido en el despacho económico.

La ecuación que rige la función objetivo es la siguiente:

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

Ec. 13

En esta función, los costes ($c_{g,h}$) están formados por los costes de arranque de cada grupo generador (start-up), los costes de parada de los mismos (shut-down) y por los costes variables totales del conjunto generador.

$$c_{g,h} = c_{g,h}^{start-up} + c_{g,h}^{shut-down} + c_{g,h}^{var}$$

Ec. 14

Del mismo modo, los costes variables se dividen en dos, costes fijos debidos al grupo generador g, y los correspondientes al coste variable de g. A su vez este coste variable se desglosa en parte lineal y cuadrática, todo ello respecto al grupo generador g.

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

Ec. 15

Finalmente, declaramos los costes debidos al arranque y a la parada del grupo generador g como una constante.

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

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

Ec. 16

3.2.2 RESTRICCIONES.

Este apartado tiene como objetivo definir las ecuaciones de restricción o constraint. Estas ecuaciones son las que definen el sistema y los elementos que configuran el despacho económico.

Entre las restricciones referidas al sistema se encuentran:

- Balance del consumo eléctrico para cada hora h.
- Balance de demanda de permeado para cada hora h.

Las restricciones relativas a los elementos del sistema son las siguientes:

- Límites de potencia activa de los grupos generadores g.

- Límites de rampa de los grupos generadores g .
- Decisiones de arranque y parada de los grupos generadores g .
- Límite superior e inferior de almacenamiento de agua en el depósito.
- Caudal de agua permeada por la planta.

3.2.2.1 BALANCE DE LA DEMANDA ELÉCTRICA

El balance de la demanda eléctrica para cada hora h se define como:

$$D_h^e = \sum_g P_{g,h}^{e,net} - p_{e,h}$$

Ec. 17

Con el objetivo de trabajar con una linealización por tramos a la hora de calcular la potencia eléctrica consumida en cada hora es necesario introducir las siguientes restricciones:

$$t_{k,h} \leq \delta_{k-1} - \delta_k$$

Ec. 18

$$\sum_k^{m-1} \delta_k = 1 \quad \sum_k^m t_k = 1$$

Ec. 19

Estas expresiones son las encargadas de preparar la ponderación del caudal para calcular la potencia eléctrica consumida en el tramo correspondiente. Se representa de la siguiente manera:

$$p_{e,h} = \sum_k^m p_{ek} \cdot t_{k,h}$$

Ec. 20

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. Es importante destacar que el grupo generador se considera conectado si opera por encima de su valor mínimo técnico P_g^{\min} .

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

Ec. 21

3.2.2.2 BALANCE DE LA DEMANDA DE AGUA

En el modelo del despacho económico se incluye un depósito de agua con el fin de aportar flexibilidad al sistema. Por este motivo, el agua demandada en cada hora h debe de ser cubierta conjuntamente por el depósito y por el permeado producido por la planta desaladora.

Con el fin de cumplir con esta restricción, es necesario definir la siguiente expresión:

$$N_h - N_{h-1} - q_{p,h}^{OI} = - D_h^{agua}$$

Ec. 22

Finalmente se define la ecuación que calcula el caudal permeado en el tramo correspondiente para la hora h .

$$q_h = \sum_k^m Q_k \cdot t_{k,h}$$

Ec. 23

3.2.2.3 BALANCE NETO CERO DE LA DEMANDA GESTIONABLE

La restricción de balance neto cero de la demanda gestionable se implanta debido a la necesidad de cumplir con el requisito de que la energía movida por la gestión de la demanda sea cero sobre un horizonte determinado.

$$\sum_{i \in IC^{D,dr}} (P_{dr,i}^{down} - P_{dr,i}^{up}) = 0$$

Ec. 24

3.2.2.4 LÍMITES DE POTENCIA ACTIVA

Las propiedades físicas de cada generador limitan la potencia activa que este es capaz de generar o consumir. En el modelo se implanta este límite para cada grupo generador en cada hora h de la siguiente manera:

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

Ec. 25

Del mismo modo, también es necesario limitar el aumento y la reducción de la potencia demandada de cada demanda gestionable dr en la hora h .

$$P_{dr}^{up,\min} \leq P_{dr,h}^{up} \leq P_{dr}^{up,\max} \quad \forall dr, h$$

$$P_{dr}^{down,\min} \leq P_{dr,h}^{down} \leq P_{dr}^{down,\max} \quad \forall dr, h$$

Ec. 26

3.2.2.5 LÍMITES DE RAMPA DE LOS GRUPOS GENERADORES

Es sabido que las unidades térmicas producen un intercambio de carga de manera gradual y transitoria, de manera que el aumento o la disminución de su generación no es instantánea. Este límite se conoce como límite de rampa de los grupos generadores y queda definido en la siguiente expresión.

$$-R_g^{down} \leq P_{g,h}^{e,net} - P_{g,h-1}^{e,net} \leq R_g^{up} \quad \forall g, h$$

Ec. 27

3.2.2.6 DECISIONES DE ARRANQUE Y PARADA

De manera similar a la restricción anterior, una vez se arranca una unidad térmica, no puede volver a apagarse hasta que esta no haya alcanzado una temperatura uniforme en

la turbina. Este proceso se repite para el caso contrario, en el que queremos iniciar la generación en una unidad que acaba de ser parada.

Este concepto busca controlar los gradientes térmicos de los materiales que componen el grupo de generadores con el fin de evitar la fatiga del mismo.

Las siguientes expresiones fuerzan a un grupo generador g a estar arrancado y funcionando durante un período de tiempo mínimo, y parado y desconectado durante de igual manera durante un periodo de tiempo mínimo.

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

Ec. 28

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

Ec. 29

La siguiente restricción se encarga de garantizar que sólo se produzca un arranque del generador g si se encontraba previamente desconectado.

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

Ec. 30

Por último, la ecuación x impide que haya una orden de arranque y de parada durante la misma hora h .

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

Ec. 31

3.2.2.7 RESTRICCIONES DE RESERVA

Las ecuaciones que describen las reservas de subida y bajada de las que disponen cada hora h los grupos generadores g , son las siguientes.

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

Ec. 32

La expresión x se encarga de garantizar que la reserva a subir disponible entre todos los generadores g menos el desconectado sea suficiente para abastecer la generación perdida en la hora h.

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

Ec. 33

Las ecuaciones x y x imponen que las reservas de subida y bajada disponibles en la hora h sean iguales o superiores a la máxima variación de la demanda prevista.

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

Ec. 34

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

Ec. 35

Por último, se define la reserva a bajar en cada hora h como una fracción de la reserva a subir.

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

Ec. 36

3.2.2.8 RESTRICCIONES DE CAUDAL PERMEADO

Es necesario limitar el caudal permeado por hora producido en función de las características de la planta.

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

Ec. 37

3.2.2.9 RESTRICCIONES DE CAPACIDAD DEL EMBALSE

Como se ha mencionado anteriormente, el agua permeada se almacena en un embalse para poder ser suministrada más adelante y aporta flexibilidad al sistema. Esta ecuación define los límites del embalse.

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

Ec. 38

3.3 RESOLUCIÓN UNIT COMMITMENT

En esta sección se van a describir las técnicas empleadas en el modelo matemático para la resolución del UC (unit commitment). Las técnicas existentes en UC son:

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

El despacho económico que propone este proyecto está basado en la programación lineal entera mixta (MILP), ya que hoy en día el acople y el desacople de los grupos generadores térmicos se representan con variables binarias. A continuación, se explica cómo funciona este tipo de programación implantado en Matlab.

3.3.1 RESOLUCIÓN MILP EN MATLAB

Para la resolución del modelo, se va a emplear Matlab. En este entorno es necesario definir el problema de unit commitment de forma matricial como se puede ver en la Figura 37.

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

Figura 37: MILP en Matlab. Fuente: Matlab help.

Este software define los elementos representados en la Figura 37 de la siguiente manera:

- $x(\text{intcon})$ es un vector que indica las posiciones del vector de variables de decisión que son enteros.
- A y Aeq son las matrices de las restricciones de desigualdad e igualdad, respectivamente.
- b y beq 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 que utiliza este entorno para resolver el modelo en Matlab es el representado en la Figura 38.

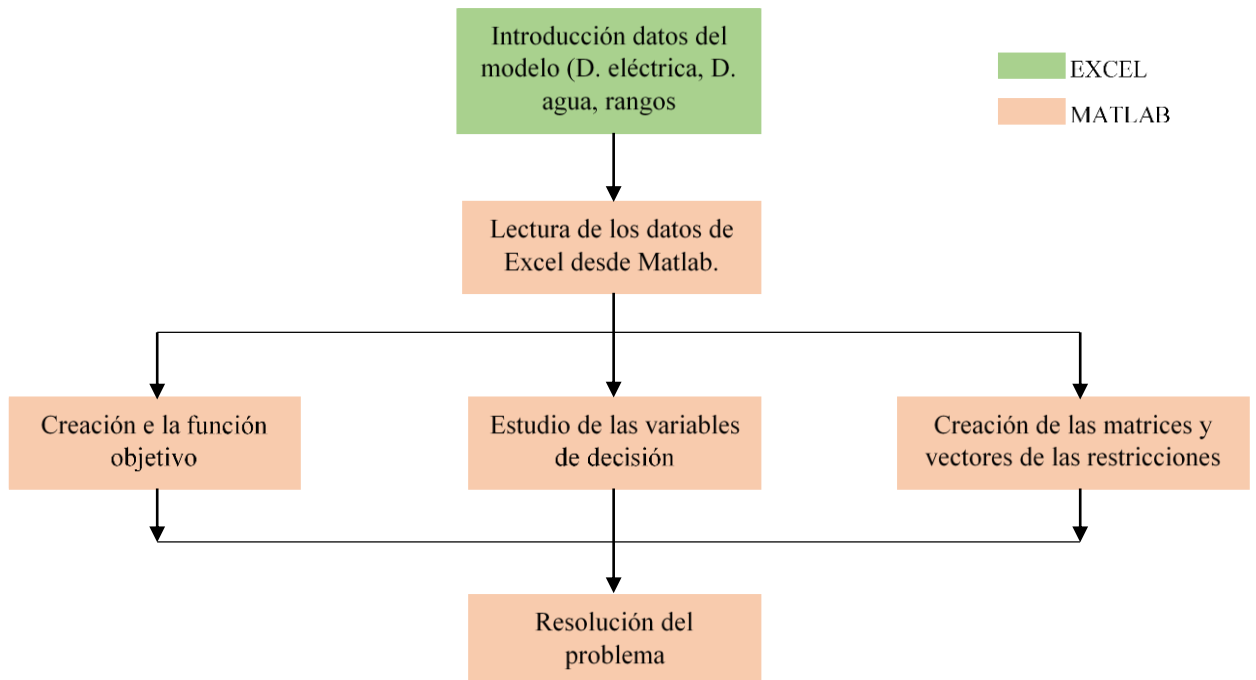


Figura 38: Esquema de resolución del problema UC. Fuente [30]

4. Simulaciones

En esta sección se van a estudiar diferentes simulaciones con el fin de analizar el impacto que tiene incluir una linealización por tramos en el despacho económico. Para ello se van a realizar 3 estudios basados en la demanda de agua desalada de la isla de La Palma en un intervalo de tiempo determinado.

En el primer estudio se analizará la curva de la bomba representada en el apartado 2.4 linealizada en 3 tramos. Este análisis será comparado con el segundo estudio donde se utilizará igualmente la misma bomba, pero esta vez con una ecuación lineal, es decir, con un solo tramo. Finalmente se repetirá el primer análisis, pero utilizando una curva menos lineal de la bomba.

4.1 Modelo 3 Tramos

PRESENTACIÓN

Para este primer análisis se va a utilizar el siguiente modelo de la bomba de alta presión:

$$P_W^{OI} = \begin{cases} 1150 + \frac{11}{20} \cdot q_P^{OI}, & 0 < q_P^{OI} < 400 \\ 1340 + \frac{83}{80} \cdot (q_P^{OI} - 400), & 400 < q_P^{OI} < 800 \\ 1755 + \frac{11}{20} \cdot (q_P^{OI} - 800), & 800 < q_P^{OI} < 1200 \end{cases}$$

Ec. 39

Con el fin de ser capaces de abastecer la demanda de permeado dada en la isla de La Palma, se hace necesario disponer de dos bombas como la anterior en paralelo ya que una sola no tiene la potencia suficiente para bombear el caudal necesario.

Por lo tanto, los tramos escogidos en función de la potencia eléctrica consumida y el caudal permeado por la planta son los siguientes:

pe,k	Qk
1150	0
2400	800
3300	1600
3600	2400

Tabla 2: Función de tramos simulada

Como podemos ver al principio de la curva solo hay una de las dos bombas operativas, el motivo es evitar incurrir en unos gastos fijos demasiado elevados al arrancar el sistema de permeado.

En cuanto a nuestra planta, consta de 11 grupos generadores con unas características nominales que aparecen representadas en la Tabla 3. El despacho económico decidirá cuales utilizar en cada momento, cuando arrancarlos y cuando pararlos con el fin de optimizar los costes eléctricos que aparecen también definidos en esta Tabla.

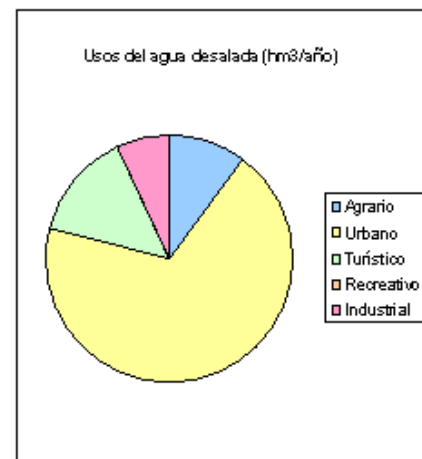
	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6	P_7	P_8	P_9	P_{10}	P_{11}
P_g^{max} (kW)	3800	3800	3800	4300	6700	6700	11500	11200	11500	11500	21000
P_0	2400	2400	2400	0	4800	0	10000	0	0	6600	0
P_g^{min} (kW)	2400	2400	2400	2800	3300	3300	6600	6600	6600	6600	4900
R_g^{up} (kW)	3800	3800	3800	4300	6700	6700	11500	11200	11500	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 3: Características y costes referidos a los grupos generadores.

Como se ha mencionado anteriormente, con el objetivo de estudiar un caso real para conocer los beneficios del unit commitment y en concreto la linealización por tramos del mismo se ha decidió utilizar la demanda de agua de la isla de La Palma en un intervalo de tiempo determinado de 72 horas de duración.

La desalación en el archipiélago canario ha tomado una gran importancia con el paso de

Usos Principales	Usos del agua desalada (hm ³ /año)
Agrario	7.3
Urbano	48.6
Turístico	10
Recreativo	0
Industrial	5



los años debido a los picos de demanda influenciados por los turistas que acuden a las islas en temporada alta. Además, la desalación de agua en La Palma está enfocada

Figura 39: Uso del agua desalada Canarias 2006

principalmente al uso urbano de la misma, como se puede apreciar en la Figura 39 donde se representan los datos tomados en el curso 2006.

Por lo tanto, para representar el modelo nexus agua-energía utilizado se representan los datos de la demanda de agua utilizada en el modelo y su demanda eléctrica en las siguientes Figuras.

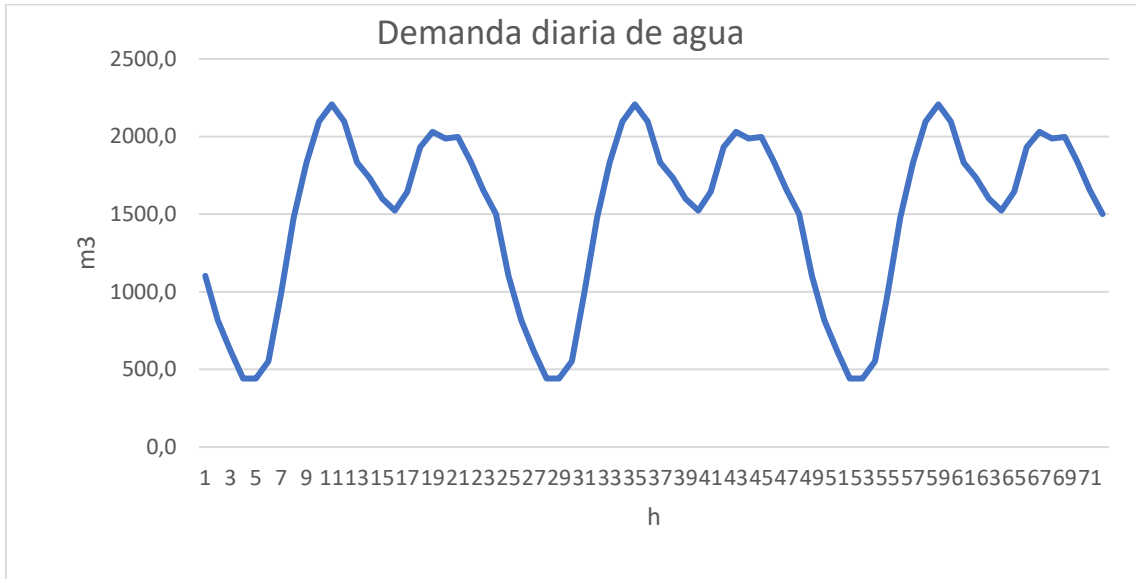


Figura 40: Demanda diaria de agua. Fuente: Elaboración propia.

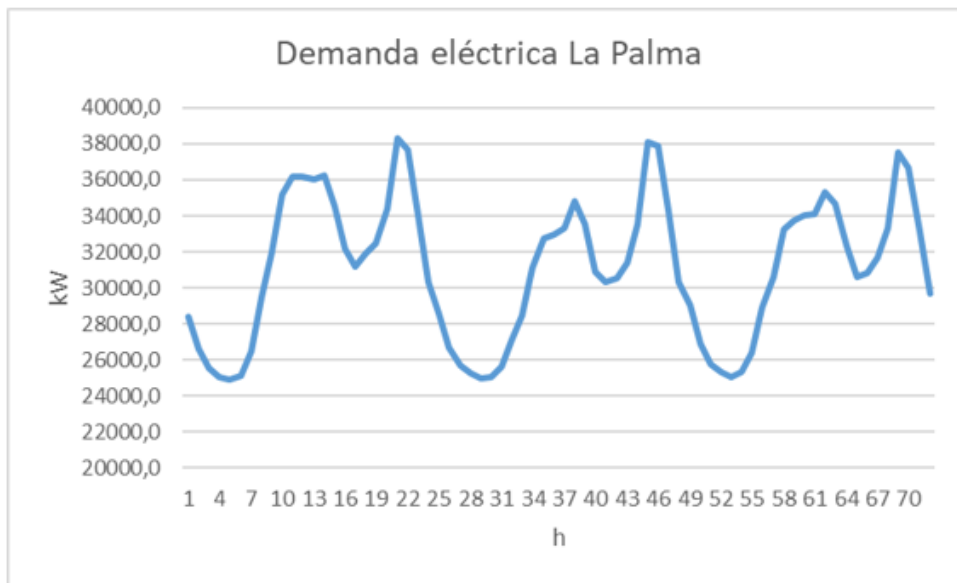


Figura 41: Demanda eléctrica de La Palma. Fuente: Elaboración propia.

	electrical demand (kWe)	net water demand (m3)			
h001	28360,0	1103,8	h035	32740,0	2207,6
h002	26630,0	816,8	h036	32940,0	2097,2
h003	25550,0	618,1	h037	33320,0	1832,3
h004	25020,0	441,5	h038	34840,0	1733,0
h005	24870,0	441,5	h039	33530,0	1600,5
h006	25080,0	551,9	h040	30910,0	1523,2
h007	26480,0	993,4	h041	30330,0	1644,6
h008	29500,0	1479,1	h042	30570,0	1931,6
h009	31940,0	1832,3	h043	31380,0	2031,0
h010	35200,0	2097,2	h044	33550,0	1986,8
h011	36200,0	2207,6	h045	38100,0	1997,9
h012	36150,0	2097,2	h046	37920,0	1838,9
h013	36030,0	1832,3	h047	34330,0	1655,7
h014	36240,0	1733,0	h048	30290,0	1501,2
h015	34550,0	1600,5	h049	29050,0	1103,8
h016	32150,0	1523,2	h050	26880,0	816,8
h017	31180,0	1644,6	h051	25720,0	618,1
h018	31890,0	1931,6	h052	25360,0	441,5
h019	32440,0	2031,0	h053	25050,0	441,5
h020	34390,0	1986,8	h054	25300,0	551,9
h021	38320,0	1997,9	h055	26410,0	993,4
h022	37690,0	1838,9	h056	28870,0	1479,1
h023	34050,0	1655,7	h057	30610,0	1832,3
h024	30330,0	1501,2	h058	33280,0	2097,2
h025	28600,0	1103,8	h059	33750,0	2207,6
h026	26650,0	816,8	h060	34050,0	2097,2
h027	25680,0	618,1	h061	34070,0	1832,3
h028	25220,0	441,5	h062	35300,0	1733,0
h029	24950,0	441,5	h063	34710,0	1600,5
h030	25040,0	551,9	h064	32310,0	1523,2
h031	25610,0	993,4	h065	30640,0	1644,6
h032	27130,0	1479,1	h066	30850,0	1931,6
h033	28490,0	1832,3	h067	31650,0	2031,0
h034	31100,0	2097,2	h068	33290,0	1986,8
h035	32740,0	2207,6	h069	37520,0	1997,9
			h070	36660,0	1838,9
			h071	33100,0	1655,7

Tabla 4: Demanda eléctrica y demanda de agua en la isla de La Palma en 72 horas.

Como se puede observar en las Figuras 40 y 41 los perfiles de demanda son prácticamente periódicos a lo largo de los días aunque se puede apreciar alguna ligera variación ya que el consumo de agua y energía no es uniforme.

Finalmente, se representan los datos de la planta desaladora incluyendo la definición del depósito de agua en la Tabla 5.

	Desaladora
$N_{max} (m^3)$	4500
$N_0 (m^3)$	2600
$N_{min} (m^3)$	700
$q_{p,max}^{01} (m^3/h)$	2000
$q_{p,min}^{01} (m^3/h)$	0

Tabla 5: Datos de la planta desaladora en la simulación 1.

El depósito tiene una capacidad de 4500 m^3 y el caudal permeado máximo es de 2000 m^3 . El depósito parte con un nivel inicial de 2600 m^3 , este es un dato importante ya que va a determinar como se va a desarrollar el programa al principio del primer día como veremos más adelante.

RESULTADOS

Una vez expuestos los datos de funcionamiento del sistema introducidos al problema de unit commitment se analizan los resultados arrojados por el modelo matemático.

En la Figura 42.a se representa la demanda eléctrica dada en la planta para cada hora, donde además se diferencia entre demanda eléctrica, y demanda eléctrica neta. La demanda eléctrica neta es la suma entre la demanda eléctrica inicial y el consumo energético de la desaladora en cada hora. Además, en la Figura x.b se representan los grupos generadores que intervienen en el proceso energético.

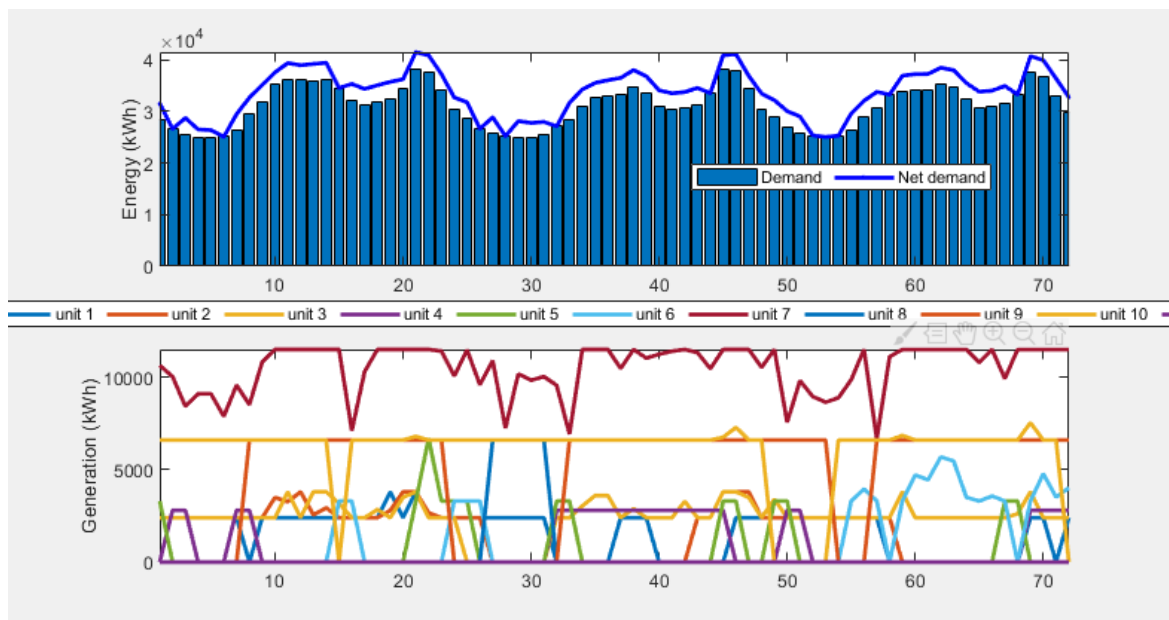


Figura 42: fig 42.a: Demanda eléctrica y demanda eléctrica neta // fig 42.b: Generación por grupos generadores.
Fuente: Elaboración propia

Como se ha mencionado anteriormente en la Figura 42.a la diferencia entre demanda y demanda neta es la potencia eléctrica que consume la desaladora en cada hora. En las horas donde se presentan valles de demanda se puede ver como la demanda y la demanda neta coinciden ya que para esa hora el caudal permeado por la desaladora es $0m^3$, como ejemplo en el que se pueda apreciar este caso tenemos en la madrugada del primer día las 02.00 y las 06.00, también por la tarde podemos ver un valle a las 15.00. Del mismo modo, podemos ver como en las horas en las que el perfil de demanda exige más producción de permeado como la línea de demanda neta se separa más de las barras de demanda eléctrica.

Por otro lado, en la Figura 42.b están representados los comportamientos de los once grupos generadores durante los tres días de simulación. Las decisiones de funcionamiento de estos grupos vienen dictadas por el programa, ya que este busca la forma más óptima de gestionarlos para optimizar los costes de energía, por este motivo el sistema intenta operar con el menor número de generadores posible haciendo que los que estén operativos trabajen a su máximo rendimiento.

En la Figura 42.b se puede apreciar como el generador 7 que es el más económico está operativo siempre aportando su potencia máxima o guardándose reserva a subir, del mismo modo el generador 10 opera a máxima potencia cuando está conectado al sistema, aunque hay momentos como en la hora 15 que se desacopla del sistema debido a su elevado coste fijo.

Es cierto que hay horas típicamente de madrugada en las que existen generadores consumiendo su mínimo teórico, esto se debe a que el sistema entiende que es mejor mantenerlos trabajando que apagarlos y volver a encenderlos más adelante debido a los costes de arranque que esta operación conlleva.

La Figura 43.a indica que grupos generadores están conectados en cada hora, mientras que las Figuras 43.b y 43.c representan los acoples y desacoples del sistema de cada grupo generador en cada hora.

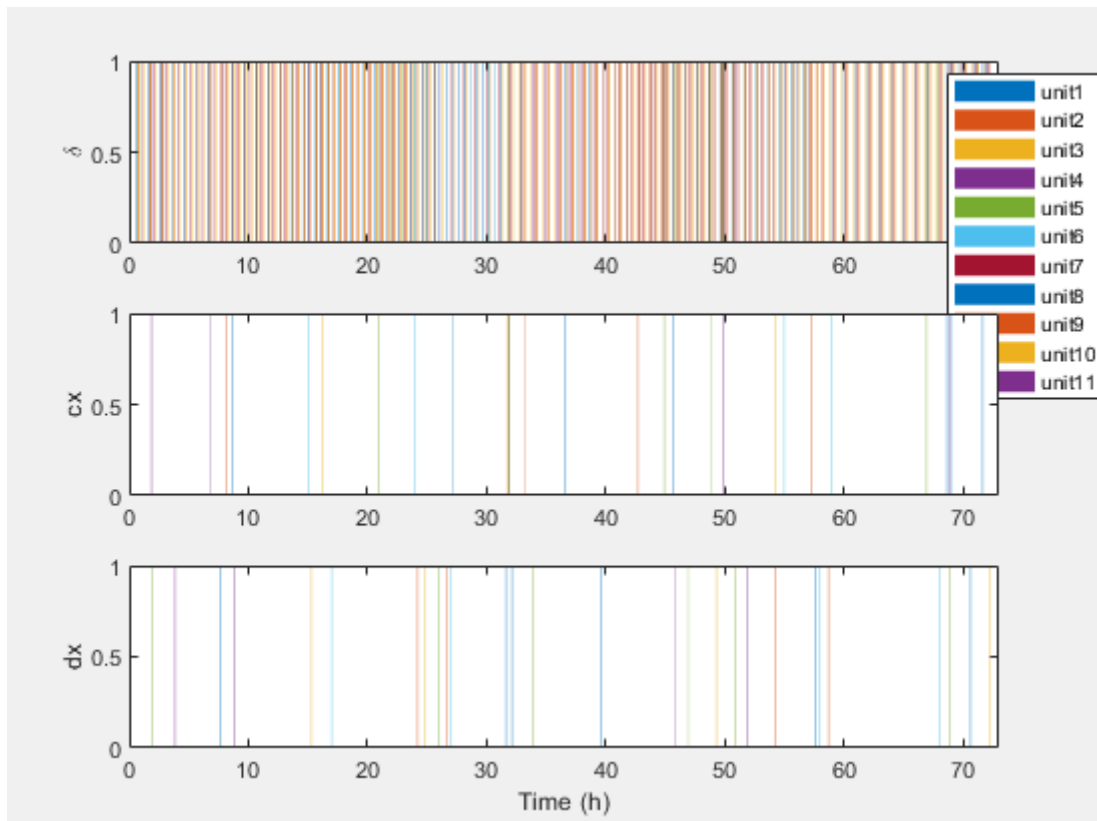


Figura 43: fig43.a: Grupos generadores funcionando cada hora h // fig.b: Acople al sistema de grupo generador. //fig.c: Desacople del sistema de grupo generador. Fuente: Elaboración propia.

El acople y desacople de grupos generadores es un factor muy influyente en el coste total de operación del sistema, ya que estos tienden a tener un coste de arranque elevado y unos costes fijos de operación considerables.

Como podemos observar en la Figura 43.b y 43.c el desacople de grupos se da normalmente en las horas de la madrugada cuando la demanda de agua es menor y en consecuencia existen más grupos generadores operando en su mínimo teórico. Por otro lado, el acople de estos grupos generadores se da típicamente en las horas donde se necesita reserva a subir o donde la demanda es mayor.

En este caso de estudio, el programa ha determinado que se van a producir exactamente 26 arranques de grupos generadores a lo largo de las 72 horas que dura esta simulación. Siendo este un dato relevante a la hora de calcular el coste de operación final.

A continuación, la Figura 44.a representa en rojo la curva de demanda de agua en cada hora y en azul el caudal de permeado que genera la planta desaladora.

La Figura 44.b indica el consumo eléctrico en Kw para cada hora que se da en la planta debido al proceso de desalación.

Finalmente, la Figura 44.c representa el nivel de agua que hay en el depósito en cada hora. Como se ha comentado anteriormente este depósito es el encargado de flexibilizar el consumo eléctrico de la planta haciendo posible aprovechar las horas valle para llenarlo.

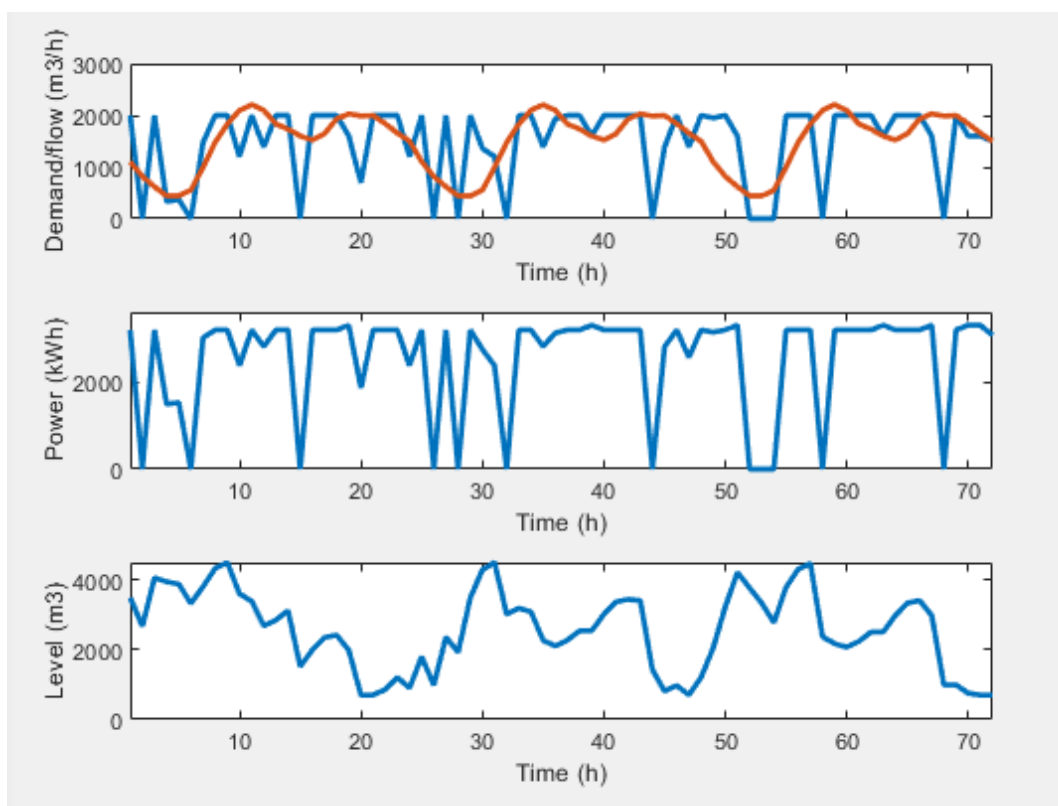


Figura 44: fig44.a: Demanda y caudal permeado de agua en cada hora h. // fig44.b Consumo eléctrico cada hora h. // fig44.c: Nivel del depósito en cada hora h. Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar, la demanda eléctrica presenta valles en las horas de madrugada de cada uno de los tres días. En el primer día desde las 00.00 hasta las 08.00 se puede apreciar como la demanda de agua es considerablemente menor que en el resto del día. Por este motivo en las horas de madrugada se aprovecha para llenar el depósito de agua con un coste más barato (como se puede ver en la Figura x.c) y para reducir el consumo eléctrico apagando en ciertos momentos la planta desaladora. De esta forma el programa consigue reducir el coste final del proceso de desalación.

Durante la madrugada del día uno se desconecta la planta a las 02.00 y a las 06.00 como habíamos visto en la Figura 42.a. Entre medias de estas dos horas se aprovecha para llenar el depósito. A las 08.00 se alcanza el nivel máximo del depósito de $4500 m^3$. De aquí en adelante a lo largo del día se aprovechará este nivel de agua para ahorrar energía en periodos de alta demanda.

A las 08.00 se supera la demanda de agua a la generación de permeado tomando los valores desde $1479 m^3$ hasta $2000 m^3$ donde llega al valor máximo de generación posible al final de la hora. En esta hora se han consumido 3192 Kwh en la planta desaladora. Desde este momento hasta el final del día el programa busca un equilibrio entre la demanda de agua, la generación de permeado y el aprovechamiento del depósito para lograr la máxima eficiencia energética teniendo en cuenta los costes de consumo eléctrico en cada momento. Un buen indicador de este hecho es que para el final del día en la hora 24, el nivel del depósito ha descendido considerablemente en comparación a el nivel que había mantenido durante las horas de la tarde.

Es importante destacar que en la hora 11 se alcanza el máximo de demanda de agua, siendo esta de $2208 m^3/h$. En este momento como el caudal de permeado máximo por la desaladora es de $2000 m^3/h$ es necesario que el depósito pueda aportar la cantidad de flujo de agua necesaria para poder cubrir la demanda en ese momento. Este fenómeno ocurre siempre que la demanda de agua es superior a el caudal de permeado máximo definido para la planta.

Durante los próximos dos días simulados los perfiles de las gráficas son muy similares entre sí, donde las pequeñas variaciones que se dan de un día a otro se deben a las fluctuaciones de costes de generación eléctrica. La diferencia principal en la gestión de agua permeada entre el día 1 y los días dos y tres se da en la madrugada, ya que el primer día partimos con un nivel inicial de agua en el depósito de $2600 m^3$ mientras que en los días dos y tres el depósito parte con un nivel de agua menor debido a las decisiones del problema de unit commitment. En consecuencia, durante la madrugada la planta deberá consumir más energía en permear el caudal suficiente para llenarlo.

Otro aspecto a destacar acerca del funcionamiento de la planta, es que esta no opera en valores intermedios de caudal permeado, es decir, el sistema intenta o bien producir el máximo posible, o estar apagado. Esto es debido a que el hecho de desalar un caudal mínimo de agua implica unos costes fijos elevados que el programa de unit commitment intenta evitar.

Como se ha mencionado anteriormente, en la Figura 43.c se puede apreciar como en las horas que se desconecta la planta, se desconectan los grupos generadores más caros. El programa opera de la forma más económica posible pero siempre cumpliendo la restricción de la reserva a subir y a bajar. Para ello siempre debe tener grupos generadores operativos con una reserva a subir suficiente como para cubrir la máxima demanda eléctrica posible.

Para concluir, de los resultados obtenidos del problema de unit commitment podemos sacar las siguientes conclusiones:

- El sistema busca que la producción de demanda de agua máxima se de en las horas donde la demanda eléctrica es más baja (en las horas de madrugada), mientras que en las horas del día donde la demanda eléctrica toma valores elevados se pretende que la producción de permeado sea nula o tome unos valores mínimos con el objetivo de cumplir con todas las restricciones del sistema.

- Las horas donde el gasto económico de operación es más barato se dan en las últimas horas del día, donde se tiene que vaciar el depósito de agua para aprovechar de una manera óptima el gasto energético que se ha invertido anteriormente en llenarlo con el objetivo de abaratar costes.
- El depósito se ha llenado en las horas donde la demanda eléctrica es menor de manera que al llegar a las horas donde existe una demanda eléctrica elevada no haga falta generar caudal de permeado. Una vez que el depósito está próximo a alcanzar sus valores mínimos se empieza a llenar, aunque la demanda eléctrica siga en niveles elevados ya que el sistema debe de cubrir la demanda y no le queda otra que incrementar la producción de agua durante el resto de las horas.

Después de todo este proceso se alcanza un coste de operación menor que si la desaladora trabajase permeando un caudal medio durante todas las horas del día, de esta forma se optimizan los gastos de producción.

Finalmente, el coste total de operación del sistema eléctrico queda en 229. 485,07€

4.2 Modelo lineal

PRESENTACIÓN

En este caso de estudio, se va a analizar la misma demanda eléctrica y de agua que en el caso anterior. Del mismo modo se plantea un sistema con dos bombas de alta presión en paralelo con el objetivo de cubrir la demanda de agua que se le exige a la planta.

La diferencia con la primera simulación es que esta vez vamos a utilizar una aproximación lineal de la bomba, es decir, en vez de tener cuatro tramos vamos a utilizar un solo tramo que se rige por la siguiente ecuación:

$$P_w^{OI} = 1150 + 1,033333 \cdot q_p^{OI}$$

Ec. 40

De este modo el sistema lineal que representa el funcionamiento de ambas bombas en paralelo se incluye en el modelo como una linealización en la que hay un solo tramo, tal y como se muestra en la Tabla 6.

pe,k	Qk
1150	0
3600	2400

Tabla 6: Modelo de sistema lineal

La función de la demanda de agua de la planta desaladora aparece representada en la Figura 40 de la simulación anterior.

Del mismo modo, la demanda eléctrica de La Palma en los tres días de estudio también se encuentra representada en la simulación anterior en la Figura 41.

Por otra parte, los parámetros asignados a la planta desaladora son los que se recogen en la siguiente tabla:

	Desaladora
$N_{max} (m^3)$	4500
$N_0 (m^3)$	2600
$N_{min} (m^3)$	700
$q_{p,max}^{OI} (m^3/h)$	2000
$q_{p,min}^{OI} (m^3/h)$	0
k_1	1150
k_2	1,0333

Tabla 7: Parámetros desaladora simulación 2.

Finalmente, las características de consumo y costes referentes a los once grupos generadores disponibles para la planta son los indicados en la Tabla 3 representada en el primer caso de estudio.

RESULTADOS

Una vez definidos los datos de entrada necesarios para la resolución del problema de unit commitment, se procede a simular el despacho económico.

Empezamos analizando la relación de la demanda eléctrica con la demanda eléctrica neta, para ello nos fijamos en la Figura x.a donde en primera instancia podemos apreciar que la curva de la demanda eléctrica neta mantiene el mismo valor medio que en el primer caso de estudio, aunque se pueden apreciar cambios en la forma de la misma, ya que las decisiones que ha tomado el programa a la hora de optimizar el coste de operación son distintas para cada simulación. Igual que en el caso de estudio anterior se puede apreciar cómo en las horas de madrugada existen horas en las que la planta desaladora esta apagada y como en las horas de alta demanda la curva de demanda eléctrica neta se separa de la función de demanda eléctrica.

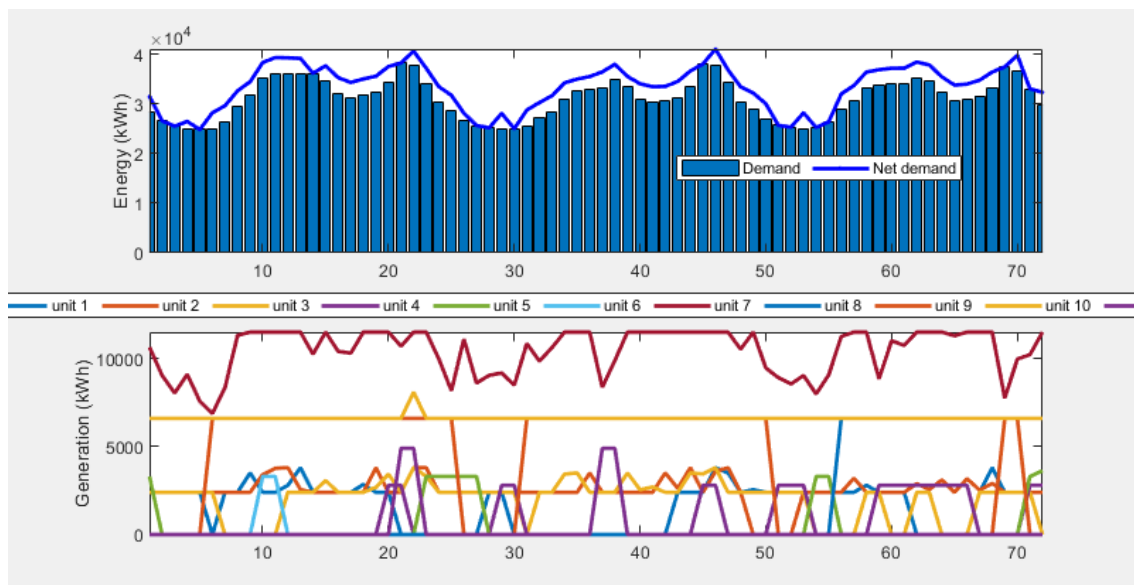


Figura 45: fig 45.a: Demanda eléctrica y demanda eléctrica neta // fig 42.b: Generación por grupos generadores.
Fuente: Elaboración propia

En cuanto a la administración de los grupos generadores se puede decir que el principio de comportamiento es similar al del primer caso. El generador 7 destaca por estar

operativo durante todo el proceso trabajando a máxima potencia o guardando reserva a subir para el sistema, mientras que las unidades 2 y 3 tienen un comportamiento muy similar operando durante la mayoría del tiempo en su máximo rendimiento y acoplándose y desacoplándose según las decisiones del sistema. El resto de generadores se encargan de rellenar los picos de demanda y de cubrir la reserva a subir necesaria en cada momento.

En la Figura 46 aparecen representados los grupos generadores que están funcionando en cada hora y cuando se acoplan y se desacoplan del sistema. Al igual que en el primer caso de estudio es importante analizar las decisiones del sistema en cuanto al arranque de los grupos generadores ya que tienen un coste relevante en el total de los gastos de operación del sistema.

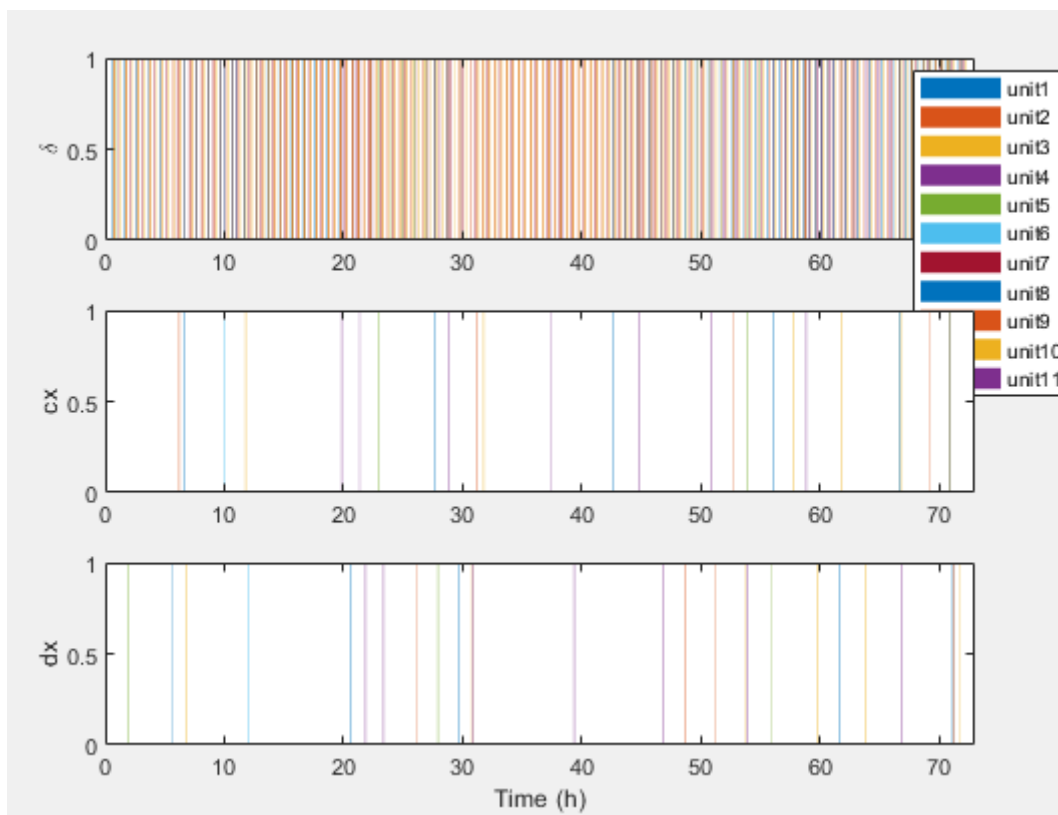


Figura 46: fig46.a: Grupos generadores funcionando cada hora h // fig.b: Acople al sistema de grupo generador. //fig.c: Desacople del sistema de grupo generador. Fuente: Elaboración propia.

En comparación con el primer caso de estudio se puede ver como se producen un número muy similar de arranques y desacoples de los grupos generadores del sistema, por eso la variación de gastos de operación de un modelo respecto al otro no va a depender en gran medida del arranque y el desacople de los grupos generadores.

No obstante, se puede apreciar como al igual que antes los desacoples se producen para horas con una demanda eléctrica baja al contrario que los arranques. Este fenómeno tiene sentido ya que en las horas con una alta demanda eléctrica se necesita más capacidad de generación además de tener disponible una reserva mínima a subir.

También se puede apreciar como el sistema intenta evitar el desacople de las unidades cuyo coste de arranque son más caros aprovechándolos normalmente para cubrir reserva y generar energía.

A continuación, se adjuntan las gráficas que representan la demanda de agua, la potencia eléctrica consumida por hora, el caudal de permeado por hora y el nivel del depósito del tanque de agua para este caso de estudio en la Figura 47.

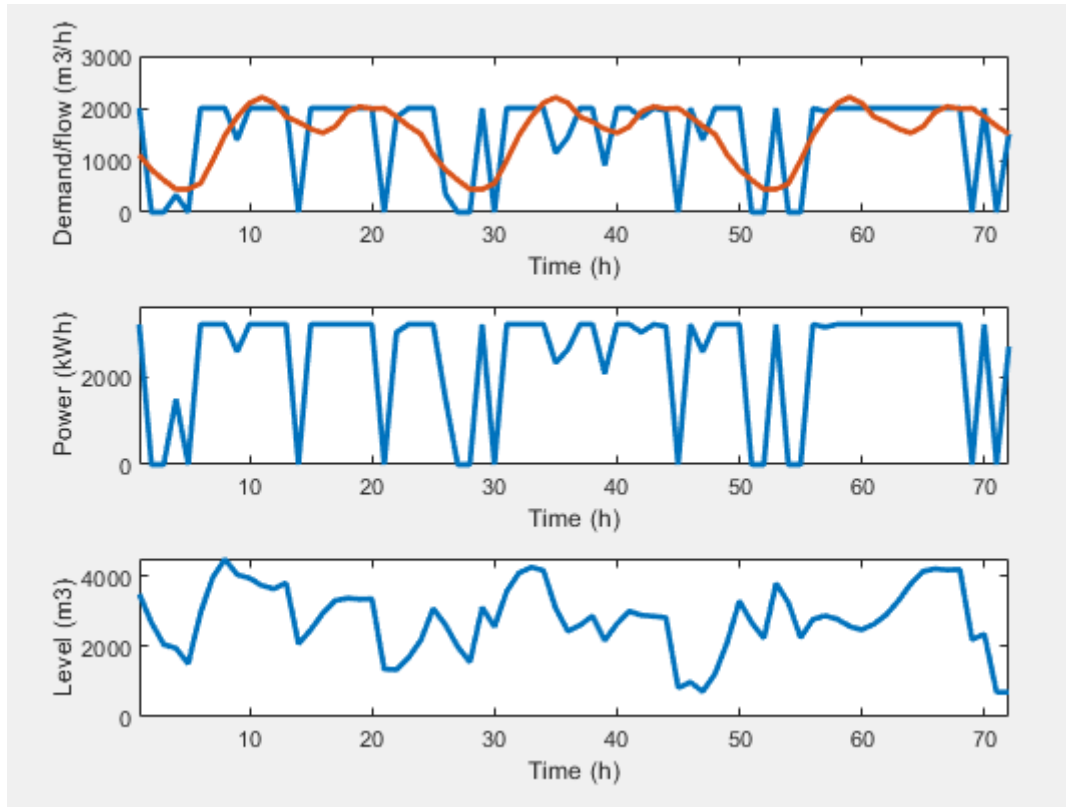


Figura 47: fig47.a: Demanda y caudal permeado de agua en cada hora h. // fig47.b Consumo eléctrico cada hora h. // fig47.c: Nivel del depósito en cada hora h. Fuente: Elaboración propia.

Al igual que en el primer caso de estudio, la solución del unit commitment se rige por el mismo principio, intentar desconectar la planta para reducir los gastos energéticos o tratar de operar a la máxima capacidad posible evitando caer en los costes fijos de generación. Esto se puede observar en la Figura 47.b donde el consumo eléctrico es 0 o está cerca de su máximo.

En referencia a la tendencia del sistema de operar en sus valores límite, observando la función de potencia eléctrica consumida por la planta desaladora podemos determinar que la planta cumple este principio para 61 de las 72 horas que han sido estudiadas.

Por otro lado, en comparación con el primer caso de estudio se puede apreciar que esta vez hay más picos en el consumo eléctrico, es decir, la planta deja de funcionar más veces. Exactamente 15 veces frente a las 14 del caso anterior durante las 72 horas de

simulación. No obstante, los resultados arrojados en el primer caso de estudio muestran menos horas de operación en tramos intermedios elevados que esta simulación.

En cuanto a la función de caudal permeado por la planta desaladora para cada hora, destaca la existencia de horas valle en las que la demanda de agua es baja. Del mismo modo que en el primer caso de estudio, las horas donde se producen estos valles son en las horas de la madrugada donde la demanda de agua en la isla es menor que durante el resto del día.

Como se puede observar en la Figura 47.a, en la madrugada del primer día hay tres horas donde la desaladora está desconectada y por lo tanto no hay caudal de permeado, esto es debido a que la demanda de agua es muy pequeña y el depósito estaba inicialmente cargado a $2600 m^3$ por lo que se tarda poco en llenarlo.

Durante el resto del día hasta las 20.00 la planta opera permeando en su máximo caudal con dos excepciones; La primera se da a las 09.00 de la mañana donde el depósito está lleno y la desaladora solo se encarga de cubrir la demanda, mientras que la segunda excepción se da a las 14.00 donde la demanda es cubierta exclusivamente por el depósito. En las últimas horas del día uno vuelve a haber una hora en la que se desconecta la desaladora.

Al igual que en el primer caso de estudio, se puede observar que el sistema trata de recargar el depósito en las horas de demanda baja para aprovechar el agua a lo largo del día y fundamentalmente en las horas de la noche. Podemos observar como el sistema trata de cargar el depósito de madrugada, utilizarlo para cubrir la demanda durante el día y vaciarlo en las últimas horas de la noche antes de las 00.00 del día siguiente.

No obstante, en el primer día el sistema ha determinado que no es necesario vaciar el depósito completamente al final del primer día, aunque sí que lo hace para el segundo y el tercer día donde podemos comprobar como su nivel de agua a las 00.00 es de $700m^3$, es decir, el mínimo permitido por las restricciones del modelo.

En resumen, los datos arrojados por la segunda simulación son muy similares a los obtenidos en el primer caso de estudio siendo la comparación entre las correspondientes demandas eléctricas netas la más representativa a la hora de calcular la diferencia de gasto de operación entre un modelo y otro.

Finalmente, para el modelo lineal obtenemos un coste final de operación del sistema de 230.263,17€ frente a los 229.485,07€ obtenidos del modelo linealizado por tres tramos.

La Figura 48 representa la comparación de los dos modelos estudiados hasta el momento siendo la curva naranja la linealización por tres tramos y la azul el modelo lineal estudiado en el segundo caso de estudio.

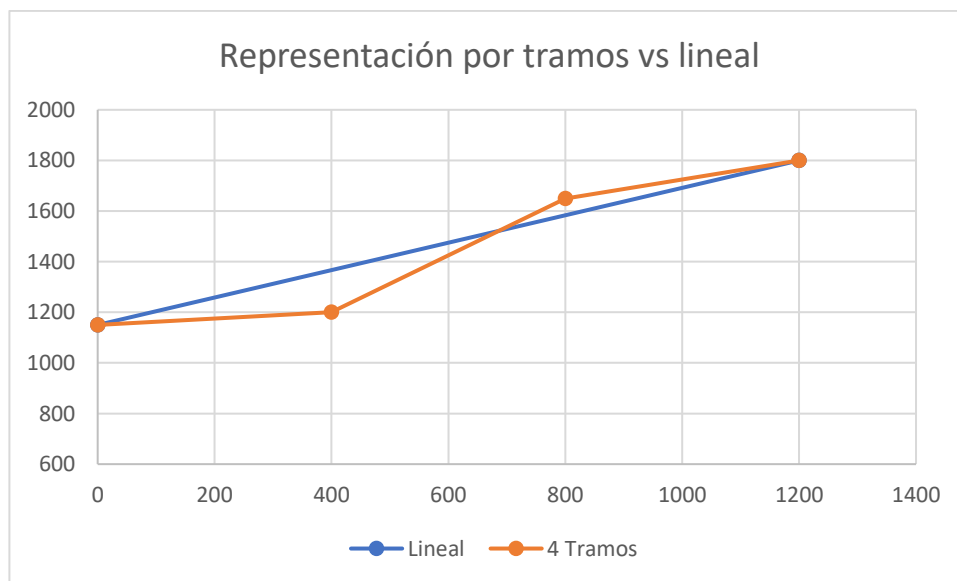


Figura 48: Comparación linealizaciones 3 tramos vs lineal. Fuente: Elaboración propia

4.3 Modelo 3 Tramos bruscos

PRESENTACIÓN

En este caso de estudio se vuelve a analizar un caso de linealización por tramos similar al de la primera simulación. Esta vez la curva de rendimiento escogida del modelo real de la bomba presenta unas pendientes de las rectas resultantes más acentuadas que en el primer caso.

El hecho de que haya un cambio significativo de las pendientes entre los tramos hace que esta linealización esté más alejada de un modelo totalmente lineal. Por este motivo es interesante estudiar la respuesta del problema de unit commitment para poder comparar la influencia que la linealización por tramos tendrá sobre el resultado final.

La linealización de 3 tramos escogida para este caso de estudio tiene la siguiente forma:

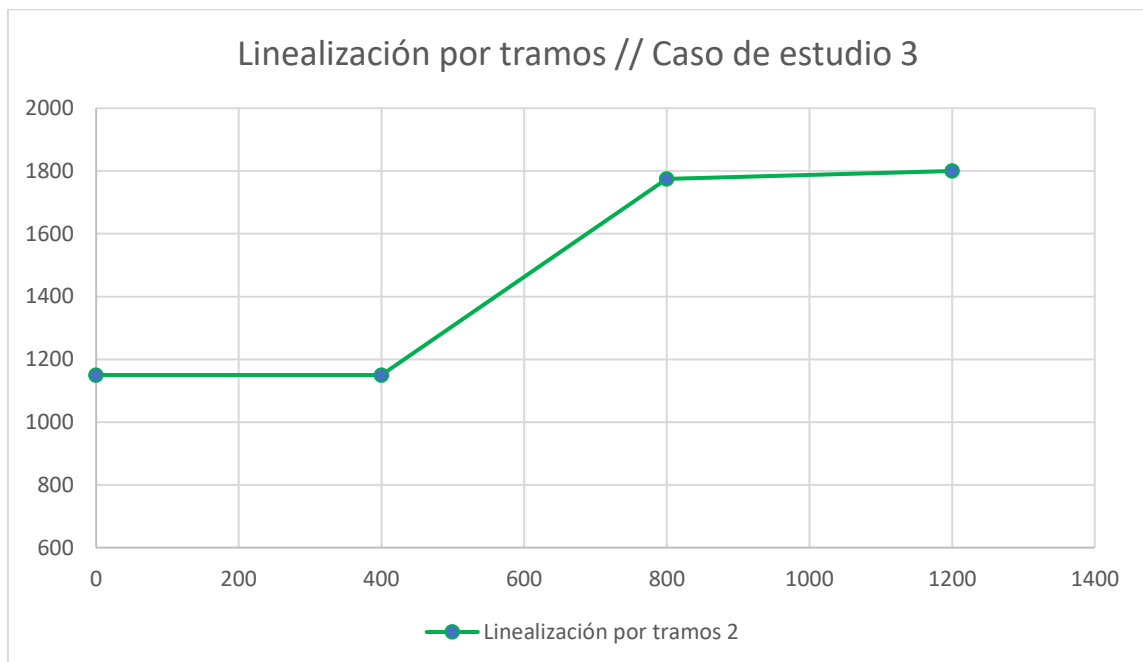


Figura 49: Linealización por 3 tramos // Caso de estudio 3.

Donde los puntos escogidos e introducidos en el modelo son los que se representan en la Tabla 8:

pe,k	Qk
1150	0
2250	800
3550	1600
3600	2400

Tabla 8: Puntos de operación caso 3

Para poder comparar este modelo con los anteriores, se utilizan los mismos datos de demanda de agua y de demanda eléctrica que en los casos de estudio anteriores. La demanda de agua aparece representada en la Figura 40 y la Tabla 4, mientras que la demanda eléctrica se puede encontrar en la Figura 41 y en la Tabla 4.

En cuanto a las características de los grupos generadores, son los representados en el apartado del primer caso de estudio en la Tabla x.

Los datos característicos de la desaladora son los siguientes:

	Desaladora
$N_{max} (m^3)$	4500
$N_0 (m^3)$	2600
$N_{min} (m^3)$	700
$q_{p,max}^{OI} (m^3/h)$	2000
$q_{p,min}^{OI} (m^3/h)$	0

Tabla 9: Datos desaladora simulación 3.

Los límites del nivel del depósito y de caudal de permeado son los mismos que los utilizados en los dos primeros casos.

RESULTADOS

Con los datos planteados anteriormente se procede a realizar la simulación del problema de unit commitment.

Para empezar, analizamos los resultados referentes a la demanda eléctrica y la demanda eléctrica neta. Como se puede ver en la Figura 50.a mantiene el mismo principio que los dos casos de estudio anteriores, en las horas de baja demanda de agua aparecen picos cuando se desconecta la planta desaladora, mientras que en las horas donde la demanda de agua es menor la curva de demanda eléctrica neta se aleja de la gráfica que representa la demanda eléctrica.

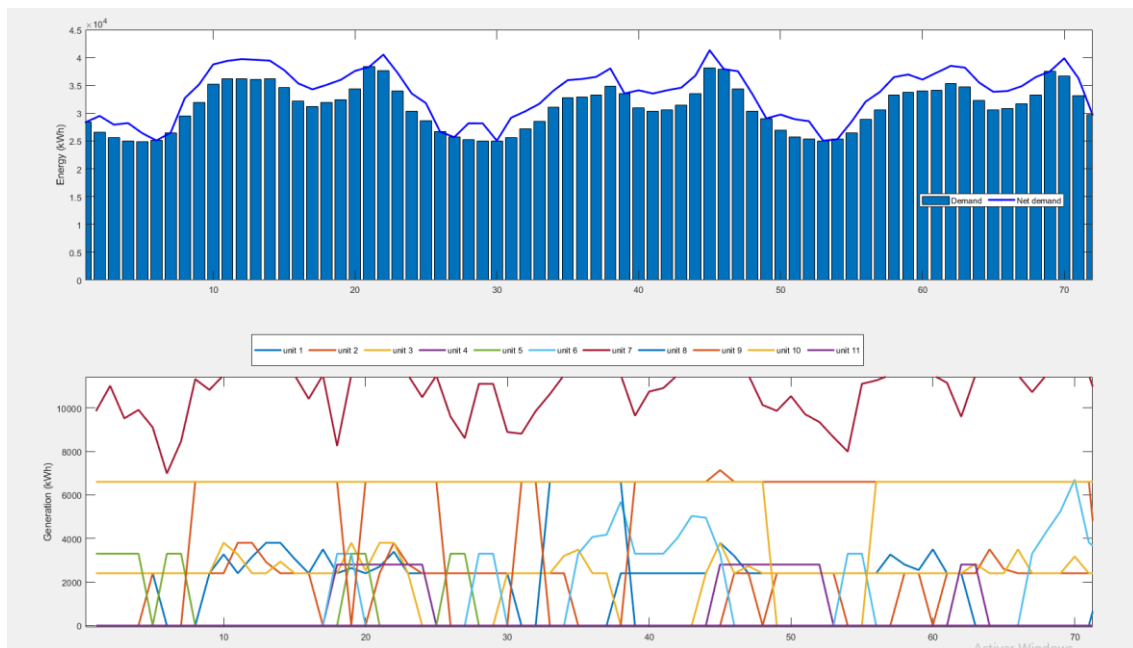


Figura 50: fig 50.a: Demanda eléctrica y demanda eléctrica neta // fig 42.b: Generación por grupos generadores.
Fuente: Elaboración propia

En la gráfica 50.b podemos observar un comportamiento de los grupos generadores muy similar al de los dos casos de estudio anteriores. Se rigen bajo el mismo principio, reducir los costes fijos desconectando los grupos más caros a la vez que se cubre la demanda y la restricción de reserva a subir del sistema.

La Figura 51 representa la demanda eléctrica neta del sistema durante las 72 horas simuladas en este caso de estudio, mientras que la Figura 52 representa la demanda eléctrica neta durante las 72 horas simuladas en el caso de estudio del modelo lineal.

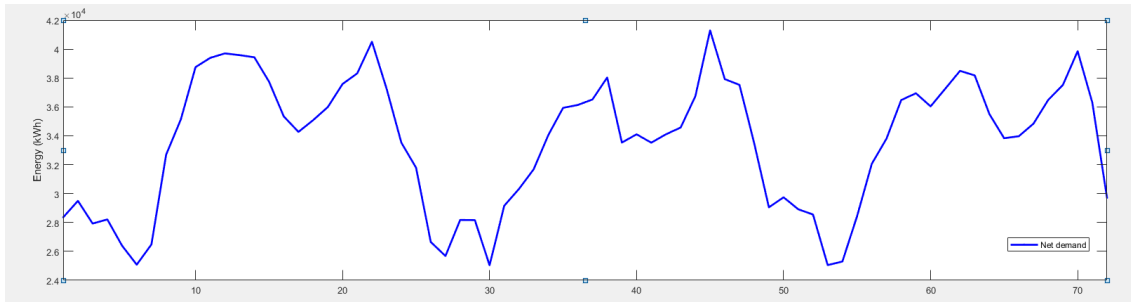


Figura 51: Demanda eléctrica neta del tercer caso de estudio. Fuente: Elaboración propia.

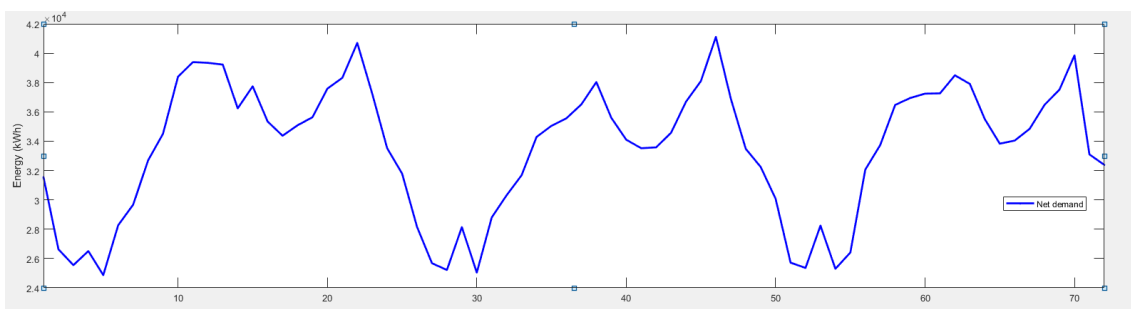


Figura 52: Demanda eléctrica neta del modelo lineal. Fuente: Elaboración propia.

Como se puede comprobar, aunque los modelos de linealización son muy diferentes, las curvas de demanda eléctrica neta resultantes presentan pocas variaciones una respecto a la otra. Destaca que ambas curvas adoptan la misma forma y tienen el mismo valor medio.

Por otro lado, en cuanto al perfil de permeado de agua resultante, se puede observar que sigue el mismo principio que los dos casos de estudio anteriores. Se desconecta en las horas de la madrugada lo máximo posible y aprovecha para cargar el depósito, mientras que durante el día el sistema se dedica a cubrir la demanda utilizando la flexibilidad que le aporta el depósito para que durante las horas de la noche se pueda aprovechar esta agua para reducir los costes de producción.

En lo referente a la gestión del depósito se puede comprobar que sigue manteniendo el mismo modelo de gestión en esta nueva linealización que en los dos casos de estudio anteriores, aunque destacan pequeñas variaciones de forma entre unos y otros.

La Figura 53 representa la curva de caudal permeado, la función de consumo eléctrico de la planta desaladora y la curva del nivel de agua del depósito.

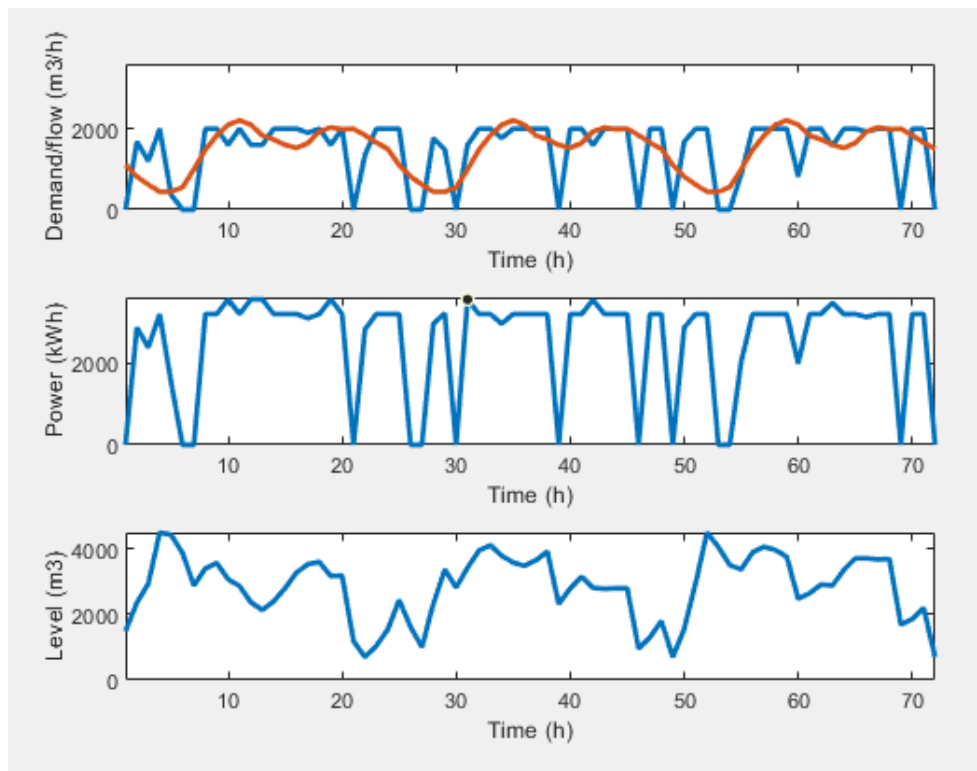


Figura 53: fig53.a: Demanda y caudal permeado de agua en cada hora h. // fig53.b Consumo eléctrico cada hora h. // fig53.c: Nivel del depósito en cada hora h. Fuente: Elaboración propia.

Es importante destacar que en este caso se dan 14 horas en las que la desaladora está desconectada frente a las 15 horas en las que se desacoplaba la planta en el modelo lineal.

Es importante acabar este análisis mencionando que en cuanto a las decisiones de arranque y desacople de los grupos generadores, también obtenemos el mismo modelo que en los casos anteriores. Esta relación se puede observar en la Figura50.b

Como se ha explicado anteriormente, el objetivo de este caso de estudio era determinar la importancia de la inclusión de un modelo por tramos en este despacho económico. Se ha analizado una linealización exagerada para ver el efecto que este tendría sobre el resultado final de la simulación.

Finalmente, en este caso de estudio se ha obtenido un coste final de operación en el sistema de 227. 508,24 €.

Podemos comprobar como el resultado de coste final es muy similar al obtenido para el modelo lineal (230. 263,17€), es decir, es un 1,196% mejor la simulación por tramos que la lineal.

En conclusión, el incluir un modelo lineal por tramos no afecta significativamente al coste de operación final con respecto a realizar una simulación lineal.

A continuación, se muestra la comparación entre la curva de la bomba escogida para cada uno de los tres modelos en la Figura 54.

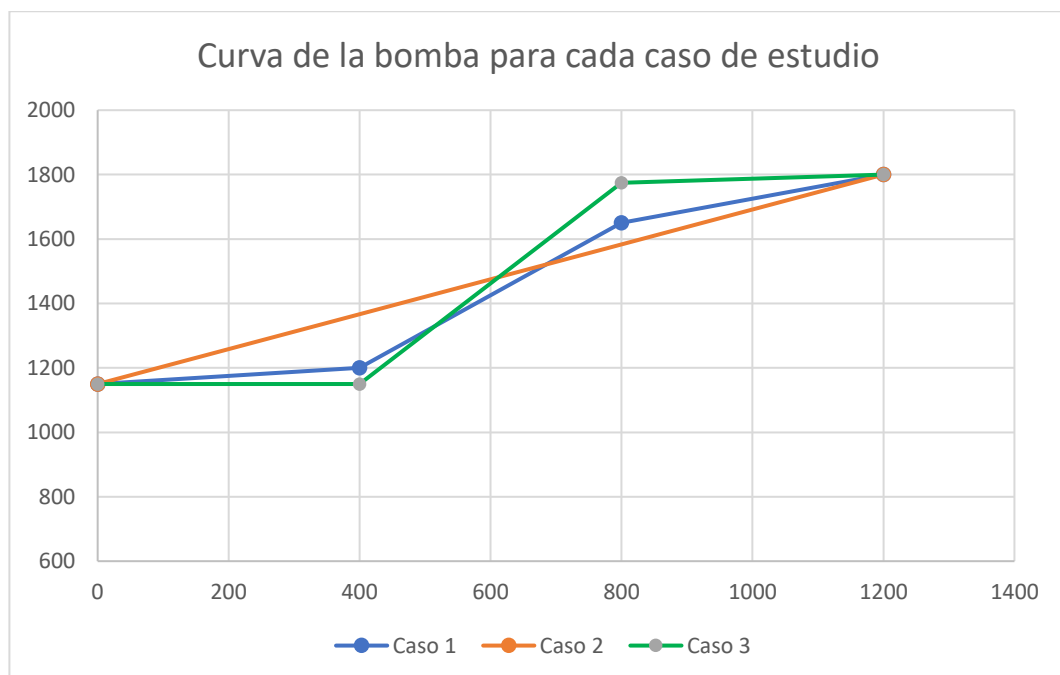


Figura 54: Curva de la bomba para cada caso de estudio. Fuente: Elaboración propia

4.4 Casos extra

En esta sección se proponen dos variantes del modelo utilizado para el estudio de la influencia de la linealización por tramos anterior. Para estos casos se va a utilizar la linealización por tramos propuesta en el primer caso de estudio ya que es la más fiel a la realidad de las tres linealizaciones propuestas. Estas variantes son las siguientes:

- Introducción de una tercera bomba en paralelo con el fin de aumentar el límite de caudal permeado máximo de la planta a $3300 \text{ m}^3/\text{h}$.
- Aumento del tamaño del depósito al doble de su capacidad.

TRES BOMBAS EN PARALELO

El objetivo de estudio de este caso extra es analizar la repercusión que tendría el sistema al aumentar el límite de caudal permeado máximo de $2000 \text{ m}^3/\text{h}$ a $3300 \text{ m}^3/\text{h}$. Este caso de estudio se comparará con el primer caso de estudio.

Como se ha mencionado a lo largo de las tres primeras simulaciones, la planta desaladora busca operar en sus límites máximos y mínimos de caudal permeado con el fin de evitar incurrir en unos gastos fijos demasiado elevados. Es precisamente aquí donde encontramos la primera diferencia con el primer caso de estudio, esta diferencia se puede apreciar claramente en la Figura 55.

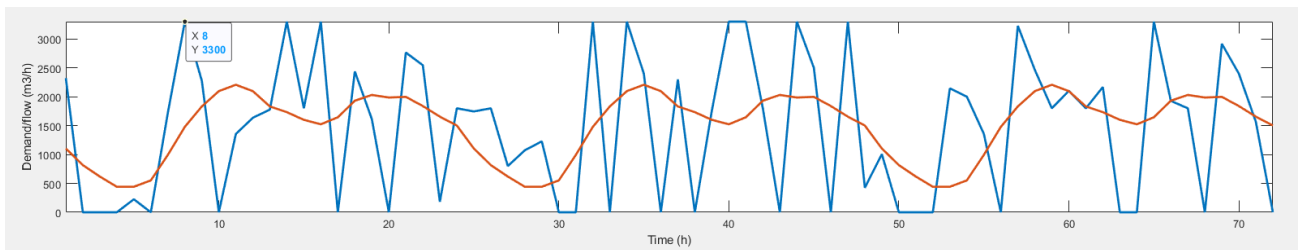


Figura 55: Caudal permeado por la planta con tres bombas en paralelo. Fuente: Elaboración propia.

Se puede ver claramente como en este caso el sistema busca operar en sus límites de caudal permeado, pero encuentra dificultades para mantenerse en el nivel máximo ya que el caudal permeado máximo es mucho más elevado que la demanda máxima registrada, es decir, cada vez que opera al máximo el sistema cubre la demanda y utiliza el depósito para cumplir con la conservación de la masa del agua y por lo tanto en la siguiente hora tiene que disminuir la producción o desconectar la desaladora para no saturar el depósito, por este motivo la gráfica de caudal permeado tiene tantos picos.

En la Figura 56 se representa el nivel de agua en el depósito a lo largo de la simulación, donde se puede apreciar que el nivel de agua del depósito unas variaciones muy bruscas debidas al motivo que hemos explicado anteriormente.

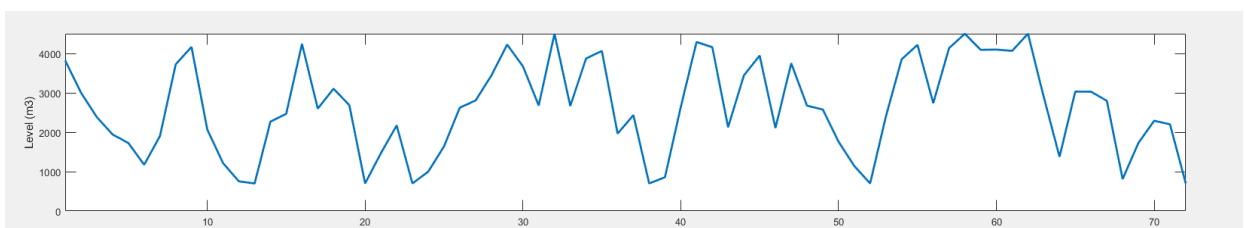


Figura 56: Nivel del depósito para cada hora con tres bombas en paralelo. Fuente: Elaboración propia.

No obstante, se puede comprobar como el programa sigue intentando vaciar el depósito durante las últimas horas de la noche con el fin de aprovechar el caudal permeado excedente y optimizar así el coste total de producción.

A continuación, se comparan las gráficas de las demandas de energía netas de los modelos a comparar, siendo la Figura 57 la correspondiente al modelo con tres bombas en paralelo, y la Figura 58 la correspondiente al modelo con dos bombas en paralelo.

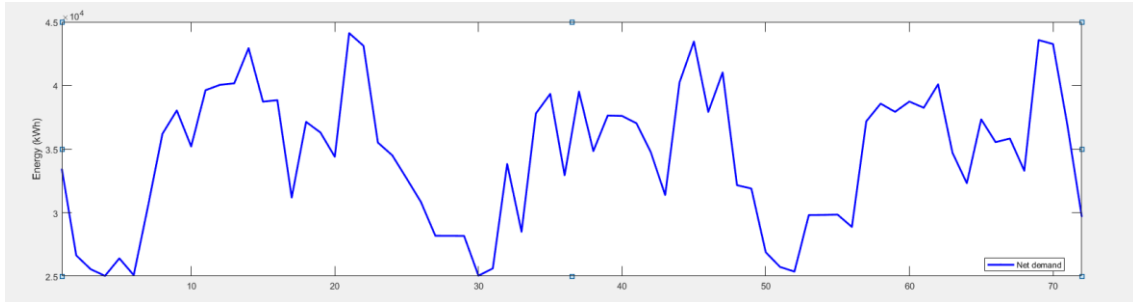


Figura 57: Demanda eléctrica neta del caso de estudio con tres bombas en paralelo. Fuente: Elaboración propia.

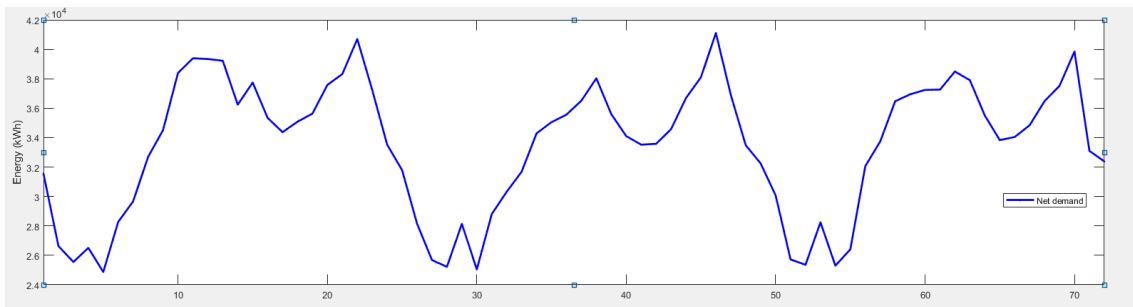


Figura 58: Demanda eléctrica neta del caso de estudio con dos bombas en paralelo. Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar, ambas gráficas presentan un valor medio similar, pero es evidente que en el modelo con tres bombas en paralelo se generan más picos en la demanda eléctrica y sigue una distribución más abrupta.

El coste final de operación obtenido es de 232. 984,72€, es decir un 1,52% menos eficiente que el modelo con dos bombas en paralelo.

En conclusión, se puede afirmar que añadir una bomba más a la planta no mejore en absoluto el rendimiento del sistema, es más, añadiría un coste de mantenimiento extra además del coste de la propia bomba y su correspondiente instalación.

AUMENTO DE LA CAPACIDAD DEL DEPÓSITO

Como se ha ido mencionando a lo largo del proyecto, el depósito de agua situado a la salida de la planta desaladora aporta flexibilidad al sistema dándole capacidad de regulación.

Por este motivo es interesante estudiar los efectos que tendría el hecho de ampliar el depósito al doble de su capacidad ($9000m^3$), si el sistema consigue encontrar una solución mejor o por el contrario no afecta considerablemente a la solución final del sistema.

La Figura 59 representa el nivel del depósito durante las 72 horas de simulación, mientras que la Figura 60 representa el nivel del depósito en el caso de estudio 1.

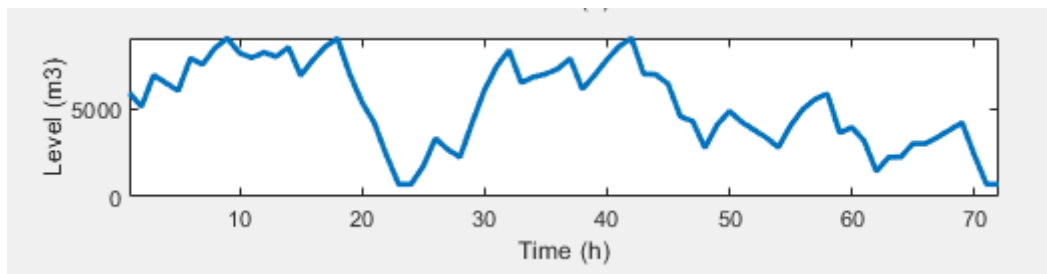


Figura 59: Nivel del depósito con el doble de capacidad. Fuente: Elaboración propia.

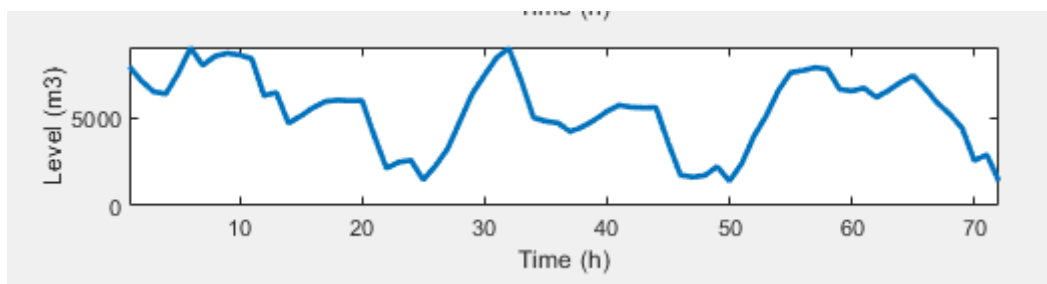


Figura 60: Nivel del depósito del caso de estudio 1. Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar, la planta desaladora tiene que hacer un gasto adicional de energía en las horas de la madrugada a la hora de llenar el depósito, ya que tiene que llenar el doble de metros cúbicos de agua.

No obstante, en las horas de la noche el modelo nuevo obtiene un ahorro de energía mayor que el del caso de estudio 1, ya que cuenta con más capacidad de agua para abastecer la demanda pedida.

Por este motivo, podemos determinar que la diferencia principal entre estos dos modelos es el modelo de gestión de agua que rigen ambos sistemas. Se representan en las Figuras 61 y 62 las demandas eléctricas netas de cada modelo con el fin de apreciar esta diferencia.

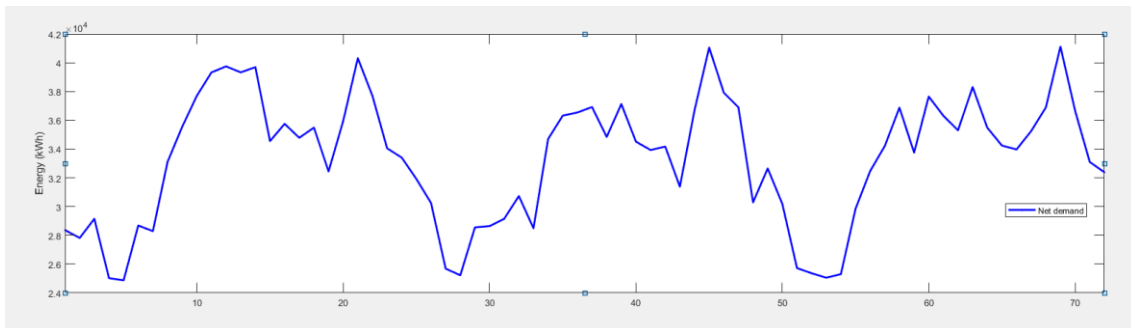
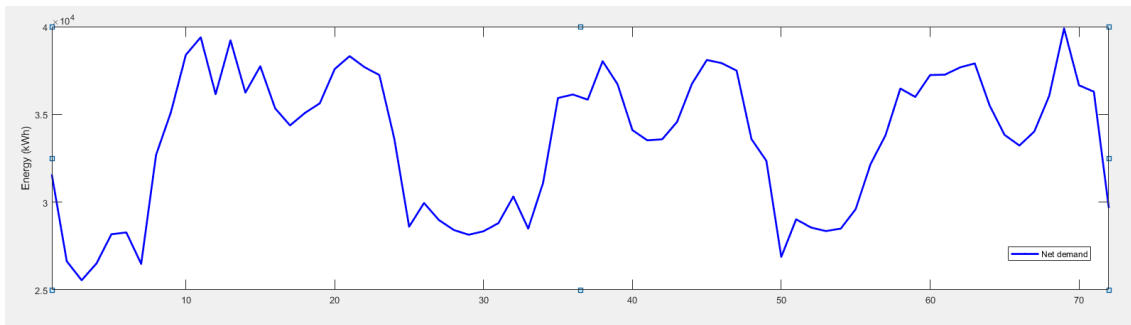


Figura 61: Demanda eléctrica neta del sistema con doble capacidad de depósito. Fuente: Elaboración propia



Como se puede observar en estas dos figuras, el cambio de forma es evidente en las horas de la madrugada, en el modelo con doble depósito durante estas horas la planta para menos tiempo, pero sin embargo el valor medio de consumo durante el resto del día es menor.

Finalmente, obtenemos unos costes finales de operación de 227.314,35€, es decir, supone un ahorro del 1,05%. Esto demuestra que el depósito de 4500m³ ya era lo

suficientemente flexible y no es necesario hacerlo más grande para mejorar el rendimiento del sistema.

4.5 Comparación de resultados.

En esta sección, se va a realizar una breve comparación entre los costes finales de operación del sistema de cada una de las simulaciones realizadas.

Se representa la comparación entre los costes finales en la Tabla 10.

Simulaciones	Coste final (€)	Mejora (%)
Linealización por 3 tramos	229.485,07 €	0,34
Modelo lineal	230.263,17 €	0%
Linealización por 3 tramos bruscos	227.508,24 €	1,20
3 bombas en paralelo	232.984,72 €	1,18
Doble capacidad de depósito	227.314,35 €	1,3

Tabla 10: Comparación de resultados respecto de la lineal. Fuente: Elaboración propia.

En primer lugar, se puede comprobar como la diferencia porcentual entre el modelo lineal, y los dos modelos linealizados por tramos es muy pequeña, siendo la mayor de ellas un 1,2% de mejora. El motivo principal por el cuál varía tan poco, es debido a que el punto de operación que intenta mantener el sistema se encuentra en los límites de generación de la planta, donde ambos modelos convergen.

Por otro lado, queda demostrado que la inclusión de una tercera bomba en paralelo no solo no mejora el sistema, si no que además añade costes innecesarios a la planta.

En cuanto a la capacidad del depósito, se puede decir que el hecho de aumentar su capacidad mejora levemente la respuesta del sistema, ya que aumenta su flexibilidad. No obstante, la mejora económica es tan leve que no merece la pena realizar la inversión necesaria para aumentar la capacidad.

5. Conclusiones

Como se ha mencionado a lo largo del proyecto, el nexo agua-energía presenta un concepto para comprender mejor y analizar las interacciones que se producen entre estos dos recursos. Es importante encontrar herramientas para llevar a cabo el estudio de este nexo para poder optimizar el consumo de estos recursos y reducir sus costes de producción

La presencia de este nexo en el proyecto es obvia, ya que su estudio está enfocado a encontrar una herramienta potente a la hora de optimizar el gasto económico y energético a la hora de cubrir una demanda dada de agua desalada.

Con el objetivo de estudiar este nexo, este proyecto propone un análisis de los beneficios y las desventajas que tendría incorporar un modelo de una desaladora con su bomba linealizada por tramos, en un despacho económico encargado de gestionar un consumo eléctrico y su producción hidráulica, frente a un modelo de dicha bomba lineal. Para ello se ha utilizado un modelo de consumo de agua y de consumo energético de la isla de La Palma como caso de estudio real.

Se han realizado tres modelos, uno linealizado con tres tramos, uno lineal, y linealizado con tres tramos, pero más abrupto. Las conclusiones que se pueden sacar del resultado del primer caso de estudio son las siguientes:

- Con el objetivo de reducir los costes finales de operación, la resolución del problema de unit commitment determina que la forma más óptima de trabajar es hacerlo lo más cerca posible de su máxima potencia o desacoplar la planta, es decir, es mejor trabajar a tope y luego no trabajar para así evitar recaer en los costes fijos que supondría trabajar a media carga.

- Las horas donde el gasto económico de operación es más barato se dan en las últimas horas del día, ya que el depósito de agua se vacía para aprovechar de una manera óptima el gasto energético que se ha invertido anteriormente en llenarlo, con el objetivo de abaratar costes.
- El depósito se llena en las horas donde la demanda eléctrica es menor de manera que al llegar a las horas donde existe una demanda eléctrica elevada no haga falta generar caudal de permeado para cubrir la demanda de agua. Una vez que el depósito está próximo a alcanzar sus valores mínimos se empieza a llenar, aunque la demanda eléctrica siga en niveles elevados ya que el sistema debe de cubrir la demanda y no le queda otra que incrementar la producción de agua durante el resto de las horas.

A efectos de este proyecto, las conclusiones descritas anteriormente se repiten en todos los casos de estudio a lo largo del mismo.

El resultado de la comparación entre los tres modelos de linealización son los siguientes.

- Los resultados de costes finales de operación para los tres modelos han sido muy similares. 229485,07€ para el primer caso de estudio, 230263,17€, para el segundo caso de estudio, y 227508,24€, para el tercer caso de estudio. La diferencia porcentual de mejora entre el modelo con tres tramos abruptos y el modelo lineal es del 1,196%.
- Como se puede comprobar las diferencias entre los resultados son muy pequeñas. Uno de los motivos es la tendencia que tiene el sistema a la hora de trabajar en sus límites de generación de permeado, ya que en este punto las tres linealizaciones convergen adoptando unos valores de consumo energético muy similares. Se ha determinado que esta situación se da en más de un 80% de las horas simuladas, siendo el otro 20% restante valores de consumo muy cercanos a estos límites.

Como conclusión final, después de la comparación y el análisis de resultados de estos tres modelos, se determina que no es necesario incluir un modelo de linealización por tramos para mejorar el rendimiento del despacho económico, ya que este agrega mucha carga computacional y los resultados son muy similares entre un modelo y otro.

Adicionalmente se ha decidido estudiar que repercusiones tendría incluir una tercera bomba en paralelo en la entrada de la planta desaladora.

Los costes finales de operación obtenidos a partir de esta simulación han sido un total de 232984,72€, más elevados que el modelo con dos bombas en paralelo.

El resultado de este caso de estudio es que no merece la pena incluir una tercera bomba en paralelo, ya que se recaería en los costes de la propia bomba, sus costes de instalación y de mantenimiento a lo largo de su vida útil sin obtener ningún margen de mejora en la planta.

Finalmente se ha pretendido estudiar el margen de mejora que podíamos obtener de la flexibilidad que aporta el depósito. Para ello se ha incrementado la capacidad del depósito al doble.

El resultado ha sido de 227314,35€, es decir, se puede apreciar una ligera mejora en el resultado final pero no lo suficientemente grande como para considerar doblar la capacidad del depósito. Este resultado nos dice que los $4500m^3$ que teníamos inicialmente eran suficientes para aportar la flexibilidad necesaria al sistema.

El estudio del nexo agua-energía que plantea este proyecto se ha resuelto para datos reales de la isla de La Palma, pero gracias al carácter genérico del modelo, puede ser utilizado para analizar cualquier tipo de respuesta ante otras demandas diferentes.

6. Bibliografía

- [1] “(PDF) Optimal Coordination of Water Distribution Energy Flexibility with Power Systems Operation.”
https://www.researchgate.net/publication/324379166_Optimal_Coordination_of_Water_Distribution_Energy_Flexibility_with_Power_Systems_Operation.
- [2] “¿Cómo se potabiliza el agua? - VIX.”
https://www.vix.com/es/btg/curiosidades/5185/como-se-potabiliza-el-agua?utm_source=next_article.
- [3] “(PDF) Permeate Recovery Rate Optimization at the Alicante Spain SWRO Plant.”
https://www.researchgate.net/publication/238733283_Permeate_Recovery_Rate_Optimization_at_the_Alicante_Spain_SWRO_Plant.
- [4] 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, Oct. 2011, doi: 10.1016/j.enpol.2011.08.013.
- [5] A. Embid and L. Martín, “El Nexo entre el agua, la energía y la alimentación en América Latina y el Caribe Planificación, marco normativo e identificación de interconexiones prioritarias.”
- [6] A. Santhosh, A. M. Farid, and K. Youcef-Toumi, “Real-Time Economic Dispatch for the Supply Side of the Energy-Water Nexus,” 2014.
- [7] A. Santhosh, A. M. Farid, and K. Youcef-Toumi, “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, Mar. 2014, doi: 10.1016/j.energy.2014.01.031.
- [8] “¿Qué es la ósmosis inversa? - Carbotecnia.”
<https://www.carbotecnia.info/aprendizaje/osmosis-inversa/que-es-la-osmosis-inversa/> (accessed Aug. 03, 2020).

- [9] “▶ ¿Qué es la ósmosis inversa? 【 Usos, Mantenimiento, Equipos 】 .”
<https://osmosisinversa.top/> .
- [10] “FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS, FÍSICAS Y NATURALES.”
- [11] “Presión osmótica - Propiedades coligativas - Ley de Van’t Hoff - Propiedades coligativas - Disoluciones - Química - - beUnicoos.”
<https://www.beunicoos.com/quimica/estados-de-la-materia/propiedades-coligativas/quimica-presion-osmotica-propiedades-coligativas-ley-de-van-t-hoff> .
- [12] “Descripción técnica desaladora Marbella.”
[https://www.acosol.es/sites/default/files/inline-files/Descripción Técnica Desaladora Rev 2018.pdf](https://www.acosol.es/sites/default/files/inline-files/Descripción_Técnica_Desaladora_Rev_2018.pdf) .
- [13] “Minimización del impacto en vertidos de desalación | Carolina Pérez Bermúdez.” <https://www.eoi.es/blogs/carolinaperez/2014/02/18/minimizacion-del-impacto-en-vertidos-de-desalacion/>.
- [14] “Sistemas de captación en desaladoras de agua de mar (I). Tomas abiertas | iAgua.” <https://www.iagua.es/blogs/mario-miguel-bello/sistemas-captacion-desaladoras-agua-mar>.
- [15] “PRETRATAMIENTO DEL AGUA DE MAR - La desalinización.”
<https://sites.google.com/site/ladesalinizacion/home/pretratamiento> .
- [16] “Rejas de desbaste – deagua.” <http://blogdeagua.es/reja-de-desbaste/>.
- [17] “Tratamiento físico-químico de aguas residuales: coagulación-floculación - M. I. Aguilar - Google Libros.”
https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=8vIQBXPvhAUC&oi=fnd&pg=PA17&dq=coagulación+y+floculación&ots=cjVNiXvqB6&sig=v4o37tOWdx6KZS_isUw5IzDHtRo#v=onepage&q=coagulación+y+floculación&f=false .
- [18] “Guía desalación.”
https://www.msrebs.gob.es/profesionales/saludPublica/docs/Guia_desalacion.pdf .
- [19] “Incrustación y antiincrustantes.” <https://www.lenntech.es/antiscalants.htm>.
- [20] “[PDF] Energy optimisation of existing SWRO (seawater reverse osmosis) plants with ERT (energy recovery tur | Semantic Scholar.”
[https://www.semanticscholar.org/paper/Energy-optimisation-of-existing-SWRO-\(seawater-with-Peñate-García-Rodríguez/048c35a2d038a076808c7bd7c68aef083c9c7707](https://www.semanticscholar.org/paper/Energy-optimisation-of-existing-SWRO-(seawater-with-Peñate-García-Rodríguez/048c35a2d038a076808c7bd7c68aef083c9c7707) .

- [21] “Tesis doctoral: Diseño preliminar de.”
- [22] “DESCRIPCIÓN TÉCNICA DESALADORA MARBELLA.”
- [23] “ResearchGate.”
https://www.researchgate.net/publication/237050508_Energy_consumption_and_recovery_in_reverse_osmosis/link/02e7e51b0acf70221d000000/download .
- [24] “La importancia de los sistemas de recuperación de energía en la desalación de aguas en Canarias | iAgua.” <https://www.iagua.es/blogs/baltasar-penate-suarez/importancia-sistemas-recuperacion-energia-desalacion-aguas-canarias>.
- [25] “postratamiento agua osmotizada.”
http://www.acuamed.es/media/publicaciones/guia_para_la_remineralizacion_de_aguas_desaladas_rev3_2.pdf.
- [26] M. Fernández Murcia Director and L. Ruiz Peñalver, “PROYECTO FIN DE CARRERA PLANTA DE ÓSMOSIS INVERSA DE UN FERRY TIPO ROPAX Titulación: Ingeniería Técnica Naval. Especialidad Estructuras Marinas.”
- [27] “Aspectos energéticos de la desalación.”
https://www.zaragoza.es/contenidos/medioambiente/cajaAzul/17S4-P3-Manuel_FARINAS-PPTACC.pdf .
- [28] A. Solís, H. Tutora, and L. García Rodríguez, “EFICIENCIA ENERGÉTICA EN EL DISEÑO DE UNA PLANTA DESALADORA DE AGUA DE MAR POR ÓSMOSIS INVERSA,” 2015.
- [29] “Pumping solutions for desalination.”
- [30] “TFM Ingeniería Industrial José Luis González Pizarro FINAL_vL.” .

ICAI ICADE CIHS

7. Anexos

7.1 Anexo ODS

Este proyecto tiene dos objetivos principales.

El primero es estudiar las partes de las que consta una planta desaladora por ósmosis inversa, con qué tecnologías cuenta y cómo funcionan tanto hidráulica como energéticamente de forma que se adquiera una amplia comprensión sobre este tipo de industria.

El segundo objetivo y el más importante, ya que es en lo que se basa el proyecto consiste en aplicar un despacho económico a una desaladora con el objetivo de estudiar el nexus agua-energía. Para ello se va a mejorar un modelo existente de una desaladora en un despacho económico de un sistema insular con el fin de comparar los resultados lanzados por ambos modelos para comprobar si se obtienen resultados óptimos.

La desaladora junto al tanque de agua (depósito a la salida de la planta) podría proporcionar flexibilidad al sistema insular. El modelo existente es un modelo que aproxima la relación entre potencia eléctrica consumida por la desaladora y el caudal producido por una función lineal. Se propone modificar esta aproximación por una aproximación lineal por tramos. Las tareas del proyecto son las siguientes:

1. Revisión del estado de arte en cuanto a la representación de desaladoras y el nexus agua-energía en despachos económicos.
2. Desarrollo del modelo usando la aproximación lineal por tramos.
3. Implantación del modelo en un despacho económico en Matlab.
4. Comparación de los modelos.

Este proyecto busca cumplir con los objetivos para el desarrollo sostenible (ODS) expuestos en la Figura 1, de manera que sea un proyecto comprometido a proteger los recursos de la naturaleza, el bienestar de las personas y comunidades afectadas por el proyecto y por supuesto que garantice una prosperidad tanto económica como climatológica en las regiones donde este se pueda aplicar de forma práctica.

La importancia de definir estos objetivos para el desarrollo sostenible es clara, dado que hoy en día las nuevas tecnologías están evolucionando hacia una gestión basada en los principios de sostenibilidad y economía circular conviene tener una guía como la mostrada en la Figura 1 para tener claro que objetivos necesitamos perseguir de forma insistente y en cuales podemos mejorar de forma que logremos un mundo más justo para todos.



Principalmente, mediante la implantación de este despacho económico en el modelo de la planta desaladora se pretende cumplir los siguientes objetivos:

- **ODS 3 (Good health and well-being):** La instalación de plantas desaladoras tienen como objetivo principal abastecer la demanda de agua dulce para el consume humano en regiones caracterizadas por su escasez en recursos hídricos como pueden ser los países de Oriente Medio. Por este motivo este proyecto logra cumplir con el ODS 3, ya que el hecho de tener agua potable suficiente para el consumo humano, regadío agrícola e incluso uso industrial, influye de manera directa en la buena salud y bienestar de las personas que se beneficien de la planta.
- **ODS 6 (Clean water and sanitation) & ODS 7 (Affordable and clean energy):** El desarrollo de este despacho económico basado en el nexo agua-energía pretende conseguir agua limpia utilizando la energía de la manera más eficiente posible para así abaratar costes, reducir las emisiones contaminantes de las industrias de las que esta depende, por ejemplo, las producidas por las centrales térmicas encargadas de generar energía a través de la combustión de combustibles fósiles.

De esta manera es claro que un consumo óptimo y una curva de rendimiento coherente contribuye de forma directa positivamente tanto a la parte económica como a la manera de gestionar la energía consumida y el agua producido.

- **ODS 12 (Responsible consumption and production):** Bajo mi punto de vista esta es la ODS más característica de este proyecto ya que el objetivo final del estudio del nexo agua-energía es precisamente alcanzar un consumo responsable de energía a la vez que una producción de agua dulce eficiente a partir de técnicas de optimización de tiempo y calidad de producción teniendo en cuenta la calidad y la cantidad de los recursos empleados para alcanzar dicho objetivo.

- **ODS 13 (Climate action):** Como no podía ser de otra manera, al ser capaces de obtener agua dulce utilizando la tecnología de desalación por ósmosis inversa a partir de una energía limpia y eficiente automáticamente estamos aportando nuestro grano de arena a la lucha contra el cambio climático, ya que estos factores afectan directamente a la reducción de contaminantes emitidos y a otros factores relevantes en este ámbito.

A parte de estos 4 objetivos para el desarrollo sostenible descritos anteriormente, hay que destacar que este proyecto también cumple de una manera secundaria con objetivos como el ODS 8 ya que el despacho económico también se basa en promover el crecimiento económico de la región donde este implantada la desaladora, de manera que se fomente el crecimiento económico de la misma.

También podemos decir que cumple con la ODS 17 ya que para poder integrar este proyecto se necesita de la colaboración de distintos sectores y múltiples empresas que tienen que formar parte del avance tecnológico propuesto para su correcto desarrollo e implantación.

7.2 Anexo 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 [-]

Q_k caudal de permeado dado en un punto k [m^3]

p_{ek} potencia eléctrica correspondiente a un punto k [MW]

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 bajar proporcionada por el grupo generador g en la hora h [MW]

q_h caudal permeado por la planta en la hora h [m^3]

$p_{e,h}$ potencia eléctrica consumida para la producción de permeado en la hora h [MW]

$t_{k,h}$ ponderación de la situación del punto de operación en la hora h [%]

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]

δ_k variable indicadora de tramo en el que nos situamos en la hora h [0/1]

