



TECNOLOGÍA OTEC (II) ASPECTOS HISTÓRICOS Y COMPARACIÓN CON OTRAS FUENTES DE ENERGÍA

Introducción

El artículo presente es la segunda parte de una serie de tres documentos cuyo objetivo es la difusión de la tecnología OTEC (*Ocean Thermal Energy Conversion*) entre el público en general y la Armada en particular.

Para información de los lectores, el primero de los documentos versa sobre los rasgos generales de este método de extracción energética renovable. En esta segunda parte, se pretende profundizar en los detalles de las plantas OTEC, en los aspectos históricos y en la comparación con otros tipos de producción energética. El documento final presentará las zonas más propicias para su instalación en el territorio nacional, así como una simulación aproximada de la inversión requerida para una planta de 50 MW.

Dios quiera que el lector lo encuentre de su interés y disfrute de este humilde trabajo.

¿Qué es la energía maremotérmica?

Ésta puede definirse como la cantidad de energía en forma de calor que almacenan los océanos del planeta. Para llevar esto a cabo se desarrolla la tecnología OTEC, que es cata-

logada como una de las pocas energías renovables capaces de generar elevadas potencias eléctricas a gran escala. Además, permite la explotación de forma ininterrumpida. Al comportarse los océanos como focos térmicos —en los que su temperatura no varía sustancialmente entre la noche y el día—, las plantas OTEC pueden operar de forma continua, al contrario que otras energías verdes, como la eólica o la solar, que dependen de la disponibilidad del recurso.

La extracción de energía maremotérmica se basa en la utilización del ciclo de potencia Rankine, pero con la introducción de algunas variaciones. Normalmente los beneficios de este ciclo se explotan en centrales nucleares o térmicas para la producción de energía eléctrica mediante turbinas. Por ello, el fluido —normalmente agua— se evapora gracias al calor liberado por el núcleo radioactivo o la combustión de carbón o petróleo.

La tecnología OTEC cambia en primer lugar el agua que se utiliza como fluido de trabajo por un refrigerante. Lo más comúnmente utilizado es amoníaco y en menor medida líquidos orgánicos, como propano o freón. Una de las características más destacables es su evaporación a temperaturas relativamente bajas —en el rango de los 20–30° C— en condiciones



normales. Además, no necesita de la quema de combustible alguno, ya que los focos caliente y frío son creados a partir del bombeo de agua marina superficial (AS) y profunda (AP) respectivamente. Éstos a su vez se valen de intercambiadores de calor para evaporar y condensar el fluido de trabajo. Para recircular el líquido y cerrar el ciclo, se añade una bomba que lo envía de nuevo al evaporador.

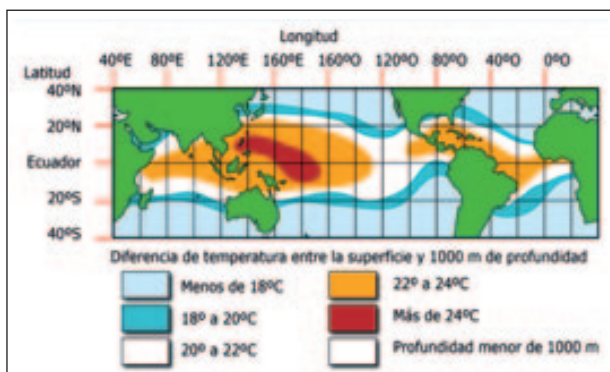


Ilustración 1. Distribución del recurso térmico oceánico.
(Fuente: P. Fernández Díez «Energía maremotérmica», 2010)

Aunque el desarrollo e instalación de dispositivos OTEC tiene un gran potencial, como cualquier elemento, también consta de sus limitaciones. La más significativa es su localización. Para que las plantas operen correctamente, debe existir una diferencia de temperatura entre la superficie y las profundidades del mar de mínimo 18° C ininterrumpidamente. Como de forma generalizada se pueden obtener 3° C constantes a un kilómetro de profundidad, el verdadero factor limitante es encontrar una situación en la que el agua superficial no caiga por debajo de los límites anteriormente impuestos. Estas localizaciones se concentran en latitudes bajas, próximas al ecuador, donde la radiación solar es mayor.

En la ilustración 1 puede observarse el espectro de distribución de este recurso, expresado mediante la media anual de diferencia de temperatura entre la superficie y los 1000 m de profundidad. Como puede observarse, la mayor parte de los emplazamientos óptimos para el desarrollo de la tecnología OTEC se concentran en zonas próximas a la línea ecuatorial. Esto viene determinado por dos razones: la primera de ellas es la diferencia de temperatura entre las profundidades marinas y la superficie. La segunda razón es la continuidad en el tiempo de esta diferencia. Para que la energía que produce una planta OTEC no varíe de forma estacional, debe asegurarse esa temperatura mínima de diferencia todo el año.

Desarrollo histórico de la energía OTEC

Las primeras insinuaciones sobre la extracción de energía térmica de los océanos provienen del escritor francés Julio Verne, en su obra *Veinte mil leguas de viaje submarino*, publicada en 1870. No fue hasta ocho años más tarde cuando el fundamento teórico de esta tecnología vio la luz de la mano de un físico, también oriundo de Francia, llamado Jacques-Arsène d'Arsonval. Propuso utilizar la energía de las AS para evaporar amoníaco presurizado a través de un intercambiador de calor. El vapor resultante acciona una turbina que, acoplada a un generador, produce energía eléctrica. El ciclo Rankine en el que se basó se completaba con la condensación del amoníaco gracias al agua fría de la zona profunda, bombeada desde 1.000 metros.

Cuarenta años más tarde, otro inventor francés, alumno del anterior, llamado Georges Claude, propuso utilizar la propia agua del océano como fluido de trabajo en lugar del amoníaco. De esta manera el agua es evaporada súbitamente en una cámara de vacío, el vapor a baja presión resultante mueve una turbina que, de nuevo, acoplada a un generador, genera electricidad. El vapor es devuelto a su estado líquido gracias a la cesión de energía al agua fría proveniente de las profundidades. Claude demostró la viabilidad de su invención al instalar un dispositivo en Matanza, Cuba, en el año 1930. Aunque no llegó a alcanzar su producción neta debido a diversos factores, pro-



Georges Claude realizando una demostración sobre la conversión de energía térmica oceánica en el Instituto de Francia en 1926.

(Fuente: www.wikipedia.org)

porcionó 22 kW durante 11 días antes de que una tempestad destruyera las tuberías de AP. En la ilustración 2 puede observarse un esquema del ingenio instalado por Claude.

Posteriormente, el propio Claude diseñó una planta flotante de 2,2 MW para satisfacer la necesidad de hielo de la ciudad de Río de Janeiro en 1933. Lamentablemente desistió de su empresa en 1935 al ser incapaz, tras infructuosos intentos, de instalar correctamente la tubería de AP.

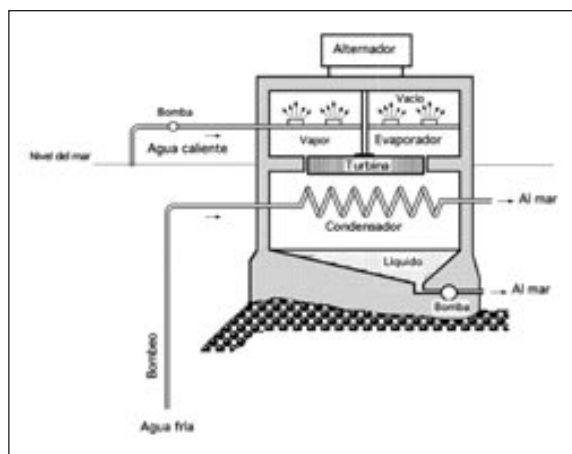


Ilustración 2. Dispositivo OTEC diseñado por Claude.
(Fuente: P. Fernández Díez «Energía maremotérmica», 2010)

Fue en los años sesenta cuando comenzó el primer gran avance de la tecnología OTEC. Aunque fuese únicamente teórico, se empezaron a desarrollar plantas destinadas a explotación comercial. Potentes empresas estadounidenses como Lockheed Martin y TRW proyectaron plantas con capacidades de 160 y 100 MW, ambas flotantes.

Un nuevo empuje se produce en el período entre los años 1970 y 1990. El monopolio protagonizado por Francia y Estados Unidos se diver-

sifica con la introducción de nuevos actores, como Japón e India, entre otros. Se realizaron experimentos relacionados con la viabilidad de las plantas OTEC, pero la implementación comercial nunca llegó a realizarse debido a que los bajos precios del petróleo relegaron esta tecnología a un segundo plano al no ser económicamente competitiva.

La situación cambió en 2008, cuando el barril de crudo alcanzó los 140 dólares. Se presentó la posibilidad de que hubiera llegado a su punto máximo, según estipula el pico de Hubbert. Con este aumento del coste de los combustibles fósiles, además de la concienciación de

la población con respecto al cambio climático y los problemas derivados de la contaminación, se ha reavivado la necesidad de encontrar nuevas fuentes de producción energética, entre las que la tecnología OTEC tiene un protagonismo relevante. Varios autores consideran esta opción como una de las mejores dentro de las renovables para la generación de energía a gran escala.

En la tabla 1 se resumen los principales proyectos de plantas OTEC desarrollados entre 1930 y

Company/Country	Location	Year	Power (kW)	Working fluid	Description/Status
Claude / France	Cuba	1930	22	Seawater	Mini OTEC, Onshore
USA	Hawaii	1979	50	R717	Mini OTEC, Onshore
USA	Hawaii	1981	1.000	NH ₃	Mini OTEC, Onshore. Status: thermal tests
Tokyo Electric Company y Toshiba Corporation	Nauru	1981	31.5	Freon-22	It worked with a temperature difference of 20°C between the surface and deep seawater with depths of 500-700 m. Status: inactive
Toshiba y TEPC (Japan)	Nauru	1982	120	R22	Constructed for research purposes
Japan	Tokunoshima	1982	50	NH ₃	Inactive
England	Caribbean Sea Puerto Rico	1982	1.000	R22	Inactive
Taiwan	East Coast	1985	5.000	NH ₃	Inactive
Saga University (Japan)	Saga	1985	75	-	Constructed for research purposes
NELHA (USA)	Hawaii	1993	210	H ₂ O	Constructed for research purposes
Saga University (Japan)	Saga	1985	75	NH ₃ / H ₂ O	Implements regenerative Uehara cycle
NIOT (India)	Puerto de Tuticorin	2000	1.000	NH ₃	Plant Offshore Sagar Shakti
Lockheed Martin / US	Hainan Island	2013	10.000	NH ₃	Prototype Plant
KORISO and KIOST	Korea	2014	20	R32	Prototype Plant
NELHA (USA)	Hawaii	2015	100	NH ₃	Makai, Ocean Engineering generates energy for 120 homes
Lockheed Martin and Reigwood Group	In front of Hainan Island, South China	2017	10.000	NH ₃	Prototype Plant

Tabla 1. Principales proyectos de plantas OTEC desarrollados

2017. Figuran a su vez el país origen, el lugar de la instalación, el año, la producción bruta, el flujo de trabajo y para qué fueron utilizadas.

Comparativa con otros tipos de energía

La tecnología OTEC pertenece a las denominadas energías renovables. La fuente de la que se nutre es inagotable y las emisiones a la atmósfera son nimias en comparación con las plantas destinadas a la combustión de recursos fósiles. Las equivalencias que presenta en términos de cantidad de petróleo consumido indican que es una opción factible *a priori* económicamente y, sin lugar a dudas, en el ámbito medioambiental. Una única instalación OTEC de 75 MW de capacidad neta equivale a un millón de barriles de crudo anuales.

Además, es la única dentro de la familia de las renovables que tiene un factor de planta tan elevado, en torno al 95 por 100. Esto quiere decir que, del tiempo total que la planta es capaz de operar, lo hace casi al 100 por 100. Una planta OTEC funciona prácticamente 24 horas al día debido a que las variaciones de temperatura del océano son insignificantes en las latitudes próximas al ecuador. En comparación con otras formas de extracción de energía en la tabla 2 puede concluirse que es

INSTALACIONES	FACTOR DE PLANTA
Solar térmica	18
Solar fotovoltaica	25
Hidráulica	52
Eólica	34
Eólica <i>offshore</i>	34
Geotérmica	92
OTEC	95

Tabla 2. Factores de planta de las energías renovables

la del valor de factor de planta más elevado entre las renovables.

En la tabla 3 se observa que también encabeza la lista de los factores capacitivos de las energías no renovables:

INSTALACIONES	FACTOR DE PLANTA
Carbón convencional	85
Gas natural	87
Nuclear	90
OTEC	95

Tabla 3. Factores de planta de las energías no renovables

Otro parámetro a considerar es el precio por kW neto instalado. Tras las simulaciones realizadas con programas informáticos, es posible calcular los datos anteriormente citados sabiendo que 171,1 millones de euros es el precio aproximado de una planta OTEC. El cálculo puede observarse en la siguiente ecuación:

$$\frac{171,1 \text{ M€}}{31743,04 \text{ kW}} = 5390,157 \frac{\text{€}}{\text{kW}}$$

Precio del kW neto instalado en modo OTEC convencional

Si estos valores se comparan con los de las plantas nucleares o térmicas —las primeras operan en el orden de 7.000 €/kW y las segundas de 2.200 €/kW—, es posible concluir que es una energía competitiva, ya que, a pesar de que tiene valores superiores al de las centrales térmicas, producen entre un 90 y un 75 por 100 menos de contaminantes en todos los ámbitos.

Por último, recalcar que las plantas OTEC operan las 24 horas los 365 días del año. Es la segunda energía renovable que mayor capacidad tiene de producir energía después de la

hidroeléctrica. Además, es el método de extracción de energía de entre todos los existentes que mayor factor de planta posee. Éste es el cociente entre la energía real generada por la central durante un período específico de

tiempo y la generada en el mismo período si hubiese trabajo a plena carga. Con los datos contenidos en la tabla 4 es posible hacer una comparación entre los diferentes tipos de energía:

Energy type	TOTAL (MW)	PLANT FACTOR	Average anual production net (GWh year ⁻¹)	Net hours of annual production
OTEC	100	0.8	1562.5	8760
Hydroelectric	2400	0.41	3498.1	3555
Solar/Photovoltaic	30	0.46	19.5	1415
Wind	251.1	0.32	225	2801
Geothermal	225	0.77	1172.3	6767
Bioenergy	53	0.24	26.7	2100
Nuclear power	1608	0.75	7925.8	6272
Carboelectric	2778	0.73	12897.6	6360
Thermoelectric	2100	0.37	2488.7	3203
Dual	367	0.64	1145.5	4877
Turbogas	393	0.28	274.4	2494
Internal combustion	210	0.25	113.5	2162
Regenerative brakes	290	0.56	1071.1	6596
Combined cycle	1454	0.67	5650.3	5800

Tabla 4. Datos capacitativos de los diferentes tipos de energías

BIBLIOGRAFÍA

- «Energía maremotérmica», en <http://kimerius.com/app/download/5781434351/Energ%C3%ADa+maremot%C3%A9rmica.pdf> (acceso 11 de marzo de 2022).
- Terry de Loredó, María (2018): *Energía Marina: Estado del Arte, Situación y Perspectivas de los Sistemas de Gradiente Térmico OTEC*. Trabajo Fin de Grado, en <https://addi.ehu.es/bitstream/10810/29293/2/MARIA%20TERRY%20DE%20LOREDO%20-%20TFG%281%29.pdf>
- Instituto Español de Oceanografía, «ARGO España», 2020. <https://www.oceanografia.es/argo/>
- Martí, J. A.; Plocek, T. J.; Laboy, M. A. J.: «Implementación comercial de la conversión de energía océano termal: Aspectos ambientales e implicaciones socio económicas», en <http://www.offinf.com/ImplementacionAIDIS> (acceso 12 de marzo de 2022).
- Núñez Rivas, L. R. (2016): «El aprovechamiento de las energías renovables marinas como opción tecnológica de futuro». *Economía Industrial*, en <https://www.mintur.gob.es/Publicaciones/Publicacionesperiodicas/EconomiaIndustrial/RevistaEconomiaIndustrial/386/Luis%20Ram%C3%B3n%20Núñez%20Blez%20Rivas.pdf> (acceso 12 de marzo de 2022).
- Masutani, S. M.; Takahashi, P. K. (2019): «Ocean thermal energy conversion (OTEC)». *Encyclopedia of Ocean Sciences*. Elsevier, pp. 641-647, en <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.11382-X>
- Venkatesan, R. A. R. (2001): «Ocean Thermal Energy Conversion». *Marine Engineers Journals*.
- Rajagopalan, K.; Nihous, G. C. (2013): «Estimates of global Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC) resources using an ocean general circulation model». *Renewable Energy*, vol. 50, pp. 532-540. Elsevier, doi: 10.1016/j.renene.2012.07.014
- Millán Salgado, J. F. (2017): «Máquinas y Equipos Térmicos, II», <http://maquinasyequipostermicos02.blogspot.com/2017/09/unidad-i-ciclos-de-vapor.html> (acceso 12 de marzo de 2022).
- Silva Casarín, R.; Posada Vanegas, G.; Gutiérrez Lara, J.; Félix Delgado, A. (ed.): *Conversión de Energía Térmica Oceánica (OTEC)*. Centro Mexicano de Innovación en Energía-Océano. Ciudad de México.
- Fernández Díez, P. (2010): «Energía maremotérmica», https://files.redsauce.net/js/pdfjs/web/viewer.html?file=https%3A%2F%2Fsm1.redsauce.net%2FAppController%2Fcom-mands_RSM%2Fapi%2Fapi_getFile.php%3Ffile=mlD%208%26propertyID%3D20%26RStoken%3D59e8ac1045d03e2ff6564c0638315f38 (acceso 12 de marzo de 2022).
- Gil Alba, R. (2016): *Estudio sobre la implantación de la tecnología maremotérmica*. Trabajo Fin de Grado, en https://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/27764/TFG_Raul_Gil_Alba.pdf
- Vega, L. A. (1999): «Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC)», en https://diren.minesparis.psl.eu/Sites/Thopt/fr/res/OTECbyVega_with_photos.pdf
- (2010) «Economics of ocean thermal energy conversion». *Proceedings of the Annual Offshore Technology Conference*. Nihous G. C.; Syed, M. A. (1997): «Financing strategy for small OTEC plants». *Energy Conversion and Management*, vol. 38(3), pp. 201-211.
- Comisión Europea (2020): «European Marine Observation and Data Network (EMODnet): Bathymetry», <https://www.emodnet-bathymetry.eu/> (accessed Mar. 12, 2022).
- Bernardoni, C.; Binotti, M.; Giostri, A. (marzo de 2019): «Techno-economic analysis of closed OTEC cycles for power generation». *Renewable Energy*, vol. 132, pp. 1.018-1.033, doi: 10.1016/j.renene.2018.08.007.
- International Renewable Energy Agency (IRENA) (junio de 2014): «Ocean thermal energy conversion»,
- Jia, Y.; Nihous, G. C.; Richards, K. J. (noviembre de 2012): «Effects of ocean thermal energy conversion systems on near and far field seawater properties. A case study for Hawaii». *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, vol. 4, n.º 6, doi: 10.1063/1.4766820
- Jaafar, A. B.; Khairi Abu Husain, M.; Ariffin, A. (2020): «Research and Development Activities of Ocean Thermal Energy-Driven Development in Malaysia». *Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC). Past, Present, and Progress*, IntechOpen, doi: 10.5772/intechopen.90610
- Martí, J. A.; Laboy, M. A. J.; Ruiz, O. E. (noviembre de 2010): *Viabilidad de la conversión de energía océano termal (OTEC) para la producción de energía renovable y agua potable en países en desarrollo*. Bávaro-Punta Cana.
- US Department of Energy (noviembre de 1989): *Ocean Thermal Energy Conversion*.
- Operador del Mercado Ibérico de Energía (OMIE) (noviembre de 2022), <https://www.omie.es/> (acceso 15 de marzo de 2022).

A detailed photograph showing the underside of a grey SH-60B helicopter as it is being hoisted by a crane. The helicopter is suspended in the air, with its landing gear and various external components visible. Two crew members in blue uniforms and helmets are on the ship's deck, guiding the helicopter. The background shows the blue sea and a clear sky. On the underside of the helicopter, there is a warning label that reads: "HANDLE WITH CARE", "KEEP SHARP POINTS ALIGNED", "TWO-PART LIFT REQUIRED", and "DO NOT PAINT".

Helicóptero SH-60B realizando operaciones de vuelo a bordo de la fragata *Navarra*.
(Foto: Álvaro Nuevo Martínez)