

Implementación comercial de la conversión de energía océano termal: Aspectos ambientales e implicaciones socio económicas

José A. Martí¹, Thomas J. Plocek², Manuel A. J. Laboy³

(1) Principal, Technical Consulting Group, San Juan Puerto Rico; (2) Presidente, Offshore Infrastructure Associates, San Juan, Puerto Rico; (3) Vicepresidente, Offshore Infrastructure Associates, San Juan, Puerto Rico

General

La conversión de energía océano-termal o termoceánica, (OTEC, por sus iniciales en ingles) es una fuente de energía renovable de base continua particularmente apropiada para zonas tropicales. La misma no depende de combustibles o energía nuclear, no es vulnerable a fluctuaciones en los mercados mundiales y tiene impactos ambientales menores que otras fuentes de energía.

OTEC utiliza la energía térmica almacenada en el océano para generar electricidad en forma continua. Puede funcionar en zonas donde la diferencia en temperatura entre la superficie del océano y el agua del fondo es igual o mayor de 20°C (36°F) y donde el ambiente marino permita la operación estable de un sistema. En efecto, lo que se hace es recuperar parte de la energía solar recibida por el océano.

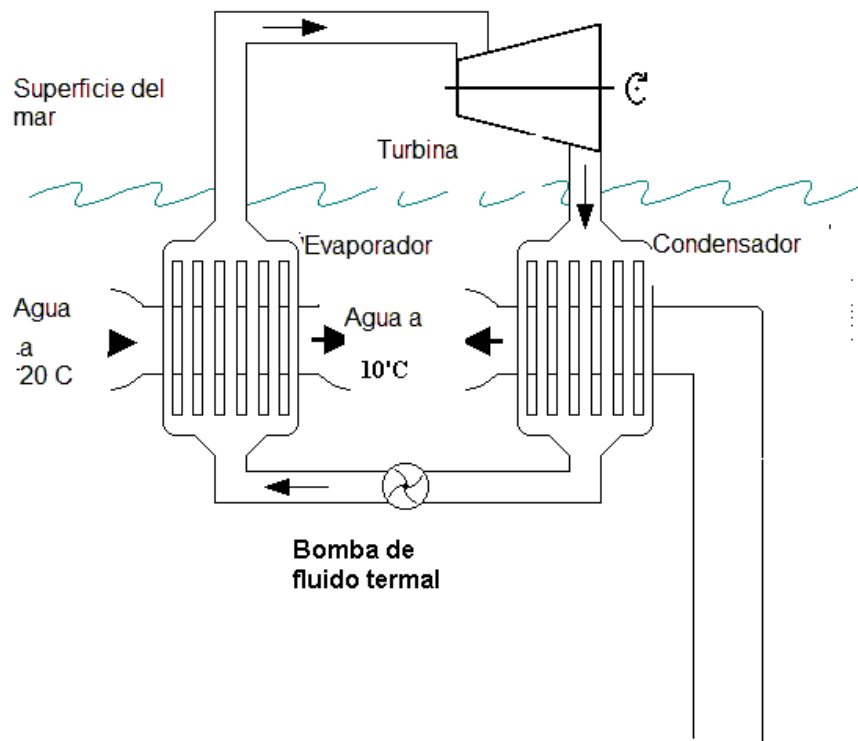
Su principal aplicación es en zonas tropicales donde el mar es profundo. Una de sus mayores ventajas es que permite la co-producción de agua potable (mediante desalinización) junto a la de electricidad. Es posible producir hasta 2 millones de litros por día (MLD), equivalente a alrededor de 0.5 millones de galones por día (MGD) por cada megavatio de electricidad generada.

Debido a que OTEC no utiliza combustibles, la electricidad generada tiene un costo fijo, por lo que no es susceptible a la volatilidad de costos que afecta a fuentes como el petróleo, el carbón y el gas natural. Además de esto, el impacto ambiental es menor que el de otras fuentes, porque no se generan contaminantes atmosféricos ni gases de invernadero. Estos aspectos han causado un resurgimiento del interés en OTEC.

Principios Fundamentales

Esencialmente, una planta OTEC consiste en una máquina térmica que convierte el calor en trabajo mecánico por medio del aprovechamiento del gradiente de temperatura entre una “fuente” caliente y un “sumidero” frío. Aunque las diferencias en temperatura son menores, el principio es el mismo que en una máquina de vapor.

En el llamado ciclo cerrado (el más común), la diferencia en temperatura entre el agua profunda (fría) y agua superficial (caliente) se usa para vaporizar un fluido termal, el cual mueve una turbina y genera electricidad, según se muestra en la figura 1:



En el llamado ciclo abierto, se introduce agua caliente de la superficie del mar en una cámara que opera al vacío, lo que hace que el agua hierva a baja temperatura y se vaporice. El vapor que se expande mueve un turbogenerador de baja presión y genera electricidad. Este vapor es, esencialmente, agua destilada, por lo que el ciclo abierto permite la producción de agua potable en adición a la de electricidad. El agua fría del fondo del mar se usa para condensar el vapor de agua y recuperar el líquido.

Se ha desarrollado un ciclo híbrido, que combina características de un ciclo abierto y uno cerrado. En el ciclo híbrido, el agua vapor generado en la cámara de vacío de un ciclo abierto es usado para vaporizar un fluido térmico que mueve una turbina para producir electricidad. Este ciclo promete mayores eficiencias en aplicaciones para la co-producción de agua y energía.

En todas las aplicaciones, es necesario obtener agua fría para que la condensación del vapor de agua o fluido termal ocurra. Esta agua se obtiene del mar, a profundidades de unos 1,000 metros, donde la temperatura del agua está cerca de los 2 °C.

Historia

El concepto de OTEC fue inicialmente propuesto por Julio Verne, en la novela "20,000 leguas de viaje submarino", publicada en Francia en 1869. El físico francés Jacques Arsene D'Arsonval postuló formalmente la idea en un escrito en 1881, pero no logró implementar la misma durante su vida. Su discípulo, el ingeniero y empresario francés Georges Claude, inventor de la técnica que permite utilizar prácticamente el acetileno, la lámpara de neón y el proceso de liquidificación y destilación del aire adopta la idea, siendo objeto del ridículo de otros profesionales, quienes alegaban que la energía necesaria para el bombeo de agua fría iba a ser mayor que la producida por la máquina térmica. Usando el capital que ganó en sus negocios, Claude comienza a investigar el proceso en detalle. En 1928, Claude valida el principio en Ougrée (Bélgica) produciendo electricidad con una máquina térmica de 60 kW abastecida con agua caliente de la descarga de unos hornos industriales y agua fría de un lago cercano.

Estimulado por los resultados que prueban que el balance energético del método es positivo, Claude decide hacer la demostración en condiciones reales, construyendo una planta en la Bahía de Matanzas, Cuba. El 6 de octubre de 1930, arrancó un generador de 22 kW y encendió un grupo de lámparas. Sin embargo, la planta solo operó por 22 días porque las tuberías fueron destruidas en una tormenta. Claude entonces propone construir una central comercial en Santiago de Cuba para generar 25 MW netos, a un costo estimado de entre 3 y 4 millones de dólares US (valor 1930). Pero la crisis económica le impide obtener financiamiento. Cabe señalar que, ajustado por la inflación, el estimado de costo es comparable (e incluso mayor) al costo estimado de una planta OTEC de esa capacidad en la actualidad.

De nuevo, usando sus fondos personales, en 1935 construye una nueva planta OTEC a bordo del buque *Tunisie*, con el propósito de fabricar hielo para la venta. Sin embargo, otra tormenta le hace perder la tubería de agua fría y se ve obligado a abandonar la empresa por falta de fondos. La Segunda Guerra Mundial impide que prosiga con sus trabajos directamente.

Sin embargo, en 1941, el gobierno de Francia de Vichy (ocupada por los nazis) desarrolla, con el consejo de Claude, la sociedad semi-oficial *Energie de Mers* para investigar y construir plantas de OTEC. Su involucramiento en estos trabajos, llevó a Claude a ser acusado de colaboracionista cuando terminó la guerra. Esto le valió la expulsión de la Academia Francesa de Ciencias y una condena de reclusión perpetua, de la que fue indultado en 1950. Claude murió en el ostracismo, aunque su trabajo técnico es respetado.

En la década de 1950, el grupo de trabajo de *Energie des Mers* realizó investigaciones que culminaron en el diseño de una planta OTEC para Abidjan, Costa de Marfil pero la misma no fue construida por ser demasiado costosa.

En la misma década, el ingeniero noruego Bryn Beorse, que conocía de los trabajos

franceses, emigró a Estados Unidos fundando junto con el profesor Everett Howe el Laboratorio de Conversión de Agua de Mar (Sea Water Conversion Laboratory) en la Universidad de California en Berkeley. Aunque obtuvieron fondos para investigación, particularmente sobre desalinización de agua de mar, no tuvieron éxito en construir una planta comercial OTEC, aunque el laboratorio se convirtió en uno de los principales centros de investigación sobre desalinización de agua.

Los esfuerzos de la sociedad francesa EDM continuaron a través de la década de 1950, pero no tuvieron éxito, probablemente por dos factores principales: el bajo costo del petróleo y el interés del gobierno francés en desarrollar la energía nuclear.

A mediados de la década de 1970, el embargo petrolero renovó el interés en OTEC. El presidente norteamericano Jimmy Carter llamó la situación “el equivalente moral de la guerra” y propuso que los Estados Unidos fueran independientes energéticamente. El gobierno norteamericano proveyó fondos a diversas entidades, tales como el Laboratorio de Física Aplicada (“APL” por sus iniciales en inglés) de la Universidad Johns Hopkins, el Laboratorio Nacional de Argonne, empresas privadas, tales como TRW y Lockheed, y diversas universidades, entre ellas la Universidad de Puerto Rico en Mayagüez. El Departamento de Energía de los Estados Unidos (“DOE” por sus iniciales en inglés), solicitó propuestas para varias plantas piloto OTEC a escala semi-comercial (10-40 MW). Varias fueron sometidas por la Autoridad de Energía Eléctrica de Puerto Rico (AEEPR). Ninguna de las propuestas para plantas piloto recibió fondos.

El DOE continuó esfuerzos en OTEC, pero a un nivel más modesto. Durante el periodo de 1979 a 1990, se efectuaron múltiples experimentos sobre configuración, materiales, diseño, etc. La agencia proveyó fondos para varios diseños detallados de sistemas OTEC, entre ellos los realizados por APL, General Electric y Westinghouse, pero los mismos nunca fueron construidos.

En 1979, un consorcio de empresas privadas construye en Hawaii la planta “Mini-OTEC”, a bordo de una barcaza militar convertida. Las empresas norteamericanas reclaman que esta fue la primera vez que un sistema OTEC produjo energía neta. Sin embargo, Claude reportó a sociedades científicas en Francia y Cuba que tanto la planta de Ougréé en Bélgica como la de Matanzas en Cuba produjeron electricidad neta.

En 1980 el DOE construyó la planta OTEC-1, de ciclo cerrado, a bordo de un buque tanque convertido. La misma sirvió de plataforma de pruebas para intercambiadores de calor de ciclo cerrado, demostró que los sistemas OTEC pueden trabajar desde barcos en movimiento y demostró la viabilidad de los diseños para tuberías suspendidas de agua fría.

En 1980-81, un consorcio compuesto de las empresas japonesas Toshiba y Tokyo Electric Power construyó una planta experimental de ciclo cerrado de 100 kW en la República de Nauru, la cual operó exitosamente como experimento. El grupo pasó a diseñar una planta de 2500 kW, la cual nunca fue construida.

El Laboratorio de Energía Natural del estado de Hawaii (“NELHA” por sus iniciales en inglés), realizó diversos experimentos con tecnologías OTEC entre 1982 y 1999. La culminación de los mismos fue la construcción y operación de una planta de ciclo abierto de 210 kW de capacidad bruta, la cual fue usada para diversos experimentos hasta que fue demolida en 1999 porque el programa de investigación terminó.

Actualmente, la tecnología para construir una planta OTEC es conocida y los componentes necesarios están disponibles comercialmente (para uso en otras aplicaciones). La razón por la cual no se han construido plantas comerciales ha sido esencialmente económica. La administración del presidente norteamericano Ronald Reagan favorecía la energía nuclear y cortó los fondos que se hubieran usado para desarrollar las plantas piloto OTEC en la década de 1980. Luego los precios del petróleo bajaron a cerca de \$10 por barril en la década de 1990, lo que hizo poco atractivo el proceso. En ese momento, había muy poca consciencia sobre el calentamiento global.

¿Por qué se pretende revivir OTEC?

Los eventos recientes han creado un renacer del interés en OTEC. En primer lugar, el costo del barril de petróleo ha aumentado vertiginosamente, llegando a los US\$140 a mediados de 2008. Existen serias preocupaciones sobre la estabilidad de la producción (que se centra en zonas altamente conflictivas, como el Oriente Medio) y sobre la posibilidad de que la producción petrolera mundial esté llegando a un pico (el llamado “pico de Hubbert”, anunciado para el periodo entre 2000 y 2010). El aumento en costo del petróleo generará un aumento en la demanda y el costo de otros combustibles fósiles, tales como el gas natural y el carbón.

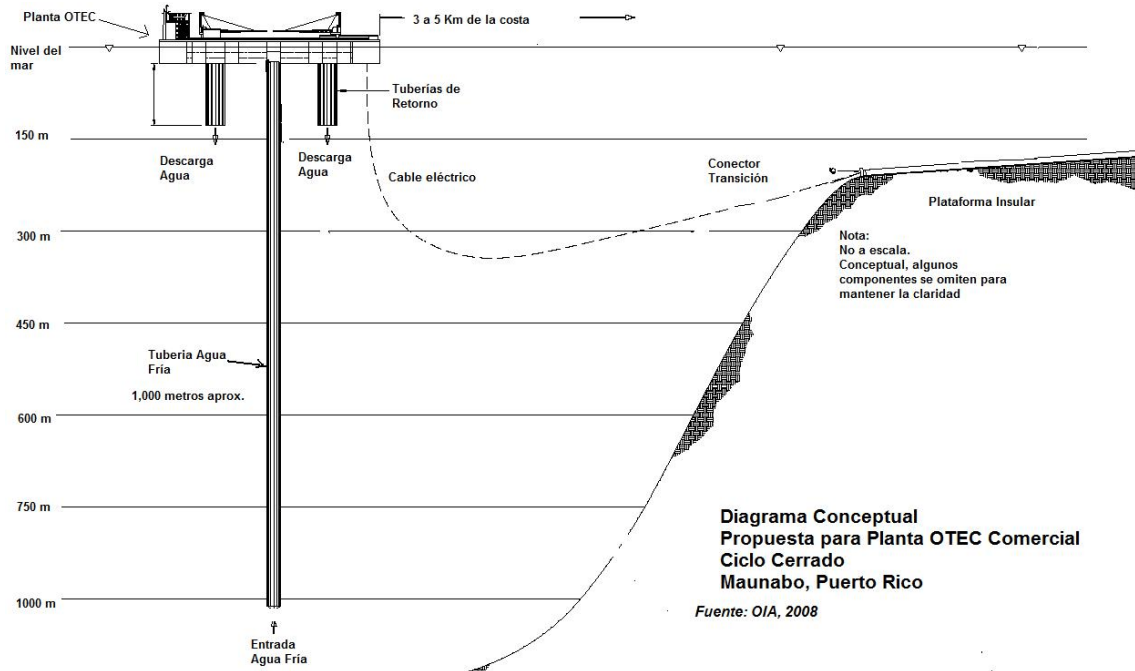
Lo que resulta mas preocupante son los potenciales efectos en el calentamiento global de las emisiones de gases de invernadero producto de combustibles (sean estos renovables o no renovables). Tanto en los Estados Unidos como en la Comunidad Europea, se ha discutido seriamente la imposición de impuestos a las emisiones de gases de invernadero.

Otro problema significativo es el nexo agua-energía. Para la producción de energía se requieren grandes cantidades de agua, y para producir y distribuir agua se requieren grandes cantidades de energía.

Todos estos factores han hecho renacer el interés en OTEC, ya que no utiliza combustibles ni energía nuclear, es disponible esencialmente todo el tiempo (comparado a una disponibilidad de aproximadamente 30% para energía de viento y 40% para generación por energía solar) y permite la co-producción de agua potable, de así desearse.

Por primera vez, los altos precios del petróleo, y la vulnerabilidad de muchas sociedades a las fluctuaciones en el mismo, han hecho que la construcción y operación de plantas OTEC sea comercialmente viable, sin la necesidad de subsidios gubernamentales.

Por ejemplo, la empresa que los autores representan ha propuesto la construcción de plantas comerciales con financiamiento privado. La figura muestra una propuesta planta comercial en Puerto Rico para producir electricidad solamente.



Impactos Ambientales

En general, OTEC es una tecnología benigna del punto de vista ambiental. No se usan combustibles, no hay emisiones de contaminantes convencionales de aire, no se generan desperdicios sólidos ni tóxicos y los efluentes son esencialmente similares al agua receptora. Sin embargo, la tecnología OTEC no está libre de impactos ambientales.

Durante la construcción, se impactarían las zonas donde se construirían la planta y las tuberías (en caso de una planta terrestre) o las facilidades de conexión al tendido eléctrico y el cable submarino (para una planta en plataforma). Es necesario evitar zonas ambientalmente sensitivas al localizar las mismas.

En términos de emisiones al aire, no se emitirán contaminantes producto de la combustión. En una planta de ciclo abierto o híbrido, los gases disueltos en el agua escapan a la atmósfera, lo que resultará en la emisión del CO₂ que está disuelto en el agua de mar. Sin embargo, estas emisiones son mínimas comparadas a las que ocurrirían de usarse combustibles para generar una cantidad de energía equivalente.

Se ha expresado preocupación por posibles escapes de fluido térmico en plantas de ciclo cerrado o híbrido. En el pasado se propuso el uso de clorofluorocarbonos (CFC), conocidos comercialmente como “freones”. Estos compuestos tienen efectos adversos sobre la capa de ozono y son fuentes potenciales de calentamiento global. Por esta razón, los diseños más recientes han regresado al amoníaco, que es un refrigerante muy antiguo.

Aunque este gas es tóxico, sobre 100 años de experiencia en su uso como refrigerante han demostrado que puede ser manejado con seguridad, si se toman precauciones básicas en el diseño y la operación del sistema. La mayor parte de los grandes sistemas de refrigeración comerciales e industriales usan amoníaco como fluido térmico.

El proceso OTEC requiere el manejo de grandes cantidades de agua. Esto trae consigo tres preocupaciones principales: (1) el arrastre de organismos acuáticos en la corriente de agua; (2) el efecto de los compuestos químicos aplicados para evitar el crecimiento biológico en los componentes del sistema; y (3) el efecto de la surgencia o afloramiento de agua profunda hacia la superficie (llamado en inglés "upwelling"). Los tres problemas son controlables mediante medidas de diseño u operación.

El arrastre de organismos ocurre principalmente en el agua superficial caliente. Las observaciones en Hawaii indicaron que el arrastre de organismos en el agua fría es mínimo. No obstante, en los diseños comerciales propuestos se proveen medidas para desviar los organismos en ambas corrientes para evitar que entren al sistema y minimizar, en lo posible, que sufran daños.

Para evitar el crecimiento biológico en el sistema es necesario aplicar agentes tales como el cloro o el ozono, ambos generados in-situ. El uso descontrolado de estos agentes puede causar serios daños al ambiente. Sin embargo, las investigaciones realizadas en las plantas de Hawaii encontraron que solo es necesaria la aplicación de dosis muy bajas (equivalentes a 0.1 mg/L de cloro libre) intermitentemente (alrededor de 1 hora por día) para controlar los crecimientos indeseables. Para reducir aún más el efecto, en una planta comercial, compuesta de varios módulos, solo se aplicarían estos agentes a uno de los módulos a la vez, lo que diluiría el residual en el efluente por un factor considerable, a niveles que probablemente no sean detectables.

Los efectos potenciales de la surgencia o afloramiento del agua profunda han sido una de las preocupaciones principales asociadas a las plantas OTEC. El agua profunda es rica en nutrientes y baja en patógenos. Esto puede dar lugar a un crecimiento acelerado del fitoplancton, lo que tendrá efectos estimulantes a través de toda la cadena alimentaria. Otro efecto es la diferencia en temperatura entre el efluente y el agua receptora. Algunos proponentes de OTEC han sugerido que estos efectos son beneficiosos, ya que se aumentaría la productividad biológica y se crearían recursos pesqueros valiosos. Si embargo, no puede negarse que el balance del ambiente natural resulta alterado.

En caso de plantas en tierra, como ha sido el de las plantas experimentales en Hawaii, esta agua profunda puede recuperarse para el cultivo de especies valiosas, tales como langostas de agua fría, peces para acuariofilos y algas con potencial de productos biotecnológicos. En Hawaii, incluso se usa el agua profunda para producir agua potable embotellada, al desalinizarla mediante el proceso de osmosis inversa. Esta agua se vende como un producto exótico en mercados tales como el de Japón, a alrededor de US\$5 por litro.

Los diseños de plantas más modernos toman medidas para reducir los efectos del afloramiento. La principal es descargar los efluentes a una profundidad donde la penetración de la luz es mínima y por tanto el efecto estimulante en el fitoplancton es minimizado. Ver por ejemplo, la planta propuesta ilustrada en la figura anterior.

Debido a que no se han operado plantas OTEC comercialmente a largo plazo, es necesario el presupuestar estudios periódicos de los efectos ambientales de la operación de las primeras plantas. De este modo, se puede determinar con certeza la magnitud de los posibles impactos y optimizar la operación y el diseño de unidades futuras para minimizar los mismos.

Aspectos Socioeconómicos

Muchas naciones, como Puerto Rico o la República Dominicana, entre otras, dependen totalmente de combustibles importados para sus necesidades energéticas. Esto las hace altamente vulnerables a la volatilidad en precios de combustibles, y a cualquier evento que disminuya o afecte los suministros en el mercado mundial, aunque el mismo ocurra en otra parte del mundo y el país afectado no tenga nada que ver con el mismo.

Entre enero de 2007 y julio de 2008, el precio del petróleo aumentó de \$54.63 a \$137.11 por barril, lo que generó la crisis económica mundial que actualmente vivimos. Se ha estimado que incidentes tales como una nueva guerra en el Oriente Medio (eg, entre Israel e Irán) o la destrucción del oleoducto BTC entre los campos de Bakú, Georgia y Turquía en el reciente conflicto ruso-georgiano, pudieran llevar los precios del crudo a niveles sin precedentes, sobre los US\$200 el barril, lo que tendría graves efectos sobre la economía mundial. La falta de control sobre el costo de energía desalienta actividades productivas e inversiones, lo que aumenta el impacto económico y crea una depresión social colectiva que se extiende a toda la sociedad.

El desarrollo de plantas OTEC pondría a estos países actualmente dependientes de la importación de combustibles en camino a la autonomía energética, creando una estabilidad de precios de energía a largo plazo. La construcción de plantas OTEC proporciona también estímulo económico.

Lo que resulta más importante, una sola planta OTEC de 75 MW ahorrará aproximadamente 1.000.000 barriles de petróleo por año. El dinero pagado por estos combustibles va a tener actualmente a los países productores, quedando fuera de la economía de los países que lo consumen. Sin embargo, el dinero que se pague por la energía de una planta OTEC financiada por fondos privados retornaría a la economía del país que la construye.

Conclusión

Es por estas razones que los autores entienden que el momento ha llegado para la implementación comercial de OTEC, siendo una tecnología particularmente apta para

naciones pequeñas en zonas tropicales donde existe también una necesidad de agua potable, tales como ocurre en algunas de las Antillas Menores e islas del Pacífico.

Referencias:

- 1- Verne, Jules, 20.000 leguas de viaje submarino, París, 1869
- 2- Brown, M.G. Gauthier, M. Meurville, J-M. *George Claude's Cuban OTEC Experiment: a Lesson of Tenacity for Entrepreneurs*", IOA Newsletter, Invierno 2002
- 3- Claude, G. *Power from the Tropical Seas*. en Mechanical Engineering, Volume 52, December 1930, N°12.
- 4- Club des Argonautes: *L'expérience de George Claude à Cuba: une leçon de ténacité pour les entrepreneurs*, en <http://www.clubdesargonautes.org/histoirestem/etmclaude.htm>
- 5- Obituario para Georges Claude. En *Time*, 6 de junio de 1960.
- 5- George, J.F. Richards, D *Baseline Designs of Moored and Grazing 40 MW OTEC Power Plants*, Johns Hopkins University, Applied Physics Laboratory, 1980.
- 6- Cohen, R. *Energy from the Ocean*, Phil Transact. Royal Society, London, A 307, 1982.
- 7- Anderson, J.H. *Ocean Thermal Power, The Coming Revolution* (privately published) 1982.
- 8- Mitsui, T., et al. *Outline of 100 KW OTEC Pilot Plant at the Republic of Nauru*. *IEEE Transactions on Power Systems and Apparatus*, Septiembre, 1983.
- 9- Avery, W.H. y Wu, C. (1994). *Renewable Energy from the Ocean, A Guide to OTEC*. New York, NY: Oxford University Press.
- 9- Avery, W.H. y Berl, W.G. *Solar Energy from the Tropical Oceans* en Issues in Science and Technology, Invierno 1997
- 10- Daniel, T. *A Brief History of OTEC Research at NELHA*, Natural Energy Laboratory of Hawaii, 1999.
- 11- *Study of OTEC in the World*, en IOES, website de Universidad de Saga, Japón (sin fecha)
- 12- Ravindran, M. *The Indian 1 MW Floating OTEC Plant: an Overview*. IOA Newsletter Vol.11, No.2/Summer 2000.
- 13- Johnson, M. *Shamcher: A Memoir of Bryn Beorse and his Struggle to Introduce Ocean Energy to the United States*, publicado privadamente, 2005.
- 14- Tellado, R. *En la mira la costa de Maunabo*, en El Nuevo Día, San Juan, Puerto Rico, 24 de junio de 2008.