



MITIMAC

MITIGACIÓN DEL CAMBIO CLIMÁTICO A TRAVÉS
DE LA INNOVACIÓN EN EL CICLO DEL AGUA
MEDIANTE TECNOLOGÍAS BAJAS EN CARBONO

Desarrollo de una metodología para el estudio de la eficiencia energética en plantas de desalinización por ósmosis inversa de agua de mar

Proyecto Singular: Actividad: 2.3.1

Fecha	Autor (A); Coordinador (C)	Entidad	Versión
05 12 2022	Federico Antonio León Zerpa (A)	ULPGC-IUNAT	Final
05 12 2022	Alejandro Ramos Martín (C)	ULPGC-IUNAT	Final

Resumen ejecutivo

En este trabajo se desarrolla una metodología de análisis de la eficiencia energética de las plantas desalinizadoras, donde se aplica un modelo para ello, y se implementa la realización de pilotajes en plantas desalinizadoras, de forma sistemática, para evaluar las mejoras energéticas en los procesos de desalinización de aguas en un rango de validez muy amplio en lo que se refiere a salinidades y temperaturas del agua de mar.

Se toma, entre otros como ejemplo, las Islas Canarias, donde existen más de 320 unidades de diferentes tamaños, privadas y públicas. El objetivo es proponer un nuevo método que integre el análisis de la eficiencia energética, la huella de carbono y la huella ecológica en las plantas desalinizadoras de agua de mar por ósmosis inversa de las Islas Canarias. Para producir una cantidad de agua de una planta de ósmosis inversa se debe consumir una cantidad de energía eléctrica, y para la generación de esta energía, en una red eléctrica convencional, se emite una cantidad de emisiones en forma de gases de efecto invernadero. En relación con la dependencia territorial, las redes eléctricas suelen tener mezclas de energía que provocan mayores emisiones de gases de efecto invernadero, ya que suelen tener sistemas basados en tecnologías de menor rendimiento. Para reducir estas emisiones de gases de efecto invernadero, es posible proponer la generación de energía eléctrica necesaria para la producción de agua en la misma instalación, a través de sistemas energéticos híbridos. Estos sistemas de energía híbridos pueden estar compuestos por varios tipos de tecnologías, en los que se tiende a integrar la mayor cantidad de energía procedente de fuentes renovables, con el apoyo de un sistema de almacenamiento de energía o de una tecnología convencional

El trabajo, como proyecto singular, corresponde a la actividad 2.3.1 del proyecto MITIMAC.



INDICE DE CONTENIDOS

1. Introducción.....	1
2. Resultados previstos.....	2
3. Abstract.....	3
4. Expected results.....	4
5. Antecedentes.....	5
6. Objetivos.....	12
7. Descripción.....	13
8. Bibliografía.....	17

1. ANTECEDENTES

En este proyecto singular se ha desarrollado una metodología de análisis del proceso de ósmosis inversa en las plantas desalinizadoras de agua de mar, tomando entre otros como ejemplo las Islas Canarias, donde existen más de 320 unidades de diferentes tamaños, privadas y públicas. El objetivo es proponer un nuevo método que integre el análisis de la eficiencia energética, la huella de carbono y la huella ecológica en las plantas desalinizadoras de agua de mar por ósmosis inversa de las Islas Canarias.

Para producir una cantidad de agua de una planta de ósmosis inversa se debe consumir una cantidad de energía eléctrica, y para la generación de esta energía, en una red eléctrica convencional, se emite una cantidad de emisiones en forma de gases de efecto invernadero. En relación con la dependencia territorial, las redes eléctricas suelen tener mezclas de energía que provocan mayores emisiones de gases de efecto invernadero, ya que suelen tener sistemas basados en tecnologías de menor rendimiento. Para reducir estas emisiones de gases de efecto invernadero, es posible proponer la generación de energía eléctrica necesaria para la producción de agua en la misma instalación, a través de sistemas energéticos híbridos. Estos sistemas de energía híbridos pueden estar compuestos por varios tipos de tecnologías, en los que se tiende a integrar la mayor cantidad de energía procedente de fuentes renovables, con el apoyo de un sistema de almacenamiento de energía o de una tecnología convencional.

Los sistemas eléctricos de las Islas Canarias son bastante diferentes de los sistemas continentales debido a que son sistemas aislados de pequeño tamaño, concretamente 6 subsistemas, uno para cada isla, excepto para Fuerteventura y Lanzarote que están interconectados por un cable de corriente continua, esto complica el correcto uso de las energías renovables. Gran Canaria y Tenerife son las únicas que cuentan con unidades de vapor y de ciclo combinado, mientras que el resto de las islas se generan a partir de motores diésel. El modelo energético actual entra en conflicto con las exigencias medioambientales transmitidas por la Unión Europea. Entre ellas se encuentran la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y el aumento de la presencia de fuentes de energía renovables.

Debido a este mix de factores en Canarias, según la estructura tecnológica del parque de generación que utiliza productos petrolíferos, es de alrededor de 0,6776 kgCO₂/kWh muy

superior al de la Península Ibérica donde es de 0,2628 kgCO₂/kWh. Por tanto, se estima que en Canarias se pueden emitir 5326963 tCO₂/año, lo que representa 2,4 tCO₂/persona/año, 12 veces más que las admisiones admisibles por habitante en Canarias, sólo teniendo en cuenta el sector de la desalación de agua de mar. En este documento se muestran los diferentes resultados del análisis de la eficiencia energética y de la huella ambiental. Este estudio puede servir como herramienta para los procesos de toma de decisiones relacionados con la mejora de la eficiencia energética en las plantas de ósmosis inversa de agua de mar.

Por tanto, se desarrolla una metodología de análisis de la eficiencia energética de las plantas desalinizadoras, donde se aplica un modelo para ello, y se implementa la realización de pilotajes en plantas desalinizadoras, de forma sistemática, para evaluar las mejoras energéticas en los procesos de desalinización de aguas en un rango de validez muy amplio en lo que se refiere a salinidades y temperaturas del agua de mar.

2.RESULTADOS PREVISTOS.

La operación con elementos de ósmosis inversa de alto rechazo a altas presiones de trabajo supone un mayor consumo energético del sistema y por tanto un aumento del coste económico.

El coste y la energía requerida en el proceso dependen de la calidad de agua exigida y del tipo de membrana utilizada.

El estudio de elementos estándar de ósmosis inversa para una desaladora de agua marina ayuda a escoger un elemento de ósmosis inversa que disminuya el consumo energético, y por ende los costes operativos de la planta ya que la energía es lo más costoso de la misma.

Dentro del coste total de la producción de agua lo que más influye es la energía consumida y el tipo de elemento de ósmosis inversa escogida.

El envejecimiento de las membranas es un factor decisivo con respecto a la energía consumida en la planta, al caudal de agua permeada y a las emisiones producidas. Por ello, se establece una metodología de estudio para tomar decisiones sobre ello.

La toma de decisión del cambio de membranas es un parámetro muy significativo en la vida de la instalación y se deben tener en cuenta múltiples variables para ello, tales como la presión de trabajo, la calidad del agua de alimentación y el permeado del sistema de ósmosis inversa, la conversión, la temperatura, etc.

Con la introducción de membranas de última generación de bajo consumo energético y alto rechazo de sales podemos producir agua con la calidad requerida en condiciones más eficientes y sostenibles que con membranas estándar, reduciendo la huella de carbono del sistema y trabajando por la mitigación del cambio climático.

Mediante el análisis del factor mix de emisiones se puede establecer una metodología de cálculo para estimar la huella del carbono del mix energético en el período de tiempo de referencia, teniendo en cuenta la sumatoria de las energías de cada tecnología y el factor mix de emisiones de cada una de ellas.

3.ABSTRACT

In this singular project has developed a methodology for analysing the reverse osmosis process in seawater desalination plants, taking as an example the Canary Islands, where there are more than 320 units of different sizes, both private and public. The objective is to propose a new method that integrates the analysis of energy efficiency, carbon footprint and ecological footprint in seawater desalination plants by reverse osmosis in the Canary Islands.

To produce a quantity of water from a reverse osmosis plant, an amount of electrical energy must be consumed, and to generate this energy, in a conventional electrical network, a quantity of emissions in the form of greenhouse gases is emitted. With regard to territorial dependence, electricity networks often have energy mixtures that cause higher greenhouse gas emissions, as they usually have systems based on lower performance technologies. In order to reduce these greenhouse gas emissions, it is possible to propose the generation of electrical energy necessary for water production in the same installation, through hybrid energy systems. These hybrid energy systems can be composed of several types of technologies, in which the greatest amount of energy from renewable sources tends to be integrated, with the support of an energy storage system or conventional technology.

Proyecto Singular: Desarrollo de una metodología para el estudio de la eficiencia energética en plantas de desalinización por ósmosis inversa de agua de mar.

The electrical systems of the Canary Islands are quite different from continental systems due to the fact that they are small isolated systems, specifically 6 subsystems, one for each island, except for Fuerteventura and Lanzarote which are interconnected by a direct current cable, this complicates the correct use of renewable energies. Gran Canaria and Tenerife are the only ones to have steam and combined cycle units, while the rest of the islands are generated from diesel engines. The current energy model is in conflict with the environmental requirements transmitted by the European Union. These include reducing greenhouse gas (GHG) emissions and increasing the presence of renewable energy sources.

Due to this mix of factors in the Canary Islands, according to the technological structure of the generation park which uses oil products, it is around 0.6776 kgCO₂/kWh much higher than in the Iberian Peninsula where it is 0.2628 kgCO₂/kWh. It is therefore estimated that 5326963 tCO₂/year can be emitted in the Canary Islands, which represents 2.4 tCO₂/person/year, 12 times more than the admissible admissions per inhabitant in the Canary Islands, only taking into account the seawater desalination sector. This document shows the different results of the analysis of energy efficiency and the environmental footprint. This study can serve as a tool for decision-making processes related to improving energy efficiency in seawater reverse osmosis plants.

Therefore, a methodology is developed for analysing the energy efficiency of desalination plants, where a model is developed for this purpose, and pilots are implemented in desalination plants, in a systematic way, to evaluate the energy improvements in the water desalination processes over a very wide range of validity in terms of salinity and temperature of the sea water.

4. EXPECTED RESULTS.

The operation with high rejection reverse osmosis elements at high working pressures means a higher energy consumption of the system and therefore an increase in the economic cost.

The cost and energy required in the process depend on the quality of water required and the type of membrane used.

The study of standard reverse osmosis elements for a seawater desalination plant helps to choose a reverse osmosis element that reduces energy consumption, and therefore the operating costs of the plant, since energy is the most expensive part of it.

Within the total cost of water production, what most influences is the energy consumed and the type of reverse osmosis element chosen.

The aging of the membranes is a decisive factor with respect to the energy consumed in the plant, the flow of permeated water and the emissions produced. Therefore, a study methodology is established to make decisions about it.

The decision to change membranes is a very significant parameter in the life of the installation and multiple variables must be taken into account for this, such as the working pressure, the quality of the feed water and the permeate of the osmosis system. inverse, conversion, temperature, etc.

With the introduction of state-of-the-art membranes with low energy consumption and high salt rejection, we can produce water with the required quality in more efficient and sustainable conditions than with standard membranes, reducing the system's carbon footprint and working to mitigate climate change.

By analysing the emissions mix factor, a calculation methodology can be established to estimate the carbon footprint of the energy mix in the reference period, considering the sum of the energies of each technology and the emissions mix factor of each of them.

Proyecto Singular: Desarrollo de una metodología para el estudio de la eficiencia energética en plantas de desalinización por ósmosis inversa de agua de mar.

5. ANTECEDENTES

La desalinización es el proceso para la eliminación de sales del agua del mar o agua salobre, con el objeto de obtener agua potable mediante plantas desalinizadoras.

El agua apta para el consumo humano en el mundo no llega al 1% y el 97,5% es agua de mar o alta salinidad.

El desarrollo de plantas desaladoras para desalinizar el agua de mar se muestra como una solución eficaz para solventar la necesidad de agua apta el consumo en el planeta. De estas instalaciones de desalinización de agua de mar se produce agua tanto para abastecimiento público como para regadío.

Inicialmente el proceso de desalinización de aguas tenía costes muy altos, tanto energética como económicamente, por lo que sólo se utilizaba en menor grado que en la actualidad. La desalinización del agua de mar en las plantas de tratamiento de agua ha evolucionado mucho en los últimos cinco decenios, en los que el proceso de desalinización y su tecnología han cambiado y se han vuelto cada vez más rentables y eficientes. Inicialmente, el proceso de desalinización de agua era un proceso térmico que ha ido cambiando con los avances científicos y tecnológicos hacia un proceso por ósmosis inversa, que domina el mercado actual [1-2].

Para producir una cantidad de agua de una planta de ósmosis inversa, se debe consumir una cantidad de energía eléctrica, y para la generación de esta energía, en una red eléctrica convencional, se emite una cantidad de emisiones en forma de gases que producen efecto invernadero. En relación con la dependencia territorial, las redes eléctricas suelen tener mezclas de energía que provocan mayores emisiones gaseosas, ya que suelen tener sistemas basados en tecnologías de menor rendimiento. Para reducir estas emisiones, es posible proponer la generación de energía eléctrica necesaria para la producción de agua en la misma instalación, a través de sistemas energéticos híbridos. Estos sistemas de energía híbridos pueden estar compuestos por varios tipos de tecnologías, en los que se tiende a integrar la mayor cantidad de energía procedente de fuentes renovables, con el apoyo de un sistema de almacenamiento de energía o de una tecnología convencional.

Proyecto Singular: Desarrollo de una metodología para el estudio de la eficiencia energética en plantas de desalinización por ósmosis inversa de agua de mar.

Los sistemas eléctricos de las islas son bastante diferentes de los sistemas continentales debido a que son sistemas aislados de pequeño tamaño, en el caso del estudio de las Islas Canarias existen específicamente 6 subsistemas, uno para cada isla, excepto para Fuerteventura y Lanzarote interconectados por un cable de corriente continua, que dificulta el uso correcto de las energías renovables. Gran Canaria y Tenerife son las únicas que cuentan con unidades de vapor y de ciclo combinado, mientras que el resto de las islas se genera a partir de motores diésel. El modelo energético actual entra en conflicto con las exigencias medioambientales transmitidas por la Unión Europea. Entre ellas se encuentran la disminución de las emisiones de gases de efecto invernadero en primer lugar, y en segundo lugar el aumento de la presencia de fuentes de energía renovables, en la línea de trabajo de la normativa internacional UNE-EN-ISO 14064 de emisiones de gases que producen efecto invernadero.

Debido a que el sistema de energía eléctrica es diferente en cada isla, se ocasiona que también exista diferencia en el factor de contaminación para la producción de agua. Por esta razón, se realiza una técnica para la estimación de un factor más adecuado a la realidad en cada isla. Una reducción del consumo energético va a repercutir directamente en una mejora medio ambiental por medio de la huella del carbono que producen estas plantas desalinizadoras y de la huella ecológica de las mismas. Del mismo modo, el m³ de agua producido en una isla determinada produce una huella ecológica diferente a la de otra isla, debido a que sus factores de contaminación también lo son.

En la actualidad hay más de cien millones de habitantes que consumen agua desalinizada y un caudal producto diario de casi veinticinco millones de metros cúbicos. En España se instaló la planta desaladora más temprana en 1965, fue situada en Lanzarote (sistema MSF, 2500 m³/día), y actualmente existen cientos de ellas en todo el país [1-2].

El agua consumida a nivel mundial se ha multiplicado por tres en la segunda mitad del siglo XX hasta la actualidad que se abastecen más de 4300000 hm³/año. En total el caudal de agua consumida se multiplicó por 6 a nivel global desde principios a finales del siglo pasado [1].

A causa de que el agua contaminada es también un problema que ocasiona muchas enfermedades y la escasez de agua potable, la ONU fijó como objetivo para la cobertura de saneamiento en un 75% de acceso para la población en todo el mundo, cifra que a día de

hoy no se ha alcanzado, pero se ha mejorado, alcanzando un valor del 69% frente al 54% que tenía la población en el año 1990 [1, 2].

Como aportación necesaria para alcanzar este objetivo de la ONU para el acceso al agua potable y de saneamiento de la población, añadido al aumento del consumo de agua en la industria, nos encontramos el proceso de desalinización de aguas de mar y salobres de pozo para cubrir las necesidades.

En España se instaló la primera planta desalinizadora de agua de mar en 1964 en Lanzarote [1], con un sistema de compresión de vapor. El consumo energético era muy elevado, entre 15 y 18 kWh/m³, y su producción de 500 m³/día, por lo que el permeado obtenido tenía un alto coste económico, más de 1,2 EUR/m³.

Las reservas de agua a nivel mundial se están reduciendo debido al crecimiento de la población y al cambio climático. La Universidad de California ratifica todo ello con estudios que demuestran que un tercio de las aguas subterráneas de la Tierra se han agotado entre 2003 y 2013 debido al consumo humano [3-4].

Hasta ahora, en el siglo XXI, los esfuerzos de investigación en la desalinización de agua se han centrado en los avances en las membranas de ósmosis inversa, con mayor superficie y menor consumo de energía, así como en los sistemas de recuperación de energía para recuperar la presión de la salmuera e introducirla en el sistema reduciendo el consumo de energía del proceso de desalinización. Se ha estudiado detalladamente el funcionamiento, mantenimiento y manejo de las membranas por su importancia en el ahorro de energía, mostrando cómo optimizar todos los procesos en los que intervienen para mejorar la ^{eficiencia} energética [1-4].

En una planta para el tratamiento de aguas potables el consumo energético está entre 0,1 y 1 kWh/m³ [5-6]. En una planta desaladora por ósmosis inversa (OI) dicho consumo es el mayor coste de operación, siendo éste en torno al 70% de los costes de la explotación [7]. Por tanto, debido a que el consumo de una planta desalinizadora es más elevado en que en una ETAP convencional, se justifican los esfuerzos investigadores en la reducción del mismo. El consumo energético existente en las instalaciones desaladoras de OI tuvo una evolución reciente muy cambiante en los últimos 10-20 años.

De hecho, ha habido un gran salto del paso de las tecnologías térmicas hacia la OI en desalinización de agua de mar, introduciendo tecnologías de membrana de menor consumo pasando de consumos entre 20 y 25 kWh/m³ en 1970 a 4 y 5 kWh/m³ en 2005 [5, 8-9].

Entre los procesos de desalinización de aguas industrialmente más importantes podemos destacar los siguientes:

- Compresión de Vapor (CV) / Destilación Súbita Flash (MSF) / Destilación Multiefecto (MED): (Agua de mar)
 - Consumo Energético 15 – 20 kWh/m³ de agua producida
- Electrodiálisis Reversible / EDR: (Agua salobre)
 - Consumo Energético en agua salobre depende de la salinidad de alimentación
- Ósmosis Inversa: (Agua de mar y salobre)
 - Consumo Energético 2,5 - 4 kWh/m³ de agua producida, dependiendo de la salinidad de alimentación

La presión osmótica, fenómeno resultante de la diferencia de concentración de sales a través de una membrana semi-permeable, debe ser compensada antes de poder producir permeado en el sistema.

En la actualidad se ha conseguido reducir el consumo energético en las plantas introduciendo nuevas tecnologías de membranas de bajo consumo energético, mayor superficie de las mismas y con recuperación de la energía de la salmuera hasta llegar a valores inferiores a los 3 kWh/m³. Dicho consumo energético varía en función de distintos parámetros, tales como la temperatura del agua de alimentación, la salinidad de la misma, el envejecimiento de los elementos de OI, etc. Debido a ello, la inclusión o no de bombes de agua de alimentación a la instalación o del permeado a depósitos de agua potable influyen en la variabilidad de estudios y resultados de consumos energéticos publicados. De todas formas, estudios sobre algunas de las mayores plantas desalinizadoras del mercado confirman consumos de entre 3,52 y 4,30 kWh/m³ [10], para plantas de tamaño intermedio de entre 4 y 6 kWh/m³ [11]. Finalmente, artículos más recientes confirman el continuo descenso del consumo energético desde valores de entre 3 y 4 kWh/m³ [12] hasta consumos de 2,5 kWh/m³ [5] en la actualidad.

Proyecto Singular: Desarrollo de una metodología para el estudio de la eficiencia energética en plantas de desalinización por ósmosis inversa de agua de mar.

El ahorro energético lo podemos conseguir también a corto plazo modernizando las plantas desalinizadoras actuales, con recuperadores de energía, que sustituyen a las turbinas francis o pelton de plantas antiguas. De esta manera conseguimos reducir el consumo de la desalinización de agua de mar considerablemente haciéndolo cada vez más competitivo, que asegure el abastecimiento a la población, ya que el 98% del agua a nivel mundial se encuentra en los océanos y se convierten en fuente prácticamente inagotable reserva de agua para la población [13-15].

Por otro lado, en las Islas Canarias muchas instalaciones turísticas con plantas desaladoras para su propio consumo que pueden introducir todas estas mejoras y repercutir en la economía local de forma considerable desde el punto de vista energético y medioambiental.

En este sentido, se estudia la eficiencia energética de estos sistemas teniendo en cuenta el mix energético actual, las emisiones de CO₂ producidas, la huella ecológica y la concienciación del destinatario [16-17].

Las aplicaciones más significativas de los procesos de desalinización son los siguientes:

- Desalinización de agua de mar para abastecimiento público y regadío.
- Desalinización de agua salobre para abastecimiento público y regadío.
- Desalinización en terciarios de depuración de aguas residuales para regadío.
- Potabilización de aguas para consumo humano.
- Procesos Industriales: Concentrado de glucosa, café, vino, zumo, etc...
- Procesos sanitarios: agua destilada, diálisis, etc...

Todas estas aplicaciones se llevan a cabo con membranas de ósmosis inversa, y el mayor consumo de energía aparece en la desalinización de agua del mar que es objeto de la presente tesis. Dependiendo de cada aplicación hay membranas de ósmosis inversa más adecuadas para cada caso, por lo que debemos realizar una serie de acciones para la toma de decisión sobre la membrana más adecuada asociada a la eficiencia energética de la instalación, principalmente si se trabaja con agua de mar. Por ello debemos disponer de una instrumentación adecuada y hacer pilotajes en cada planta para poder escoger la membrana idónea, ya que es un coste muy alto el que representa el cambio de membranas en una instalación y repercute aún más en la reducción del coste energético de la misma,

influenciado directamente por el tipo de membrana escogida, siempre que se cumpla con la calidad requerida de agua producto [16-17].

Se nos plantea el problema del envejecimiento de las membranas en una planta desalinizadora, lo que supone un aumento de la presión de trabajo, y por tanto del consumo energético, un empeoramiento de la calidad y/o disminución del caudal de permeado con el tiempo [16].

En este sentido, el envejecimiento de las membranas y la degradación de las mismas afecta a la producción de agua desalinizada, la calidad de ésta, el rechazo de boro que es muy exigente en la legislación actual vigente en la Unión Europea y de una manera importante al consumo energético de la instalación. Por ello, se debe tener presente la elección adecuada de las membranas para no equivocarse en una inversión tan importante para la planta, que supone un coste muy alto en la misma y las herramientas de toma de decisión son complicadas.

Es importante estudiar los avances tecnológicos en las membranas de ósmosis inversa ya que están en un continuo proceso de I+D+i y cada vez son más las ventajas que nos ofrecen estos modelos de última generación. Actualmente ya se suministran membranas de bajo consumo energético para agua de mar, que mantienen el rechazo de sales y boro necesario para cumplir los requisitos de calidad de agua, y pueden suponer un ahorro muy considerable de costes de operación para la instalación, sobre todo en cuanto al consumo energético de la misma [17-20].

La operación con elementos de OI de alto rechazo a altas presiones de trabajo supone un mayor consumo energético del sistema y por tanto un aumento del coste económico. El coste y la energía requerida en el proceso dependen de la calidad exigida y del tipo de membrana utilizada. El estudio de elementos estándar de OI para una instalación desaladora de agua del mar ayuda a escoger un elemento de ósmosis inversa que disminuya el consumo energético, y por ende los costes operativos de la planta ya que la energía es lo más costoso de la misma. Dentro del coste total de la producción de agua lo que más influye es la energía consumida y el tipo de membrana de ósmosis inversa escogida [16-17].

De esta manera se plantea la cuestión de cambiar las membranas, aunque no hayan llegado al final de su vida útil, si el cambio de las mismas supone una mejora considerable y disminuyen de forma importante los costes energéticos, lo cual hace más rentable cambiar

las membranas antes de tiempo que dejarlas operando por un período más. La toma de decisión sobre realizar este cambio o no, incluso antes del final de la vida útil de las membranas, se refleja en los resultados a pequeña escala en un pilotaje insitu, con el agua de alimentación de la planta diferente en cada caso, para hacer después la inversión a gran escala de la planta, una vez se haya comprobado el buen funcionamiento de las membranas y lo positivo del cambio en las mismas, evitando riesgos de equivocarnos en una inversión de tal magnitud. De hecho, existen en el mercado diferentes fabricantes de elementos de OI de agua marina a contrastar, entre otros los más importantes son Dow Filmtec recientemente absorbida por Dupont, Hydranautics, LG y Toray. Por ello es importante hacer pilotajes, si es posible con distintos modelos de membranas para elegir con certeza sin aventurarnos a una elección potencialmente errónea, y probarlas el tiempo que se considere necesario para tomar la decisión más adecuada sobre el cambio de las mismas [17].

Se desarrolla un método para la valoración de la eficiencia energética en las plantas desalinizadoras. Se utiliza una serie de dimensiones: energía, huella de carbono, huella ecológica, calidad de agua y pilotajes para evaluar la operación de nuevas membranas u otros elementos de la planta.

6.OBJETIVOS

Por tanto, se pueden considerar los dos objetivos principales de este trabajo para la toma de decisión de actuaciones asociadas con la Eficiencia Energética.

Objetivo 1: Metodología de análisis de la eficiencia energética de las plantas desalinizadoras, desde el punto de vista de las emisiones producidas, la huella de carbono y ecológica del sistema, donde se desarrolla un modelo para ello.

Se trata de introducir mejoras energéticas en los procesos de OI para plantas desalinizadoras de agua marina que sea válido para cualquier instalación de agua de mar del mundo.

Este estudio puede servir para la toma de decisiones en los procesos relacionados con la mejora de la eficiencia energética en las plantas de ósmosis inversa de agua de mar. Se estudian las mejoras en la desalinización del agua de mar, basadas en la reducción del consumo de energía en la producción de agua dulce. En consecuencia, el proceso de OI es

Proyecto Singular: Desarrollo de una metodología para el estudio de la eficiencia energética en plantas de desalinización por ósmosis inversa de agua de mar.

el más adecuado por tener un consumo de energía más bajo por metro cúbico de agua producida, por lo que ocupa una posición privilegiada en el sector.

Mediante el análisis del factor mix de emisiones se puede establecer una metodología de cálculo para el cálculo de la huella de carbono del mix energético en un período de tiempo de referencia, teniendo en cuenta la sumatoria de las energías de cada tecnología y el factor mix de emisiones de cada una de ellas.

Dentro de la metodología propuesta se ha establecido la determinación de la producción de agua por isla en función del factor de emisiones de cada territorio y teniendo en cuenta que se trata de sistemas eléctricos aislados.

El factor de contaminación asociado a la producción de agua es diferente en cada isla debido a que se trata de sistemas eléctricos aislados y el mix energético del sistema de energía eléctrica es distinto. Por ello, se ha establecido una metodología asociada a cada isla.

Objetivo 2: Diseño e implementación de pilotajes en plantas desalinizadoras, de forma sistemática, para evaluar las mejoras energéticas en los procesos de desalinización de aguas.

En este sentido, se propone la realización de pilotajes a medida según la situación para la toma de decisión acertada y la ejecución de la inversión con el mínimo riesgo. Por ello se lleva a cabo en estos pilotajes una valoración del Boro, calidad de aguas, un análisis diagnóstico de la energía, huella del carbono, huella ecológica, sostenibilidad ambiental y costes de operación y mantenimiento.

7.DESCRIPCIÓN

El envejecimiento de las membranas es un factor decisivo con respecto a la energía que se consume en la planta, al caudal de agua permeada y a las emisiones producidas. Por ello, se establece una metodología de estudio para tomar decisiones sobre ello.

La toma de decisión del cambio de membranas es muy importante para la vida útil de las instalaciones y se deben tener en cuenta múltiples variables para ello, tales como la presión de trabajo, la calidad del agua de alimentación y de permeado del sistema de ósmosis inversa, la conversión, la temperatura, etc.

Proyecto Singular: Desarrollo de una metodología para el estudio de la eficiencia energética en plantas de desalinización por ósmosis inversa de agua de mar.

Con la introducción de membranas de última generación de bajo consumo energético y alto rechazo de sales podemos producir agua con la calidad requerida en condiciones más eficientes y sostenibles que con membranas estándar.

En el presente proyecto singular se ha desarrollado una metodología de análisis para la valoración de la eficiencia energética de las desaladoras de agua de mar, mediante una serie de dimensiones tales como: la energía, la huella de carbono, la huella ecológica, la calidad de agua y los pilotajes para evaluar la operación de nuevas membranas en planta. En este sentido, se pueden exponer las siguientes conclusiones:

- La operación con elementos de OI de alto rechazo a altas presiones de trabajo supone un mayor consumo energético del sistema y por tanto un aumento del coste económico.
- El coste y la energía requerida en el proceso dependen de la calidad de agua exigida y del tipo de membrana utilizada.
- El estudio de elementos estándar de OI para una desaladora de agua marina ayuda a escoger un elemento de ósmosis inversa que disminuya el consumo energético, y por ende los costes operativos de la planta ya que la energía es lo más costoso de la misma.
- Dentro del coste total de la producción de agua lo que más influye es la energía consumida y el tipo de elemento de OI escogida.
- El envejecimiento de las membranas es un factor decisivo con respecto a la energía consumida en la planta, al caudal de agua permeada y a las emisiones producidas. Por ello, se establece una metodología de estudio para tomar decisiones sobre ello.
- La toma de decisión del cambio de membranas es un parámetro muy significativo en la vida de la instalación y se deben tener en cuenta múltiples variables para ello, tales como la presión de trabajo, la calidad del agua de alimentación y el permeado del sistema de ósmosis inversa, la conversión, la temperatura, etc.
- Con la introducción de membranas de última generación de bajo consumo energético y alto rechazo de sales podemos producir agua con la calidad requerida en condiciones más eficientes y sostenibles que con membranas estándar.
- Mediante el análisis del factor mix de emisiones se puede establecer una metodología de cálculo para estimar la huella del carbono del mix energético en el período

de tiempo de referencia, teniendo en cuenta la sumatoria de las energías de cada tecnología y el factor mix de emisiones de cada una de ellas.

- Dentro de la metodología propuesta se ha establecido la determinación de la producción de agua por isla en función del factor de emisiones de cada territorio y teniendo en cuenta que se trata de sistemas eléctricos aislados.

- El factor de contaminación asociado a la producción de agua es diferente en cada isla debido a que se trata de sistemas eléctricos aislados y el mix energético del sistema de energía eléctrica es distinto. Por ello, se ha establecido una metodología asociada a cada isla.

- El factor de contaminación de la producción de agua en Canarias es distinto a la Península o el Continente de 0,2628 kgCO₂/kWh, siendo el valor medio en Canarias de 0,6776 kgCO₂/kWh con los siguientes valores por islas de menos a más: El Hierro 0,3561 kgCO₂/kWh, La Palma 0,5877 kgCO₂/kWh, Lanzarote 0,6267 kgCO₂/kWh, La Gomera 0,6466 kgCO₂/kWh, Fuerteventura 0,6878 kgCO₂/kWh, Gran Canaria 0,6881 kgCO₂/kWh y Tenerife 0,6886 kgCO₂/kWh.

- Debido a que el sistema de energía eléctrica es diferente en cada isla, se ocasiona que también exista diferencia en el factor de contaminación para la producción de agua. Por esta razón, se realiza una técnica para la estimación de un factor más adecuado a la realidad en cada isla.

- Una reducción del consumo energético va a repercutir directamente en una mejora medio ambiental por medio de la huella del carbono que producen estas plantas desalinizadoras y de la huella ecológica de las mismas.

- Del mismo modo, el m³ de agua producido en una isla determinada produce una huella ecológica diferente a la de otra isla, debido a que sus factores de contaminación también lo son.

- Los resultados en la huella de carbono de la Península son inferiores al de todas las Islas Canarias, debido principalmente al valor más reducido del factor mix de Península. En este sentido, la huella de carbono del agua producida en Canarias es de 3,9162 kgCO₂/m³ frente a 0,7576 kgCO₂/m³ de la Península, siendo por ejemplo el caso más desfavorable en las islas de Tenerife y Gran Canaria con 3,9798 kgCO₂/m³ y 3,9769 kgCO₂/m³ respectivamente.

- En cuanto a la huella ecológica del agua producida los resultados son similares, siendo en la Península $3,7122 \text{ m}^2/\text{m}^3$ y en Canarias $19,1893 \text{ m}^2/\text{m}^3$, donde los casos más desfavorables se encuentran igualmente en Tenerife y Gran Canaria con $19,5008 \text{ m}^2/\text{m}^3$ y $19,4867 \text{ m}^2/\text{m}^3$ respectivamente.
- En el caso de la huella ecológica por habitante, se consideran residentes y turistas por separado. La huella ecológica por turista al año debido a su consumo de agua en el menor de los casos es en la isla de El Hierro con $0,0087 \text{ m}^2$ mientras que el mayor valor se encuentra en Gran Canaria con $0,0388 \text{ m}^2$. En cuanto a la huella ecológica por residente al año, el menor de los casos se encuentra también en la isla de El Hierro con $0,2603 \text{ m}^2$ mientras que el mayor valor se encuentra en Fuerteventura con $0,5925 \text{ m}^2$.
- La introducción de un pilotaje por OI en una planta desalinizadora de agua marina, cuyos consumos energéticos son muy altos y la salinidad de entrada es mayor que para el tratamiento de otros tipos de agua, es fundamental para optimizar sus recursos. De ahí la necesidad de la realización de un análisis para la valoración de la eficiencia energética de las mismas.
- En este sentido se desarrolló un modelo específico para identificar la calidad del agua según la operación, asociado a la concentración de boro en la instalación desaladora del Canal de Alicante 1.
- Del mismo modo, basados en la experiencia de la prueba piloto en la planta desalinizadora de Carboneras se concluye la necesidad de la realización de pilotajes insitu (medición de temperaturas, conductividades, boro, caudales, presiones, etc.), que conduzcan a comparar el rendimiento de las membranas de diferentes fabricantes para recopilar la información necesaria, y basar las futuras decisiones en relación con los reemplazos y actualizaciones en planta con las nuevas membranas existentes en el mercado.

En cuanto a las líneas futuras a desarrollar a partir de este estudio se pueden destacar las siguientes:

- Las emisiones totales asociadas a la producción del agua en las plantas desalinizadoras dependen de la relación entre la fracción renovable y no renovable del sistema eléctrico del que se consume la energía para las plantas, y de la energía renovable que se produzca por la propia instalación. Por ello, se plantea la inclusión de energías

renovables en cierta tipología de plantas que puedan reducir la huella de carbono y ecológica de las mismas introduciendo preferentemente energía solar fotovoltaica, energía eólica e incluso sistemas basados en hidrógeno.

- Se sugiere, antes de hacer una inversión considerable en membranas, la realización de un estudio de pilotajes a pequeña escala de una membrana o un tubo de membranas, en las condiciones de trabajo de cada planta, para asegurarnos el buen funcionamiento de las mismas y el éxito cuando se vaya a llevar a cabo a nivel industrial la instalación evaluando energéticamente y económicamente previamente el sistema.

- Se puede implementar también dentro de la metodología establecida el estudio de la producción de agua distribuida en plantas pequeñas y localizadas en el lugar de la demanda, ya que puede ser más eficiente en algunos escenarios de trabajo que una producción concentrada en una planta pública. En este sentido, con una producción de agua distribuida la introducción de energías renovables insitu, tanto eólica como solar, es más flexible y evitamos el problema del transporte de energía eléctrica e incluso el transporte de agua. De esta forma se reducen los costes, las emisiones de CO₂ y la huella ecológica.

8. BIBLIOGRAFÍA

[1] Instituto Nacional de Estadística (INE). “Estadísticas e Indicadores del Agua” (2008).

[2] OMS. Informe de la Organización Mundial de la Salud, Agua potable y Saneamiento (2012).

[3] AS Richey, BF Thomas, MH Lo, JS Famiglietti, S Swenson, M Rodell, “Uncertainty in global groundwater storage estimates in a Total Groundwater Stress framework”. Water Resources Research Vol 51-7 (2015) 5198-5216

[4] AS Richey, BF Thomas, MH Lo, JT Reager, JS Famiglietti, K Voss, S Swenson, M Rodell, “Quantifying renewable groundwater stress with GRACE”. Water Resources Research Vol 51-7 (2015) 5217-5328

[5] VG Gude, “Desalination and Sustainability – An Appraisal and Current Perspective”. Water Research (2105), doi: 10.1016/j.watres.2015.11.012

- [6] M Amado, J Sanchis, JG Castillo, M Bartolome, J Cabero, A Castillo, “Censo de ETAPs Españolas: análisis de problemáticas, líneas de tratamiento y costes de explotación” XXXIII Jornadas Técnicas Asociación Española de Abastecimiento de agua y Saneamiento (2014) Burgos. <http://www.aeas.es/servlet/mgc>
- [7] MK Wittholz, BK O’Neill, CB Colby, D Lewis, “estimating the cost of Desalination plants using a cost database”. Desalination 229 (2008) 10-20
- [8] JJ Sadhwani, JM Veza, “Desalination and energy consumption in Canary Islands”. Desalination 221 (2008) 143-150
- [9] F Martín, JM Sánchez, “Mejora de la eficiencia energética de las plantas desaladoras: nuevos sistemas de recuperación de energía”. Ingeniería y territorio 72(2005) 74-79
- [10] E Lapuente, “Full cost in desalination. A case study of Segura River Basin”. Desalination 300 (2012) 40-45
- [11] A Al-Karaghoul, “Energy consumption and water production cost of conventional and renewable-energy-powered desalination processes”. Renewable and Sustainable Energy Reviews 24 (2013)343-356
- [12] N Ghaffour, TM Missimer, GL Amy, “Technical review and evaluation of the economics of water desalination: current and future challenges for better water supply sustainability”. Desalination 309 (2013) 197-207
- [13] WaterReuse Association. “Seawater desalination power consumption” (2011).
- [14] Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía. “Estudio prospectiva: Consumo energético en el Sector Agua” (2010).
- [15] Borja Montaña Sanz. “Análisis económico de la desalinización” (2011).
- [16] F. A. León, A. Ramos. “Analysis of high efficiency membrane pilot testing for membrane design optimization”. Desalination and Water Treatment 73 (2017) 208–214 April
- [17] A. Ruiz-García, F.A. León, A. Ramos-Martín, “Different boron rejection behavior in two RO membranes installed in the same full-scale SWRO desalination plant”. Desalination (2018), <https://doi.org/10.1016/j.desal.2018.07.012>