

PERSPECTIVAS SOBRE EL APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO DE LOS GRADIENTES SALINOS EN LAS COSTAS MEXICANAS

Cecilia Enríquez¹, Xavier Chiappa¹, Mateo Roldán^{1,2}, Etzaguery Marín-Coria³

¹Unidad Multidisciplinaria de Docencia e Investigación Sisal, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México, Puerto de Abrigo, S/N, C.P. 97356, Sisal, Yucatán. cenriqz@ciencias.unam.mx

²Posgrado en Ingeniería Química, Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas, Medellín, Colombia.

³Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito Escolar s/n, Ciudad Universitaria, Ciudad de México.

RESUMEN

Al ponerse en contacto dos masas de agua que tienen diferente salinidad (gradiente salino) se libera una gran cantidad de energía en su afán por mezclarse. Esto sucede continuamente en la naturaleza, principalmente cuando los ríos desembocan al mar. Si las mareas son pequeñas y la descarga del río tiene un volumen considerable, los gradientes son más estables y se minimiza la mezcla que los destruye. México tiene un régimen micromareal, cuenta con numerosas desembocaduras de ríos y lagunas costeras expuestas a elevadas tasas de evaporación. En estas últimas, si el aporte de agua continental es escasa, pueden generarse condiciones hipersalinas. Uno de los objetivos del CEMIE-Océano es realizar estudios que analicen los gradientes de salinidad como un recurso energético cuantificando los gradientes salinos y su variabilidad en distintos sitios de México. Aunque al día de hoy no existe una tecnología que permita la generación de energía a partir de gradientes de salinidad a un costo rentable, conocer el potencial de este recurso en sitios como México podría atraer la atención del mundo del desarrollo tecnológico que eficiente los procesos de obtención de energía del gradiente salino.

Palabras clave: RED, diferencia de salinidad, energía azul

1. INTRODUCCIÓN

La tendencia mundial de la población crece desmesuradamente. De 1990 al 2100, se ha pronosticado una duplicación en el número de habitantes y hay claros indicios de una tendencia migratoria poblacional hacia las costas. De igual forma crece la demanda de recursos naturales y de servicios básicos por parte de sus habitantes, que tienen que ser suministrados, gran parte de los cuales requieren energía.

Actualmente la generación de energía es en su mayoría por fuentes de combustibles fósiles, los cuales son finitos y dañinos para el planeta. Por ello, hay un creciente impulso de investigar formas alternativas de energía, que sean renovables y que en el proceso de obtención sean consistentes con el funcionamiento holístico del planeta.

Las principales formas de energía del océano, susceptibles de ser aprovechadas para la producción de electricidad son: a) corrientes marinas y de mareas, b) mareas, c) oleaje, d) gradientes térmicos y e) gradientes salinos. Estas fuentes de energía no se encuentran distribuidas uniformemente en el mundo, por lo que cada país y región se encuentra en la necesidad de evaluar la disponibilidad de energía de cada tipo, para enfocar sus esfuerzos en aquellas y así obtener una mejor relación costo-beneficio.

Los gradientes de temperatura y salinidad en ambientes costeros son probablemente los menos estudiados y explorados como fuentes de energía marinas renovables. Al ponerse en contacto dos masas de agua que tienen diferente salinidad (gradiente salino) se libera una gran cantidad de energía en su afán por mezclarse. Esto sucede continuamente en la naturaleza, principalmente cuando los ríos (con salinidad cercana a cero) desembocan al mar (cuya salinidad es alrededor de 35 g/l). Mientras mayor es la diferencia de salinidad entre ambas masas de agua y menor es la distancia a la que ocurren esas diferencias, mayor será el gradiente de salinidad.

Para que los gradientes de salinidad perduren es necesario que los procesos que favorecen la mezcla de las masas de agua en el sitio sean mínimos. Tanto el mar como la atmósfera pueden contribuir a que el agua se mezcle. El viento y las mareas son factores que favorecen la mezcla, lo que destruye los gradientes salinos rápidamente. Si las mareas son pequeñas y la descarga del río tiene un volumen considerable, los gradientes son más estables y se pueden formar capas donde el agua dulce, menos densa, fluye hacia el mar deslizándose sobre agua salada, que tiene mayor densidad y que fluye por el fondo hacia el continente (Figura 1).

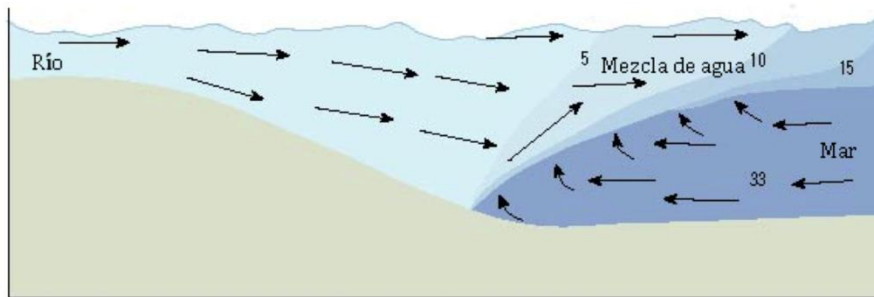


Figura 1 Esquema de masas de agua en una desembocadura de río hacia el mar. El agua dulce fluye hacia el mar deslizándose sobre el agua salada que ingresa por el fondo en una "cuña salina" río arriba.

En países como México, por su localización geográfica y sus características climáticas y oceanográficas, numerosos sistemas costeros naturalmente desarrollan importantes y pronunciados gradientes de salinidad. Además de contar con ríos y sistemas lagunares costeros, las características atmosféricas y oceanográficas del País pueden ser favorables para que este sea un recurso prometedor para en el país.

Sin embargo, los sitios donde se desarrollan gradientes pronunciados de salinidad en el mundo son zonas que permiten la vida de un amplio rango de especies y por lo tanto, tienen un alto valor ecológico y juegan papeles muy importantes en los procesos costeros y marinos. Por ello, es imprescindible conocer a fondo las características físicas y ambientales de estos sistemas y su funcionamiento para evitar consecuencias negativas y minimizar los efectos de la utilización de sus recursos. La meta es diseñar el balance entre el uso de los espacios marinos para energía, pesca, acuicultura y turismo sin alterar a los ecosistemas.

Al día de hoy no existe una tecnología que permita la generación de energía a partir de gradientes de salinidad a un costo rentable. Sin embargo, hay que destacar que el mundo del desarrollo tecnológico no ha puesto sus ojos en este recurso. Los gradientes salinos se desarrollan naturalmente en las zonas costeras, y es precisamente en estos sitios donde es más costoso y complicado el suministro de energía a poblaciones remotas, pequeñas, con altos grados de corrosión. Por ello, es importante evaluar el recurso y su variabilidad ya que podría ser una opción de "micro-generación", que provea energía localmente en algunas regiones costeras.

En esta contribución se describe la forma en que se calcula el potencial de energía por gradientes salinos en la siguiente sección, seguida por la descripción de los principales métodos existentes para la obtención de energía de este recurso; a continuación se describen las características de México que lo señalan como un sitio favorecido naturalmente para el desarrollo de gradientes de salinidad y su riqueza natural en los ambientes que los desarrollan.

2. CALCULO DEL POTENCIAL DE ENERGÍA POR GRADIENTES DE SALINIDAD

Se le llama gradiente salino a la mezcla que se da de manera natural entre dos masas de agua con diferentes concentraciones de sal, la cual genera una liberación de energía libre impulsada por el diferencial químico entre ellas. Si se controla la mezcla, este potencial químico puede utilizarse para generar electricidad y es considerada una energía completamente limpia ya que no genera gases de efecto invernadero y es completamente renovable, ya que la mezcla que se da entre dos masas de agua es parte del ciclo natural hidrológico del planeta.

Para calcular teóricamente el potencial se utiliza la ecuación de la energía libre de Gibbs, la cual es una resta entre las diferentes masas de agua que participan en la mezcla.

$$\Delta G_{mix} = G_m - (G_c + G_d) \quad (1)$$

Donde G_c , G_d y G_m es la energía libre de Gibbs de las soluciones concentrada, diluida y mezclada respectivamente, la energía libre de Gibbs se define como (2):

$$G = \sum_i^s \mu_i n_i \quad (2)$$

Donde μ_i es el potencial químico de las especies i^{th} y n_i es el número de moles de especies i^{th} de un sistema con un número total de s especies.

Por cada temperatura T y presión P dada, el potencial químico del disolvente i es definido como:

$$\mu_i = \mu_i^* + RT \ln \gamma_i x_i \quad (3)$$

Donde μ_i^* es el potencial químico del disolvente puro i , γ_i el coeficiente de actividad del disolvente i , y x_i es la fracción molar del disolvente i .

Para el caso de un soluto i con una temperatura T y una presión P dadas, el potencial es definido como:

$$\mu_i = \mu_i^\omega + RT \ln \gamma_i x_i \quad (4)$$

Donde μ_i^ω es el potencial químico del soluto i a dilución infinita, γ_i es el coeficiente de actividad del soluto i , y x_i es la fracción molar del soluto i .

La ecuación 1 se puede reescribir sobre las bases de las ecuaciones 2 y 4, conduciendo a:

$$\begin{aligned} \Delta G_{mix} &= \sum_i^s (G_{i,m} - (G_{i,c} + G_{i,d})) \\ &= \sum_i^s ((n_{i,c} + n_{i,d}) RT \ln x_{i,m} \gamma_{i,m}) - (n_{i,c} RT \ln x_{i,c} \gamma_{i,c} + n_{i,d} RT \ln x_{i,d} \gamma_{i,d}) \end{aligned} \quad (5)$$

El número de moles n_i de las especies i^{th} puede ser expresado en términos de la concentración molar c_i , como sigue:

$$n_i = c_i \cdot V \quad (6)$$

Donde V es el volumen total del sistema con un número s de especies. Lo que lleva a:

$$\sum_i^s n_i = \sum_i^s c_i \cdot V = n_{tot} = c_{tot} V \quad (7)$$

Donde n_{tot} y c_{tot} son el número total de moles y la concentración total del sistema, respectivamente.

Así la ecuación 5 puede ser reescrita sustituyendo el número de moles n_i , con la concentración c_i , de acuerdo a la ecuación 6, como:

$$\Delta G_{mix} = \sum_i^s (c_{i,m} V_m RT \ln(x_{i,m} \gamma_{i,m})) - ((c_{i,c} V_c RT \ln(x_{i,c} \gamma_{i,c})) + c_{i,d} V_d RT \ln(x_{i,d} \gamma_{i,d})) \quad (8)$$

Esta última ecuación puede ser utilizada para el cálculo de la energía libre de Gibbs que se produce de la mezcla de dos soluciones con diferentes niveles de salinidad. Dicha fórmula se basa en el promedio de salinidad entre dos soluciones con distinta concentración, sin embargo, recientes investigaciones toman en cuenta otras consideraciones para hacer más realista el cálculo de la energía extraíble del gradiente salino.

Sin embargo, diferentes autores han realizado una estimación del potencial mundial de generación de energía por gradiente salino, y existen diferencias sustanciales entre sus resultados. En la tabla 1 se presentan resultados de estas estimaciones.

Tabla 1 Estimación del potencial energético mundial por gradientes de salinidad

autor	año	energía teórica estimad (TW)
Isaacs & Seymour	1973	1.4
Wick and Schmitt	1976	2.6
Aaberg	2004	0.23
Kulezco	2009	1.72
Stenzel & Wargen	2010	3.16
Alvarez-Silva, Osorio & Winter	2016	1.62

3. MÉTODOS PARA LA OBTENCIÓN DE ENERGÍA POR GRADIENTES DE SALINIDAD

La tecnología para generar energía eléctrica por gradiente salino esta en constante innovación e investigación y se encuentra en etapas muy tempranas de desarrollo y se dividen de acuerdo a los distintos procesos mediante los cuales puede obtenerse energía: (1) Procesos de intercambio iónico, (2) Procesos osmóticos, (3) Procesos de mezcla directa, (4) Procesos de adsorción y desorción (5) procesos basados en la diferencia de presión de vapor.

En los *procesos de intercambio iónico*, el mecanismo encargado del cambio de concentración en dos corrientes con diferentes valores de salinidad es el transporte de iones (cationes y aniones).

Al día de hoy, los dos métodos más explorados son la técnica de electrodiálisis inversa (técnica de intercambio iónico) y la técnica de ósmosis inversa.

○ Método por electrodiálisis inversa (RED).

En este método, el agua fluye entre membranas catiónicas y aniónicas (membranas ion-selectivas) colocadas de forma alternada a modo de batería o acumulador. Los aniones Cl⁻ de la sal sólo pueden pasar a través de la membrana de intercambio de aniones, mientras que los cationes Na⁺ sólo a través de la membrana de intercambio de cationes. Como resultado surge un voltaje por la diferencia de cargas positivas y negativas, similar a una batería y así generar corriente eléctrica (*Figura 2*).

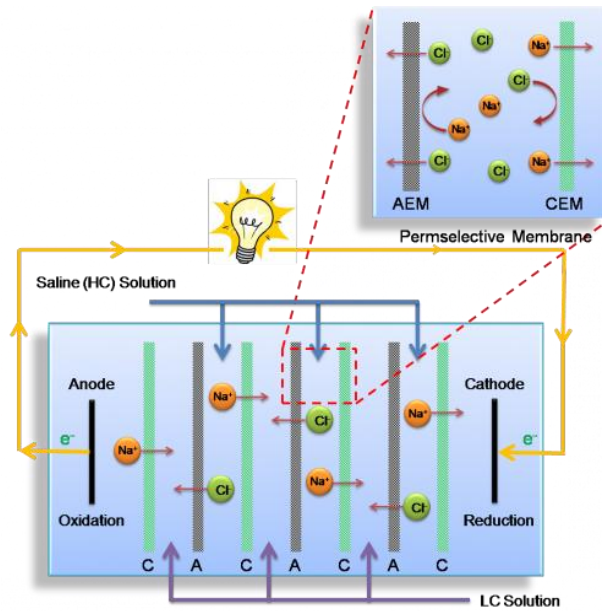


Figura 2 Esquema de funcionamiento del proceso de generación de energía por gradientes de salinidad mediante el método de Electrodialisis Inversa (RED). [Tomada de *The Elixir of Life: Generating Electricity from Water*, 2013. <http://www.yalescientific.org/2013/02/the-elixir-of-life-generating-electricity-from-water/>]

○ **Método de ósmosis por presión retardada (PRO).**

Este método consiste en poner en contacto dos fluidos con diferentes concentraciones de salinidad, entre los que se coloca una membrana semipermeable que permite el paso del agua, pero no de las sales. El agua dulce fluye a través de la membrana hacia una cámara que contiene el agua salada incrementando la presión en ella y la cual puede ser empleada para impulsar una turbina y generar así la electricidad (Figura 3).

Para esta tecnología existen varios retos, dos de los más importantes son lo costoso del tratamiento de agua para llevar a cabo el proceso, ya que siendo agua de sistemas naturales, es necesario someterlas antes de ingresar al sistema a un proceso de limpieza ya que las membranas son delicadas y son propensas a sufrir de fouling. Otro reto es relacionado con las membranas y es en cuanto a su vida útil la cual hasta el momento es muy corta.

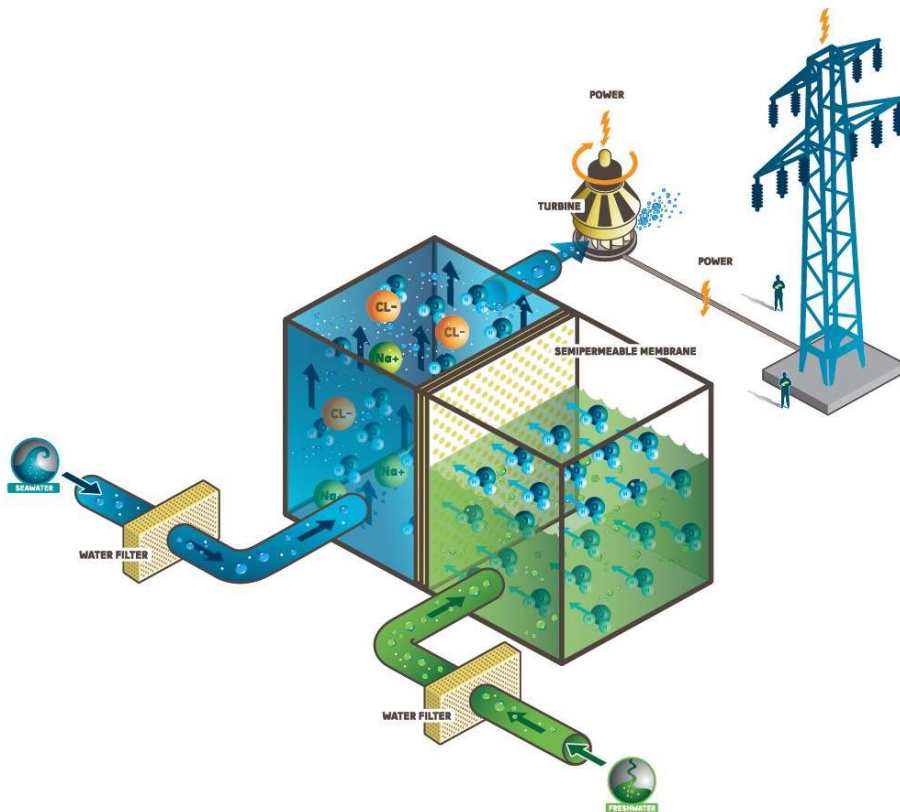


Figura 3 Esquema de funcionamiento del proceso de generación de energía por gradientes de salinidad mediante el método de Osmosis por presión retardada. [Tomada de Forward Osmosis Tech <http://www.forwardosmosistech.com>].

4. RECURSO ENERGÉTICO POR GRADIENTES SALINOS EN MÉXICO

México tiene numerosos ríos y un régimen de mareas muy pequeño comparado con otros sitios en el mundo, lo que es favorable para el desarrollo de gradientes de salinidad pronunciados. Además de contar con desembocaduras de ríos en la mayoría de sus litorales, es una de las regiones en el mundo que tiene numerosas lagunas costeras y en varias de ellas se generan condiciones hipersalinas. Esto se debe a que en el proceso de evaporación de agua marina, las sales disueltas en el agua que en forma de vapor se transfiere al aire, se quedan en el agua que permanece líquida aumentando la concentración de sales en un menor volumen de agua.

Tanto en zonas estuarinas como en lagunas costeras, la salinidad puede variar en períodos de horas, días, estaciones del año o entre años de forma natural. Esta variación es especialmente pronunciada en zonas costeras poco profundas, donde el volumen de agua es relativamente pequeño y el efecto de los fenómenos meteorológicos, más efectivo. Además, se prevén cambios acentuados en la salinidad de los sistemas acuáticos costeros asociados a los cambios meteorológicos ligados al Cambio Climático, consistentes en disminuciones de salinidad en latitudes altas (45-70 °N) y en un patrón de aumento en los trópicos y subtrópicos de ambos hemisferios. Se han identificado sistemas cuyas características señalan un alto potencial para la utilización del recurso natural de gradientes de salinidad para obtención de energía. Estos incluyen: (1) desembocaduras de ríos que descargan al Golfo de México, que tiene un régimen micromareal (minimizando la mezcla de los gradientes) y cuyo volumen de descarga y características de salinidad generan condiciones de estratificación importantes; (2) lagunas costeras con poco aporte de agua dulce situadas cerca de afluentes fluviales que descargan al mar (por lo que hay disponibilidad de agua dulce sin dilución importante en el sistema lagunar). Este tipo de sistemas se presentan mayormente en la costa occidental del país, en estados como Oaxaca, Guerrero y Chiapas; (3) lagunas costeras hipersalinas, en regiones donde el aporte fluvial no existe (por las características geológicas de la región) pero hay disponibilidad de agua dulce abundante que puede obtenerse directamente del acuífero. Este tipo de sistemas se presentan en regiones de sustrato kárstico donde la precipitación se infiltra y no se generan cauces de río sobre el terreno, como ocurren en la Península de Yucatán.

Uno de los objetivos del CEMIE-Océano es realizar estudios que analicen los gradientes de salinidad como un recurso energético. A través de proyectos en los que participan académicos de diferentes regiones costeras de México (UNAM-Sisal, ECOSUR-Chetumal, Universidad Veracruzana, Universidad del Mar-Puerto Angel, CICATA-Tamaulipas) y extranjeros (Universidad de Florida, E.U. y Universidad Nacional de Colombia) se pretende por primera vez evaluar el recurso energético por gradientes salinos que hay en el país y sus variaciones temporales. Con estos proyectos se generará la información que permita determinar cuál es el potencial para la generación de energía a partir de gradientes de salinidad en el país, cuál es su temporalidad y evaluar si es viable y conveniente como medio alternativo de producción de energía.

Sin embargo, los sitios donde se desarrollan gradientes de salinidad en el planeta son de un alto valor ecológico y constituyen ambientes que alojan numerosas especies. La supervivencia de un organismo en un área determinada depende de las condiciones ambientales que lo circundan y la salinidad ejerce un control directo sobre las comunidades acuáticas que se hallan en un ambiente determinado debido a que cada especie puede sobrevivir dentro de un intervalo específico de valores de este parámetro. Ya que los cambios en la salinidad del agua pueden generar cambios en las corrientes, también pueden tener efectos sobre la distribución del oxígeno disuelto y de los nutrientes, y consecuentemente en la distribución y abundancia de las especies, dando lugar cambios en la diversidad, en la respuesta funcional de los organismos y en el funcionamiento ecológico de los ecosistemas.

En este contexto, el conocimiento de los patrones de distribución de las comunidades bióticas que habitan en zonas con gradientes salinos marcados y su ecología proporciona información esencial para prever potenciales cambios asociados a las variaciones en las condiciones ambientales en el medio. Esto, a su vez, permitirá establecer cuáles especies tienen un mayor riesgo de afectación y definir espacios de atención prioritaria para la conservación de la biodiversidad. Por esto, otro de los objetivos del proyecto dentro del CEMIE-Océano es caracterizar la estructura y ecología de las comunidades bióticas de sitios costeros que, por sus características de salinidad, ofrecen posibilidades de tener alto potencial como fuente de energía por gradientes salinos.

5. CONCLUSIÓN

Los gradientes salinos son características que se desarrollan de forma natural en las zonas costeras orquestados por la combinación de diferentes procesos oceanográficos, continentales y atmosféricos. Tienen una variabilidad temporal importante tanto en escalas de horas (modulado por mareas), días (procesos de mezcla por viento), meses (estaciones climáticas como lluvias y secas) o mayores (p.e. condiciones planetarias extremas como el Niño o la Niña). Esta variación temporal, además de la variación espacial en la localidad donde se desarrollan los gradientes, debe cuantificarse para poder valorar el potencial del recurso. De gran importancia, y de acuerdo a la experiencia de repetidos errores cometidos por la humanidad al explotar los recursos naturales del planeta, es conocer las características ambientales de esos sitios y su funcionamiento. Únicamente de esa forma será posible planear un diseño de utilización de los recursos que permita dosificar su extracción al nivel que sea sustentable, renovable y no genere cambios en los ecosistemas naturales, tanto en las comunidades que los habitan como en su funcionamiento hidrológico. Esto último es de enfatizarse, ya que al extraer energía del océano, será necesario prever cuidadosamente de no apagar procesos físicos que son los que permiten que en una localidad se desarrollen las características que permiten la vida de las comunidades que lo habitan.

La posibilidad de obtener energía de los gradientes salinos posiblemente sea una solución limpia, renovable y sustentable para comunidades costeras a las que es difícil y costoso proveer de electricidad generada a muchos kilómetros de distancia. Más aún, idealmente sería también un ejemplo de “micro-generación”, que además de proveer cierta independencia energética, lo haga en magnitudes moderadas difusas a lo largo de las costas, facilitando así que los ambientes sean capaces de renovarse antes de ser agotados por las costumbres de extracción masiva que la humanidad ha tenido tradicionalmente para obtener sus recursos.

6. AGRADECIMIENTOS

El estudio es financiado por CONACYT-SENER a través del proyecto CEMIE-Océano, Línea Estratégica de Gradientes Salinos.

7. REFERENCIAS

- [1] Aaberg, R. (2003). Osmotic Power. A new and powerful renewable energy source?. Elsevier Science Ltd. All rights reserved. REFOCUS. 3 p. En <http://www.re-focus.net>.
- [2] Álvarez-Silva, O., Osorio, A. y Winter C. (2016). Practical global salinity gradient energy potencial. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 60:1387-1395.
- [3] Cipillina, A. y Micale, G. (2016). *Sustainable Energy from Salinity Gradients*. ELSEVIER. Chapters.
- [4] Jia, Z., Wang, B., Song, Sh. y Fan Y. (2014). Blue energy: Current technologies for sustainable power generation from water salinity gradient. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 31:91-100.