

## COMPARACIÓN DE TRES ESQUEMAS DE CENTRALES MAREMOTÉRMICAS

### Comparison of three tidal power plant schemes

Estudiante Adrián Heredia Díaz, <https://orcid.org/0009-0007-7170-0257>

Dr. C. Henry Bory Prevez, <https://orcid.org/0000-0001-5508-0501>

Ing. Ángel O. Castellano Sánchez\*, <https://orcid.org/0000-0001-7996-5611>

Universidad de Oriente, Cuba

\*Autor para correspondencia. email [angel.castellano@uo.edu.cu](mailto:angel.castellano@uo.edu.cu)

**Para citar este artículo:** Heredia Díaz, A., Bory Prevez, H. y Castellano Sánchez, A. O. (2023). Comparación de tres esquemas de centrales maremotérmicas. *Maestro y Sociedad*, 20(4), 953-958. <https://maestroysociedad.uo.edu.cu>

#### RESUMEN

La Conversión de Energía Térmica Oceánica o energía maremotérmica, es una fuente renovable de energía basada en el cambio de la temperatura del mar respecto a la profundidad, este gradiente de temperatura se puede utilizar para impulsar una máquina térmica que genera trabajo útil que se convierte en electricidad. Los océanos captan el calor generado por la radiación solar por lo cual los sistemas de Conversión de Energía Térmica Oceánica son una fuente de energía casi ilimitada dependiente del sol. El presente trabajo tiene como objetivo comparar teóricamente tres esquemas de centrales OTEC en cuanto a funcionamiento y cantidad de equipos. Materiales y métodos: Para esto se realiza una revisión bibliográfica y se propone el esquema óptimo para las condiciones de Cuba, el esquema de ciclo abierto o ciclo de Anderson. Resultados: Se compararon tres esquemas de centrales OTEC reportados en la literatura y se selecciona, considerando el funcionamiento y cantidad de equipos, como esquema óptimo para su implementación en las costas cubanas el esquema de ciclo abierto o ciclo de Anderson. Discusión: Se considera que el esquema del sistema de Conversión de Energía Térmica Oceánica basado en el ciclo de Claude presenta las siguientes desventajas: necesita para su operación de un fluido de trabajo, como los mencionados; estos fluidos de trabajo son gases con riesgo de explosión, como el propano, o de efecto invernadero, como el freón, o tóxico, como el amoníaco; en caso de escape del fluido de trabajo se detiene la producción de energía eléctrica; y se necesita de un medio de almacenamiento. Conclusiones: Las investigaciones sobre esta temática dado que la energía maremotérmica según los avances tecnológicos reportados en la literatura y las plantas operativas en el mundo, apunta a ser una de las futuras tecnologías de generación de electricidad ecológica más constantes e ininterrumpidas en comparación con la fotovoltaica y la eólica.

**Palabras clave:** centrales maremotérmicas, comparación, conversión de energía térmica oceánica.

#### ABSTRACT

Ocean Thermal Energy Conversion or tidal energy, is a renewable source of energy based on the change in sea temperature with respect to depth. This temperature gradient can be used to drive a heat engine that generates useful work that is converted into electricity. The oceans capture the heat generated by solar radiation, which is why Ocean Thermal Energy Conversion systems are an almost unlimited source of energy dependent on the sun. The objective of this work is to theoretically compare three OTEC plant schemes in terms of operation and quantity of equipment. Materials and methods: For this, a bibliographic review is carried out and the optimal scheme for the conditions of Cuba is proposed, the open cycle scheme or Anderson cycle. Results: Three OTEC plant schemes reported in the literature were compared and, considering the operation and quantity of equipment, the open cycle or Anderson cycle scheme was selected as the optimal scheme for implementation on the Cuban coast. Discussion: It is considered that the Ocean Thermal Energy Conversion system scheme based on the Claude cycle presents the following disadvantages: it requires a working fluid for its operation, such as those mentioned; These working fluids are gases with a risk of explosion, such as propane, or greenhouse gases, such as freon, or toxic, such as ammonia; In case of escape of the working fluid, the production of electrical energy stops; and a storage medium is needed. Conclusions: Research on this topic given that tidal energy, according to the technological advances reported in the literature and operating plants in the world, aims to be one of the most constant and uninterrupted future technologies for generating ecological electricity compared to photovoltaics and wind.

**Keywords:** tidal power plants, comparison, ocean thermal energy conversion.

## INTRODUCCIÓN

El futuro energético es uno de los problemas que más preocupan hoy en día ya que, independientemente del grado de desarrollo del país, la energía es un elemento imprescindible para el desarrollo de las naciones (Gil, 2017). La emisión de gases de efecto invernadero por la quema excesiva de combustibles fósiles para la realización de las actividades diarias del ser humano, genera la contaminación ambiental que provoca cambios repentinos en las condiciones climáticas del planeta (Monroy, 2017; Abreu, 2021). Por lo que es necesaria la búsqueda de nuevas opciones energéticas que se encaminen hacia un desarrollo sostenible desde el punto de vista económico y ambiental, lo que permite que se preserven los ecosistemas naturales. (Abreu, 2021)

Para lograr la sostenibilidad del medio ambiente es imperativo considerar formas de energías limpias, consistentes y seguras. Las fuentes renovables de energía (FRE) son el futuro de la generación de energía mundial, porque a diferencia de los combustibles fósiles, tienen el potencial de renovarse, comportándose como fuentes inagotables. Es posible generar gran cantidad de energía a través de fuentes como: el sol, el viento, la geotérmica, el mar, materiales orgánicos y biocombustibles. Las FRE producen emisiones netas casi nulas y son amigables con el medio ambiente. (Ballesteros & Gallego, 2019; Wilberforce et al., 2019; Barragas & Llanes, 2020; Abreu, 2021)

El Sol es la principal fuente de energía atmosférica y el 66 % de la radiación solar es absorbida directamente por la superficie terrestre. Los océanos cubren el 70 % de la superficie terrestre y son grandes colectores de energía solar. Existen numerosas tecnologías que aprovechan dicha energía para producir electricidad u otros bienes secundarios. Dentro de este tipo de tecnologías de aprovechamiento de la energía contenida en los océanos se encuentra la energía maremotérmica, que consiste en la obtención de energía mediante el gradiente térmico existente entre la superficie y el fondo oceánico (Gil, 2017; Abreu, 2021; Reyes, 2021). El escritor francés Julio Verne, en su obra *Veinte mil leguas de viaje submarino*, publicada en 1869, fue la primera persona en hacer referencia a la obtención de energía eléctrica a partir del gradiente de temperatura de los océanos (Gil, 2017). En el año 1881 el físico francés Jacques Arsene d'Arsonval propuso esta tecnología. (Gil, 2017; Monroy, 2017; Salz, 2018)

El 22 de noviembre de 1926 el ingeniero francés Georges Claude presentó a la Academia de Ciencias de París un modelo, a escala, que demostraba la posibilidad de aprovechar la energía maremotérmica. Este científico en el año 1930 construyó en Cuba, al norte de Matanzas, la primera central maremotérmica del mundo como muestra la Fig. 1, que funcionó 11 días, pues fue destruida por una tempestad, luego construyó otra en aguas de Río de Janeiro (1934-1935). Aunque estas centrales demostraron la viabilidad del proyecto de Claude, acabaron en fracaso a causa de los efectos del movimiento del oleaje sobre la conducción sumergida (Gil, 2017; Monroy, 2017; Abreu, 2021; Herrera, Sierra & Ibeas, 2021)



Fig. 1 De izquierda a derecha Georges Claude y el Montaje de la planta undimotriz en Matanzas en el año 1927.

Fuente: Periódico de la época, Matanzas.

En la última década, se han realizados varios proyectos de plantas OTEC (*Ocean Thermal Energy Conversion*, del inglés), por ejemplo, los proyectos propuestos por la empresa estadounidense *Ocean Thermal Energy Corporation* para construir dos plantas OTEC de 5 y 10 MW en las Islas Marshall y en la base naval de Diego García en el Océano Índico construir una planta OTEC de 13 MW para sustituir los actuales generadores diésel. De igual modo en las Bahamas se han proyectado dos plantas maremotérmicas de 5 y 10 MW que serían explotadas en modo de concesión por la compañía americana *Ocean Thermal Energy Corporation* según se reporta en (Romero Moya, 2013; Roca, 2015; Delgado Mero, 2017)

Actualmente se encuentra en operación la planta OTEC más grande del mundo situada en la costa de Kona, en Hawái, Estados Unidos, que se muestra en la Figura 2, las aguas tropicales de la región presentan grandes diferencias de temperatura, existen profundidades notables en zonas cercanas a la costa donde la temperatura puede bajar hasta los 5 grados centígrados en el fondo del mar. (Romero Moya, 2013; Roca, 2015; Delgado Mero, 2017; Pérez Guevara & Reyes Rosario, 2018)



Figura 2 Planta OTEC instalada en Hawaii. Fuente: Pérez y Reyes, 2018

Esta planta OTEC será la primera, de este tipo, que se conecta a la red eléctrica de Estados Unidos y genere de forma continua 100 kW de energía eléctrica. El objetivo final es que la planta crezca hasta ser capaz de producir 100 MW, lo que podría costar más de 1.000 millones de dólares. (Romero Moya, 2013; Roca, 2015; Delgado Mero, 2017; Pérez Guevara & Reyes Rosario, 2018) Aunque esta ha sido una de las tecnologías menos analizadas, en la actualidad se realizan múltiples proyectos de aplicación y desarrollo de este recurso, otro ejemplo es la Universidad de Saga (Japón) que está investigando y desarrollando prototipos de sistemas OTEC. (Abreu Del Sol, 2021; Cristo Doimeadios, 2021)

El objetivo de este trabajo es establecer una comparación desde el punto de vista teórico de tres esquemas de centrales maremotérmicas en cuanto a la cantidad de equipamiento, así como, su funcionamiento. Para esto se realiza una revisión bibliográfica con el objetivo de seleccionar el esquema óptimo en cuanto a construcción y funcionamiento reportado en la literatura.

## MATERIALES Y MÉTODOS

El método utilizado en el presente análisis se basó en el análisis documental, desarrollando técnicas cualitativas de indagación, selección y análisis de literatura especializada (Chavarría Castillo & Atúncar Prieto, 2023) sobre las centrales maremotérmicas con la finalidad de comparar los esquemas reportados. En esta línea se refieren tres fases:

- 1.- Acceder a la información.
- 2.- Determinar los esquemas de centrales maremotérmicas.
- 3.- Comparar en cuanto a elementos constructivos y funcionamiento.

## RESULTADOS

Una central maremotérmica es un sistema capaz de aprovechar los gradientes térmicos oceánicos para producir electricidad. Se trata de una máquina térmica en la que el agua superficial actúa como fuente de

calor, mientras que el agua extraída de las profundidades actúa como refrigerante (Nuñez Riva, 2012; García Huante & Garduño Ruiz, 2022). La transformación de la energía térmica en eléctrica se lleva a cabo mediante diferentes tecnologías de aprovechamiento, las cuales se exponen a continuación.

### Sistema de ciclo cerrado o ciclo de Claude

El esquema de una central maremotérmica de sistema de ciclo cerrado se muestra en la Figura 3.

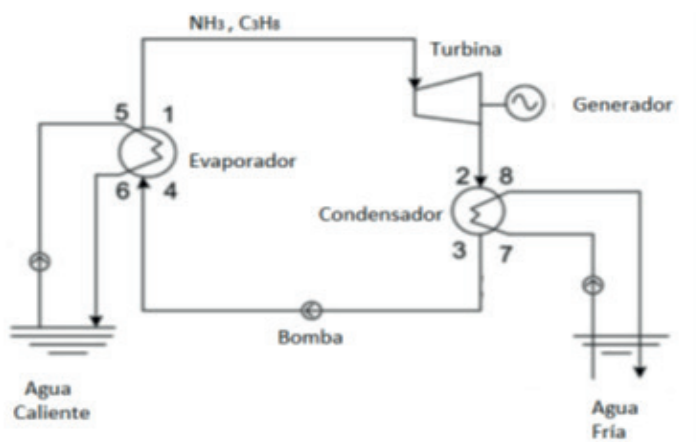


Figura 3 Diagrama de componentes de un sistema OTEC de ciclo cerrado. Fuente: Gil Alba, 2017

Este utiliza un fluido de trabajo distinto del agua con facilidad de transmisión de calor y bajo punto de ebullición tal como, el amoníaco, propano, freón, óxido de etileno, etc. (Nuñez Riva, 2012) El fluido de trabajo se vaporiza al recibir calor del agua cálida del mar y este vapor fluye a través de una turbina, donde su expansión genera energía mecánica. El fluido de trabajo al salir de la turbina, vapor a baja presión, se condensa en un intercambiador de calor cuyo líquido refrigerante es el agua de mar fría, y este condensado se bombea al evaporador para iniciar de nuevo el ciclo. (Gil Alba, 2017; Salz, 2018; García Huante & Garduño Ruiz, 2022)

### Sistema de ciclo abierto o ciclo de Anderson:

El esquema de una central maremotérmica de sistema de ciclo abierto o ciclo de Anderson se muestra en la Figura 4. En este ciclo, el fluido de trabajo es el agua cálida de la superficie del mar, que fluye a través de una cámara de vacío o evaporador flash, donde al disminuir la presión, disminuye también el punto de ebullición del agua de mar y ocurre la evaporación del agua. El vapor separado del agua líquida, fluye a través de la turbina en la cual se transforma su energía a energía cinética rotacional, y esta es usada por el generador para producir energía eléctrica. El vapor que sale de la turbina fluye hacia el condensador cuyo líquido refrigerante es el agua de mar procedente de las profundidades. (Nuñez Riva, 2012; Salz, 2018; Cristo Doimeadios, 2021; García Huante & Garduño Ruiz, 2022)

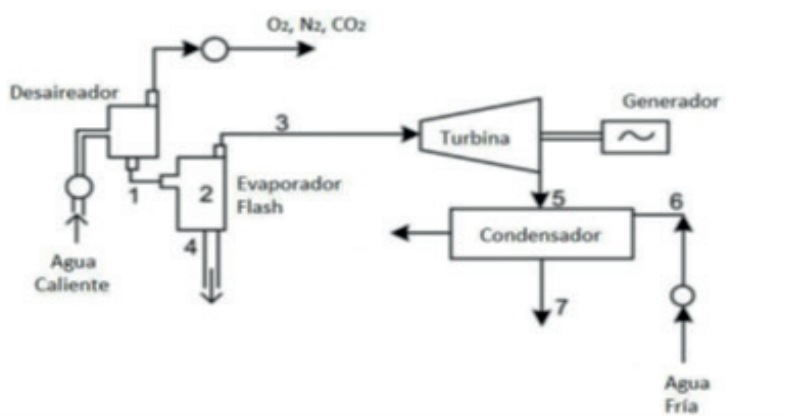


Figura 4 Diagrama de componentes de un sistema OTEC de ciclo abierto. Fuente: Gil Alba, 2017

### Sistema de ciclo híbrido

El esquema de una central maremotérmica de sistema de ciclo híbrido se muestra en la Figura 5 y es la combinación de los dos ciclos anteriores con una doble funcionalidad: producir electricidad y desalinizar el

agua del mar. Para generar electricidad se utiliza un sistema idéntico al ciclo cerrado utilizando fluidos de trabajo con bajos puntos de ebullición; a este ciclo se incorpora un ciclo abierto cuya finalidad es la obtención de agua destilada. El agua caliente de la superficie del mar al circular por el evaporador se evapora en la cámara de vacío y posteriormente se condensa por la acción del agua fría del fondo del mar. Esta agua que se recoge tras la condensación se trata de agua destilada y puede ser utilizada en numerosas aplicaciones tales como el consumo humano o la agricultura. (Salz, 2018; Cristo Doimeadios, 2021)

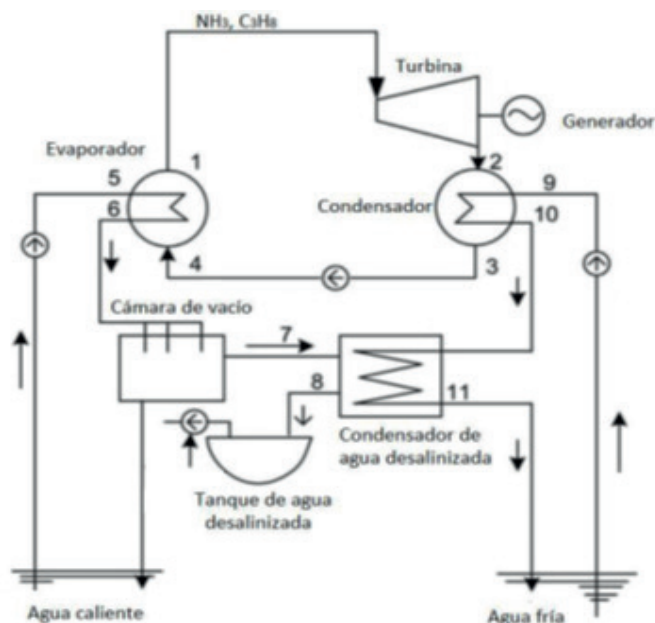


Figura 5 Diagrama de componentes de sistema OTEC de ciclo híbrido. Fuente: Gil Alba, 2017

## DISCUSIÓN

Se considera que el esquema del sistema OTEC basado en el ciclo de Claude presenta las siguientes desventajas: necesita para su operación de un fluido de trabajo, como los mencionados; estos fluidos de trabajo son gases con riesgo de explosión, como el propano, o de efecto invernadero, como el freón, o tóxico, como el amoníaco; en caso de escape del fluido de trabajo se detiene la producción de energía eléctrica; y se necesita de un medio de almacenamiento. En el caso del esquema del sistema OTEC basado en el ciclo híbrido, además, de presentar las mismas desventajas del ciclo de Claude, tiene el inconveniente que necesita más equipamiento. Las ventajas del sistema OTEC basado en el ciclo de Anderson las siguientes: el fluido de trabajo es el agua de mar, luego no existen riesgo de explosiones, o de contaminación, o de intoxicación; tampoco existe la necesidad de almacenamiento del fluido de trabajo y se obtiene como subproducto agua desalinizada que puede ser empleada para la agricultura, piscicultura y consumo humano, por tanto, este es el esquema que los autores consideran idóneo para su construcción en Cuba.

## CONCLUSIONES

Se compararon tres esquemas de centrales OTEC reportados en la literatura y se selecciona, considerando el funcionamiento y cantidad de equipos, como esquema óptimo para su implementación en las costas cubanas el esquema de ciclo abierto o ciclo de Anderson. Los autores proponen continuar las investigaciones sobre esta temática dado que la energía maremotérmica según los avances tecnológicos reportados en la literatura y las plantas operativas en el mundo, apunta a ser una de las futuras tecnologías de generación de electricidad ecológica más constantes e ininterrumpidas en comparación con la fotovoltaica y la eólica.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Abreu Del Sol, M. C. (2021). Selección de sitios para la obtención de energía maremotérmica. [Tesis de Licenciatura. Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas, Universidad de La Habana]. [https://www.researchgate.net/publication/365285118\\_Seleccion\\_de\\_sitios\\_para\\_la\\_obtencion\\_de\\_energia\\_maremotermica\\_terrestre\\_utilizando\\_tecnologia\\_satelital](https://www.researchgate.net/publication/365285118_Seleccion_de_sitios_para_la_obtencion_de_energia_maremotermica_terrestre_utilizando_tecnologia_satelital)

2. Ballesteros Ballesteros, V. A., & Gallego Torres, A. P. (2019). Modelo de educación en energías renovables desde el compromiso público y la actitud energética. *Revista Facultad de Ingeniería*, 28(52), 27-42. [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0121-11292019000300027](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0121-11292019000300027)
3. Barragas Llanos, R. A., & Llanes Cedeño, E. A. (2020). La generación de energía eléctrica para el desarrollo industrial en el Ecuador a partir del uso de las energías renovables. *Universidad, Ciencia y Tecnología*, 24(104), 36-46. <https://uctunexpo.autanabooks.com/index.php/uct/article/view/3>
4. Chavarría Castillo, G. D., & Atúncar Prieto, C. A. (2023). Metaverso: mundo paralelo digital en la primera infancia. *Maestro y Sociedad*, 20(3).
5. Cristo Doimeadios, A. (2021). Planta Conversora de Energía Térmica Marina con amoniaco. Fundamentos y selección. [Tesis de fin de grado. Universidad de Holguín].
6. Delgado Mero, D. N. (2017). Estudio de prefactibilidad económica de la utilización de la energía maremotérmica para la producción de energía eléctrica y agua dulce en las condiciones de las Islas Galápagos. [Tesis de fin de grado, Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí].
7. García Huante, A., & Garduño Ruiz, E. P. (2022). Energía por Gradiente Térmico: Posible detonante para el desarrollo de México. *Ambiente y Agua*, 61(1), 30-34. [https://www.researchgate.net/profile/Alejandro-Garcia-Huante/publication/358485813\\_Energia\\_por\\_Gradiente\\_Termico\\_Posible\\_detonante\\_para\\_el\\_desarrollo\\_de\\_Mexico/download](https://www.researchgate.net/profile/Alejandro-Garcia-Huante/publication/358485813_Energia_por_Gradiente_Termico_Posible_detonante_para_el_desarrollo_de_Mexico/download)
8. Gil Alba, R. (2017). Estudio sobre la implantación de la tecnología maremotérmica. [Tesis de Fin de Grado, Universidad Carlos III de Madrid].
9. Herrera, J., Sierra, S., & Ibeas, A. (2021). Ocean Thermal Energy Conversion and other uses of deep Sea Water. A Review. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(4). doi:<https://doi.org/10.3390/jmse9040356>
10. Monroy Marquez, D. A. (2017). Estudio de prefactibilidad para la generación de energía eléctrica mediante el aprovechamiento del gradiente térmico entre las guas superficiales y las profundas de la zona marítima exclusiva de Guatemala. [Tesis de fin de grado, Universidad Rafael Landívar]. <http://recursosbiblio.url.edu.gt/tesiseortiz/2017/02/03/Monroy-Diego.pdf>
11. Nuñez Riva, L. R. (2012). El aprovechamiento de las energías renovables marinas como opción tecnológica de futuro. *Economía industrial*, 99-108. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4156043>
12. Pérez Guevara, J. D., & Reyes Rosario, A. J. (2018). Estudio de la factibilidad para la instalación de una planta maremotérmica en la costa de Oaxaca. [Tesis de fin de grado, Universidad Profesional "Adolfo López Mateos"].
13. Reyes, S. A. (2021). Variación de componentes de Ciclo Rankine Orgánico cerrado enfocado a conversión de energía oceánica térmica (OTEC) usando simulación computacional para evaluar la eficiencia térmica del ciclo. [Tesis de fin de grado, Universidad Nacional Autónoma de México]. <https://cemieoceanico.mx/Tesis/pdf/tesis2.pdf>
14. Roca, J. A. (2015). Makai Ocean pone en marcha la mayor planta térmica oceánica del mundo en Hawái. *El periódico de la energía*. <https://elperiodicodelaenergia.com/makai-ocean-pone-en-marcha-la-mayor-planta-termica-oceanica-del-mundo-en-hawai/>
15. Romero Moya, A. R. (2013). Evaluación del potencial maremotérmico en costa norte y sur del estado de Veracruz. [Tesis de Master en Ingeniería Eléctrica, Universidad Veracruzana].
16. Salz, K. (2018). An assessment of the performance and potential of OTEC innovation clusters worldwide. [Tesis de Maestría, Universidad Tecnológica de Delft]. <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid:863035f9-ed11-4737-aa76-d854641da6e0/datastream/OBJ/download>
17. Wilberforce, T., El Hassan, Z., Durrant, A., Thompson, J., Soudan, B., & Olabi, A. G. (2019). Overview of ocean power technology. *Energy* (175), 165-181. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.03.068>

### **Conflicto de intereses**

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.