VIII.- ENERGÍA MAREMOTÉRMICA. CENTRALES (C.E.T.O.)

pfernandezdiez.es

1.- INTRODUCCIÓN

Las máquinas térmicas son mecanismos cíclicos que reciben calor de una fuente caliente (de alta temperatura), producen un trabajo neto y eliminan calor a un sumidero térmico de baja temperatura; cuanto mayor sea la diferencia de temperatura entre la fuente de calor y el sumidero, mayor será la eficiencia teórica de conversión de energía.

Como los combustibles convencionales (fuentes fósiles) se vuelven cada vez más costosos y menos disponibles, se están realizando esfuerzos en el sentido de mejorar la eficiencia térmica operando con focos térmicos con temperaturas cada vez más elevadas; otras técnicas incluyen el uso de ciclos combinados o de cogeneración que transforman una mayor fracción de la energía de entrada en trabajo útil.

Sin embargo, si alguna fuente de energía fuera barata y su disponibilidad ilimitada, las máquinas térmicas que operasen entre fuentes de calor con una diferencia de temperatura muy pequeña podrían resultar atractivas, aunque su eficiencia térmica fuese extremadamente baja; ésta última situación es la que estimula la investigación y el desarrollo en la conversión de la energía térmica del océano, C.E.T.O.

Un dispositivo para la conversión de la energía térmica del océano consiste en una máquina térmica diseñada para operar entre una temperatura relativamente cálida como es la de la superficie del océano y otra más baja como la temperatura del agua que se encuentra a grandes profundidades; este punto de vista fue sugerido por primera vez por el físico francés d'Arsonval en 1881.

En la práctica, la diferencia de temperatura requerida para que la operación resulte económica es de alrededor de 20°C; a un nivel de 600÷900 metros bajo la superficie del océano, la temperatura es de aproximadamente 5 a 8ºC. Para lograr la diferencia de temperatura deseada ya citada, se deben buscar regiones geográficas de la superficie del océano calentadas por el sol en donde la tempe-

ratura promedio sea de 25°C÷30°C, como mínimo.

En las zonas situadas entre los trópicos, la variación de la temperatura del mar en función de la profundidad, permite distinguir tres capas, Fig VIII.1:

- La superficial, de 100 ÷ 200 m de espesor actúa como colector solar, con temperaturas entre 25°C y 30°C

- La intermedia, entre 200 ÷ 400 m de profundidad, con una variación rápida de temperatura y que actúa como barrera térmica entre las capas superior y profunda

- La profunda, en la que la temperatura disminuye suavemente hasta alcanzar 4°C a 1000 m y 2°C a 5000 m

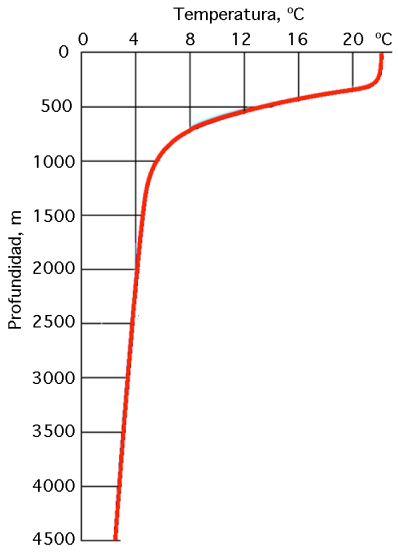

Fig VIII.1
Variación de la temperatura con la profundidad

Por lo tanto, en los mares tropicales existe una diferencia de temperatura, entre la superficie y una profundidad de 1000 m, del orden de 18°C÷20°C que se puede aprovechar para accionar una máquina térmica de vapor.

La conversión de la energía térmica del océano indica la energía que es posible producir aprovechando la diferencia de temperatura existente entre el agua superficial y la más fría de las capas profundas; esta diferencia es más sensible en las regiones tropicales, donde se alcanzan generalmente los 20°C, entre la superficie y los 500 m de profundidad.

Tales regiones sólo existen en las latitudes cercanas al Ecuador; las diferencias más grandes de temperatura se encuentran en la parte occidental del Océano Pacífico; sin embargo, también son satisfactorias las regiones al este y al oeste de Centroamérica y algunas áreas alejadas de la costa del sur de los Estados Unidos y al oriente de Florida.

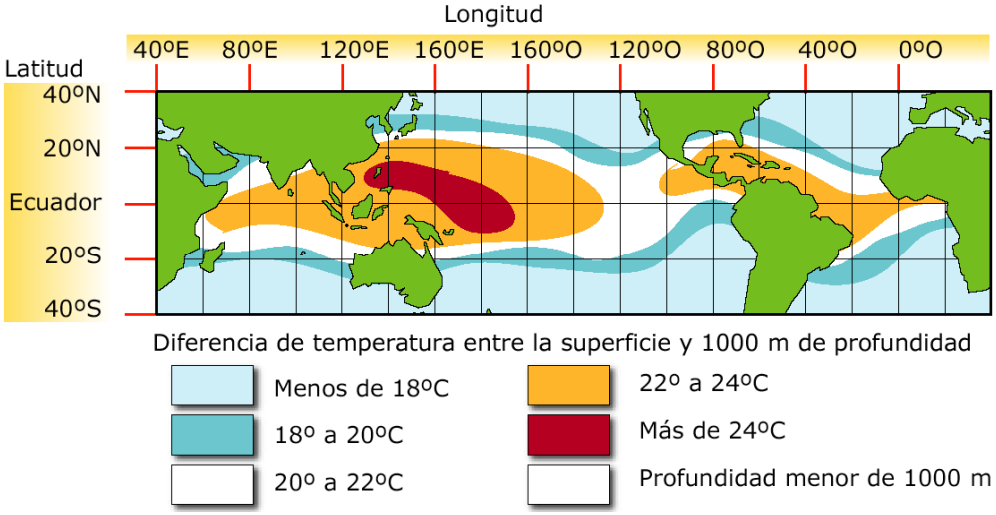

Fig VIII.2.- Zonas térmicamente favorables; se encuentran en las regiones ecuatoriales y subtropicales

VIII.2.- SISTEMAS C.E.T.O.

Un sistema C.E.T.O. es un ciclo de potencia de vapor, tipo Rankine, que opera en condiciones bastante especiales; como las temperaturas en el evaporador y el condensador son bajas, se debe escoger un fluido de trabajo cuya presión de vapor sea bastante grande a esas temperaturas; por ejemplo:

- *El propano (C_3H_8) tiene una presión de vapor de alrededor de 5,5 atm a 5°C y un valor aproximado de 9,5 atm a 25°C*
- *El amoniaco tiene a las temperaturas citadas, presiones de vapor de 5,2 atm y 10,3 atm respectivamente*

Existen otros fluidos con características térmicas similares.

El agua tibia de la superficie del océano se succiona hacia un intercambiador de calor o evaporador, en donde se evapora el fluido de trabajo del ciclo Rankine; el vapor pasa por una turbina que acciona un generador eléctrico y penetra en el condensador.

El agua fría que se bombea de las profundidades del océano mediante una tubería telescópica, se emplea para enfriar el fluido de trabajo que, al condensarse y volver al estado líquido, se bombea al evaporador y se inicia así un nuevo ciclo.

Además de las condiciones impuestas en la presión de vapor del fluido, una planta C.E.T.O. requiere unas enormes dimensiones de los sistemas de circulación de las corrientes templada y fría; hay que hacer notar que el agua fría se bombea desde profundidades de $600 \div 900$ m.

Cuando las plantas C.E.T.O. se destinan para generar electricidad, unos cables la conducirán desde la plataforma flotante hasta el fondo del océano, a unos $1200 \div 1500$ m de profundidad, y mediante otro cable fijo se conducirá a la costa; los cables deben ser suficientemente fuertes para resistir las intensas fuerzas producidas por las corrientes oceánicas, las olas y la misma plataforma flotante.

En algunas localidades donde la diferencia de temperatura es favorable para la generación de energía eléctrica, la distancia a la costa puede ser demasiado grande lo que impide su conducción económica; en tales casos, las plantas C.E.T.O. podrían funcionar como auténticas fábricas transformadoras en las que la materia prima sería transportada desde la costa y con la energía generada en la plataforma se podrían obtener determinados productos como el aluminio Fig VIII.10, o el metanol, o el amoniaco para la industria de fertilizantes Fig VIII.9, caso en el que la electricidad generada se aprovecharía para separar, por medio de hidrólisis, hidrógeno del agua de mar, el cual combinado con el nitrógeno extraído del aire permitiría fabricar amoníaco.

El hidrógeno líquido sería otro producto que podría llevarse a la costa y utilizarse en celdas de

combustible para la producción de electricidad a gran escala.

Aunque quedan por resolver algunos problemas técnicos, como la obstrucción de las superficies intercambiadoras de calor por organismos marinos, existen varias instalaciones de pruebas en USA y en otras partes del mundo que intentan perfeccionar la conversión de la energía térmica del océano como una tecnología viable.

El rendimiento de una máquina térmica está limitado por el Principio de Carnot; una máquina del tipo C.E.T.O. evolucionando entre las temperaturas, $T_1 = 30°C$ y $T_2 = 4°C$ tendría un rendimiento máximo:

$$\eta_{máx} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \approx 8{,}6\%$$

que en la práctica se reduciría a valores del orden de un $3\% \div 4\%$, por lo que la generación de una cantidad de energía apreciable del orden de los MW exige utilizar enormes cantidades de agua.

VIII.3.- CARACTERÍSTICAS DE LA ENERGÍA TÉRMICA DE LOS OCÉANOS

Las características de la energía térmica de los océanos son las siguientes:

a) Es prácticamente inagotable puesto que está relacionada con los grandes procesos climatológicos; sin embargo, los lugares favorables para su instalación, caracterizados por una temperatura superficial del agua muy elevada, con variaciones estacionales irrelevantes y con profundidades marinas muy grandes junto a las costas (para reducir la longitud del conducto de aspiración), no son muy numerosos; es posible, sin embargo, evitar en cierta medida esta o aquella condición aumentando la temperatura de la capa caliente aprovechada (impidiendo la evaporación mediante delgadas capas de aceite, etc.), o utilizando instalaciones flotantes.

b) El rendimiento teórico máximo de Carnot es muy bajo

0,073 si el agua caliente está a 28°C y la fría a 6°C
0,086 para el agua caliente a 30°C y la fría a 4°C

Es indispensable, por tanto, acercarse lo más posible a la reversibilidad (ciclo con numerosos pasos evaporación-condensación, y viceversa) y hacer que la parte de energía consumida por las instalaciones auxiliares (extractor de gases disueltos y bombas de circulación) se reduzca al mínimo.

c) La turbina debe ser de grandes dimensiones (lo que impone una baja velocidad de rotación) para que la diferencia de tensión de vapor entre el condensador y el evaporador sea mínima; para obviar ésto se ha propuesto emplear un fluido auxiliar, como el amoníaco, cuya tensión de vapor varía con la temperatura mucho más que la del agua.

d) Aunque en las actuales condiciones de la economía mundial una central térmica semejante no

parece muy competitiva, presenta la interesante particularidad de que una central de 3,5 MW produciría grandes cantidades de agua dulce del orden de 300 Ton/h; por otro lado, el agua de las profundidades utilizada para refrigerar el condensador, saldría de la instalación a unos 16°C (18.000 Termias/h en el caso citado) y sería por tanto utilizable como agua de refrigeración en determinadas industrias.

VIII.4.- ANTECEDENTES HISTÓRICOS

Realizaciones y proyectos.- En 1881 Arséne D´Arsonval presenta por primera vez la idea de una central maremotérmica; consistía en aprovechar, como foco térmico caliente, el agua superficial de los mares tropicales, del orden de 24ºC÷30°C, para vaporizar amoniaco presurizado a través de un intercambiador de calor y utilizar el vapor resultante para accionar una turbina acoplada a un generador. El agua fría del océano transportada a la superficie desde 800 a 1.000 m de profundidad, con temperaturas del orden de 4°C÷8°C, sería el foco térmico frío, y condensaría el vapor de amoniaco a través de otro intercambiador de calor, resultando así un ciclo Rankine normal.

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 prácticamente esta energía. El agua superficial se introducía continuamente en una cámara cerrada en la que se había practicado un vacío suficiente para llevar el agua a la ebullición; el vapor producido se llevaba a una turbina y condensaba cuando entraba en contacto con la pared refrigerada con el agua de las profundidades, aspirada mediante una conducción. La corriente de vapor que continuamente se formaba accionaba la turbina conectada a un generador, produciendo así energía eléctrica, Fig VIII.3, conformando todo ello un ciclo C.E.T.O. abierto.

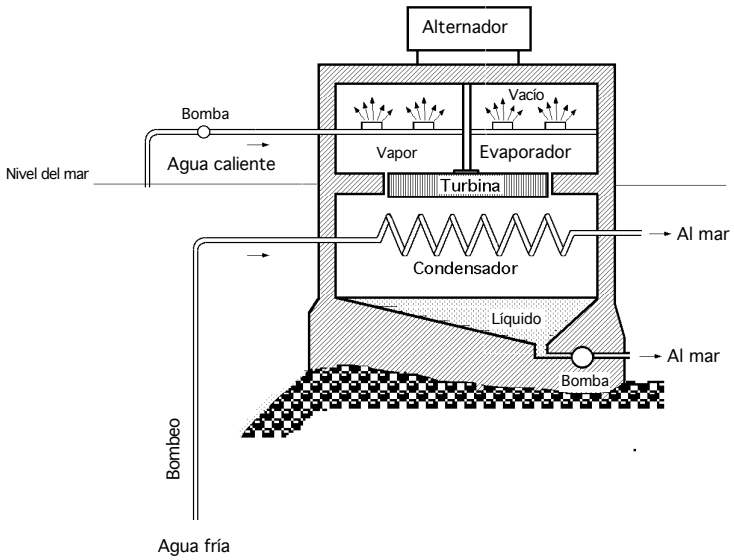

Fig VIII.3.- Máquina de Claude

Un experimento con equipamiento de dimensiones reales, pero todavía en condiciones imagina-

rias, fue realizado por el mismo Claude en Ougrée (Bélgica) en 1928. Sin embargo, las pruebas sucesivas que llevó a cabo en el mar, primero a lo largo de las costas cubanas (1929-30), en la bahía de Matanzas, mediante una central de ciclo abierto de 22 kW, que tenía un tubo de aspiración para el agua fría del fondo de 1,6 m de diámetro y 2 km de longitud, que funcionó 11 días hasta que éste fué destruido por una tempestad, y luego en aguas de Río de Janeiro (1934-35), en donde diseñó una planta flotante de 2,2 MW, montada sobre un barco mercante fondeado a 100 km de la costa, para producir 2000 toneladas de hielo, si bien demostraron la viabilidad del proyecto de Claude, acabaron en fracaso a causa de los efectos del movimiento del oleaje sobre la conducción sumergida.

A partir de los años 50 se realizan en este campo grandes progresos tanto teóricos como técnicos, gracias al ingeniero Nizery. El gobierno francés y la empresa Societé Energie des Mers financian el estudio de la instalación en tierra firme en Abidjan, Costa de Marfil, de una central para la producción de agua desalinizada alimentada por la energía térmica de los océanos, con 2 módulos de 3,5 MW netos cada uno, aprovechando un gradiente térmico de 20ºC; el tubo de agua fría tenía una longitud de 4 km. Las condiciones naturales para su construcción eran las idóneas, pero el proyecto fue abandonado posteriormente por problemas políticos, Fig VIII.4.

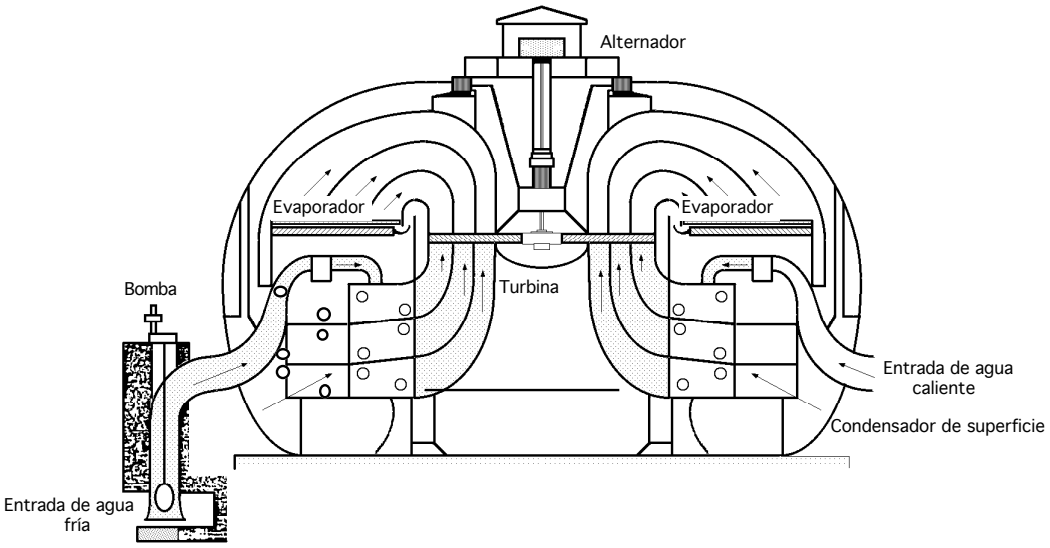

Fig VIII.4.- Proyecto de la central maremotérmica de Abidjan

A finales de los 1960 se presentan en U.S.A. tres proyectos de centrales flotantes en ciclo cerrado: los de Lockheed de (160 MW), la T.R.W. de (100 MW) y la Universidad John Hopkins (100 MW), que fueron abandonados.

A raíz de estos trabajos se empezaron a construir las siguientes plantas experimentales: En 1979 la flotante de ciclo abierto Mini-C.E.T.O. en Hawai, de 50 kW brutos y 18 netos, la C.E.T.O.1 en el Caribe, de 1 MW, y en 1982 un consorcio de compañías japonesas, construye en tierra firme unas plantas con una potencia bruta de 100 kW, en la isla de Nauru, que operaron unos pocos me-

ses; sin embargo eran demasiado pequeñas para extrapolar los resultados a sistemas comerciales de mayor tamaño. Con el propósito de obtener experiencia se instala en Hawai una pequeña planta experimental en tierra; fue diseñada y puesta en funcionamiento en 1993; la turbina fue diseñada para generar en el alternador 210 kW, y potencia neta de 100 kW, con agua superficial a 26ºC y agua fría a 6ºC; un 10% del vapor producido se desviaba a la superficie de un condensador para producir 0,4 l/seg de agua desalinizada; la planta funcionó con éxito durante 6 años.

En 1999 se inician los estudios por la Universidad de Saga (Japón) y NIOT (India), para la instalación de una planta maremotérmica experimental de 1 MW de potencia bruta en la India. La planta fue instalada en el año 2000 en un barco, (el Sagar Shakthi), fondeado a 35 km de Tiruchendur, en el sureste de la India. La planta, diseñada para operar con un gradiente térmico de 22ºC, extraía agua fría a 7ºC desde 1000 m de profundidad mediante una tubería de 0,88 m de diámetro; la planta estuvo operativa en el periodo 2000-2002. En la actualidad está en proyecto la construcción de una central de 40 MW, para luego construir otra de 100 MW. Varios países europeos (Francia, Italia, Alemania) también están realizando investigaciones sobre este tipo de centrales.

VIII.5.- FUNDAMENTOS DEL APROVECHAMIENTO DE ENERGÍA MAREMOTÉRMICA

Sistemas de ciclo abierto tipo Rankine.- El fluido termodinámico es el propio agua marina que se puede vaporizar en una cámara de vacío o en un evaporador mediante un sistema ***flash***; el agua caliente de la superficie entra por la parte superior, a través de unos orificios, y se convierte en un vapor húmedo a baja presión. En el evaporador se obtiene una mezcla de vapor y agua líquida a la presión de saturación correspondiente a la temperatura del agua (0,0356 bar para una temperatura superficial del mar de 27ºC). El vapor húmedo forma una corriente central, mientras que una película de agua desciende lamiendo las paredes; este vapor se separa del líquido en la sección inferior, de forma que a la turbina se lleva únicamente vapor saturado seco y a continuación se dirige a un condensador, en el que se obtiene de nuevo agua líquida saturada a una presión y temperatura del orden de 0,017 bars y 15ºC.

El condensador puede ser de contacto (mezcla), Fig VIII.5, o de superficie (intercambiador de calor), Fig VIII.7, obteniéndose en el mismo agua templada para acuicultura o agua dulce potable, respectivamente. En una instalación de estas características se utilizan varios evaporadores en paralelo, siendo preciso eliminar los gases disueltos en el agua, fundamentalmente el aire, mediante técnicas de vacío. Hay que reducir asimismo al mínimo los efectos de la corrosión, las pérdidas de calor y el arrastre de salmuera.

El rendimiento de este sistema es muy bajo, del orden de un 7%; ello se debe a la baja temperatura del foco caliente y al pequeño gradiente térmico entre los focos frío y caliente.

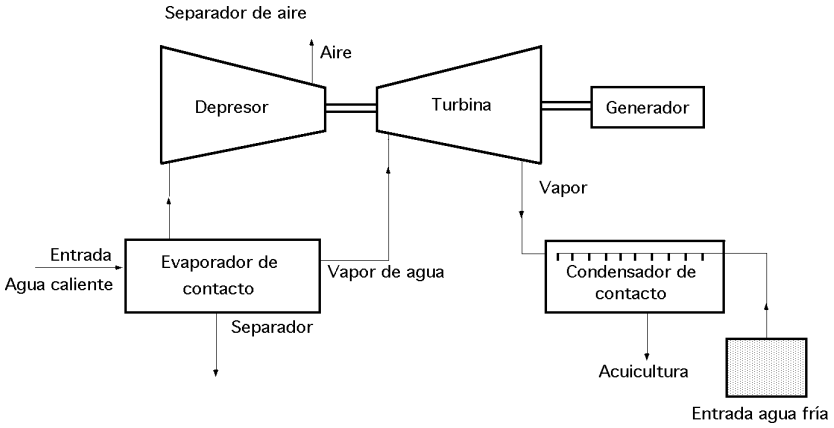

Fig VIII.5 .- Central maremotriz C.E.T.O. para producción de energía y acuicultura

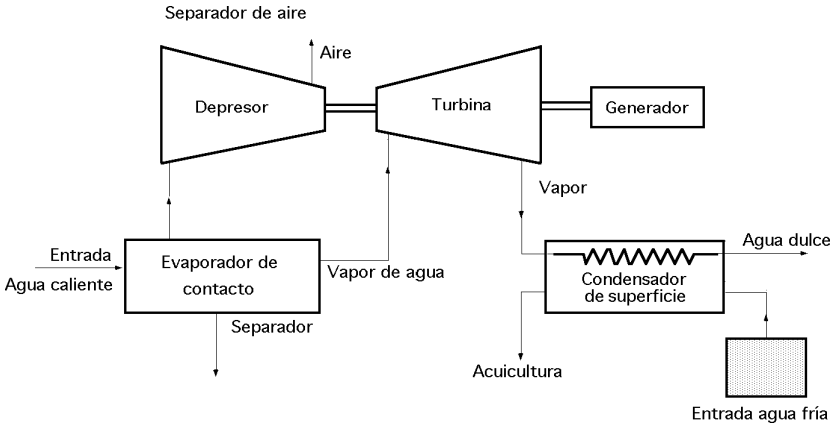

Fig VIII.6 .- Central maremotriz C.E.T.O. para producción de energía y agua dulce

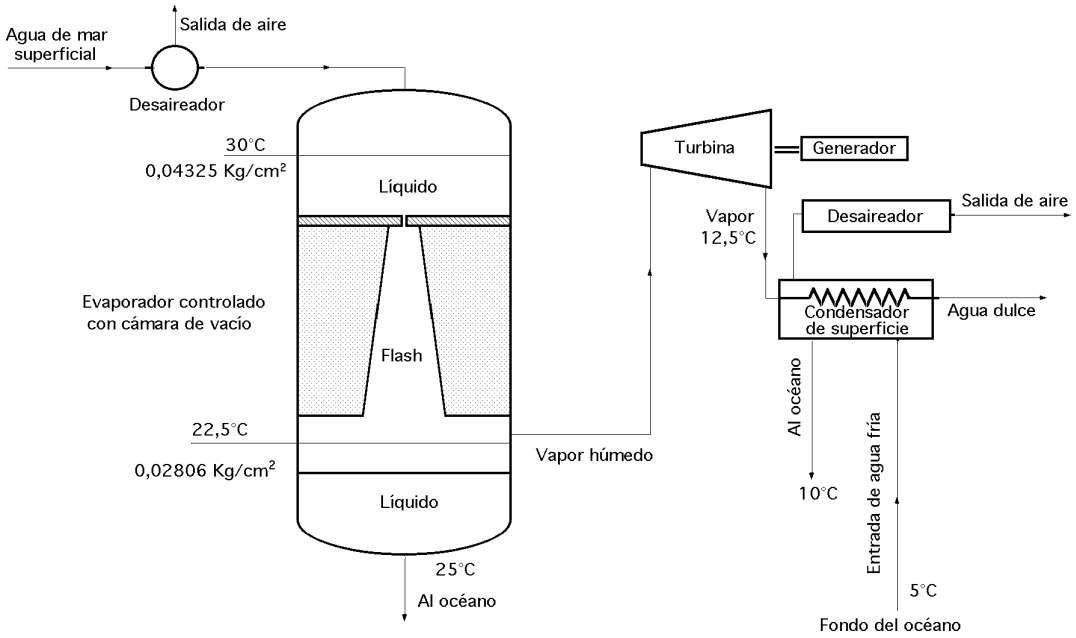

Fig VIII.7.- Ciclo abierto con evaporación controlada por contacto en cámara de vacío (evaporación "flash")

Además es preciso consumir energía para bombear el agua fría del fondo del mar para condensar el vapor y accionar la bomba de vacío del evaporador, que se estima entre un 20% a un 30% de la

potencia eléctrica generada; las bajas presiones del vapor de trabajo implican la necesidad de diseñar turbinas específicas, de gran tamaño.

Sistemas de ciclo cerrado.- Utilizan un fluido térmico que recorre un circuito secundario de bajo punto de ebullición, como el amoníaco, propano, freón, óxido de etileno, etc., Fig VIII.8; se conoce como ciclo Anderson; el calor se transfiere desde el agua caliente procedente de la superficie del mar al fluido de trabajo para evaporarlo a presiones más adecuadas, del orden de 10 bar. El vapor se dirige a la turbina acoplada al generador de electricidad. El agua fría del mar pasa a través del condensador de superficie que contiene el fluido de trabajo vaporizado, que le licúa, reiniciándose el ciclo.

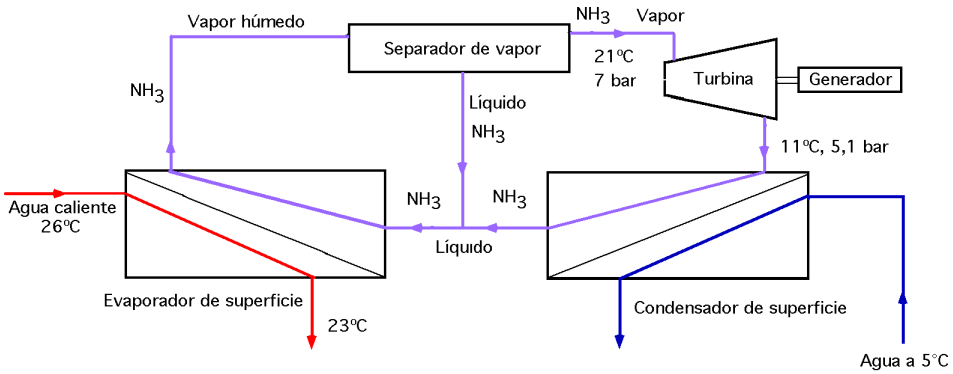

Fig VIII.8.- Central maremotérmica de ciclo cerrado

Las *ventajas* del ciclo abierto frente al cerrado son:

a) El uso del agua como fluido térmico, permite emplear materiales más baratos que si se utilizara amoníaco u otros fluidos similares

b) Producen agua dulce a la salida del condensador

c) Requieren menos cantidad de agua para producir la misma energía que el cerrado, ya que no tienen las pérdidas en el calentador de amoníaco que tiene el ciclo cerrado

d) El intercambiador de calor del amoníaco en los ciclos cerrados es muy grande, ya que debe circular mucha agua, y ésto encarece el sistema

Los *inconvenientes* del ciclo abierto frente al cerrado son:

- Los efectos corrosivos del agua de mar y la necesidad de tratarla y desgasificarla para poder introducirla en la turbina

- El utilizar una turbina mucho más grande que en el ciclo cerrado, ya que en este último se usa un vapor a más presión y volumen específico que en el primero

Sistemas híbridos.- Combinan las características de los sistemas de ciclo abierto y de ciclo cerrado como medio de optimizar su funcionamiento, generando electricidad y agua dulce. En estos sistemas, el agua caliente del mar entra en un evaporador donde es súbitamente evaporada (flash),

de forma similar a lo que ocurre en un proceso de evaporación de ciclo abierto. El calor del vapor obtenido se utiliza para vaporizar el fluido de trabajo, de bajo punto de ebullición, que circula en un ciclo cerrado. El fluido vaporizado acciona la turbina y condensa dentro del intercambiador de calor proporcionando agua desalinizada, dulce, que puede ser utilizada para consumo humano o agrícola.

Consideraciones sobre las centrales maremotérmicas.- Se puede mejorar el rendimiento de estas centrales haciendo pasar el agua de la superficie del mar por un estanque de fondo negro que la calentará más por la acción del Sol.

Estas centrales se pueden instalar en tierra firme, en zonas cercanas a la costa o en estructuras flotantes en el océano; en este último caso se necesita una menor longitud de tuberías para las tomas del agua caliente y fría. Un aspecto crítico de estos sistemas es el tubo de aspiración (telescópico) por el que va a circular gran cantidad de agua y que va a alcanzar grandes profundidades.

Como se trabaja a bajas temperaturas, se pueden usar materiales más baratos que en las centrales térmicas convencionales.

Independientemente del tipo de ciclo utilizado en las centrales maremotérmicas, sus componentes fundamentales son:

- *Evaporadores y condensadores*
- *Turbina*
- *Bombas y tuberías*
- *Estructura fija o flotante*
- *Sistema de anclaje y cable submarino (si la central es flotante)*

Los intercambiadores de calor constituyen una parte importante del funcionamiento y coste de los sistemas de ciclo cerrado; deben tener una gran superficie de intercambio térmico para transferir suficiente calor ya que van a funcionar con pequeños gradientes térmicos.

Existen diversos diseños, como los de carcasa y tubos en los que el agua del mar circula por los tubos, y el fluido de trabajo se evapora o condensa en la carcasa; este diseño se mejora usando tubos acanalados en los que el fluido de trabajo circula por los surcos y crestas, produciendo una película delgada que se evapora más eficientemente.

En otros diseños de intercambiadores de placas y aletas, el fluido de trabajo y el agua de mar fluyen a través de placas paralelas, mejorando las aletas entre las placas la transferencia térmica.

El Ti fue el material original empleado en la fabricación de los intercambiadores de calor de ciclo cerrado debido a su resistencia a la corrosión; sin embargo es una opción muy cara para plantas que usan intercambiadores de gran tamaño, por lo que se ha sustituido por el Al o por aleaciones Cu-Ni, aunque éstas no son compatibles con el NH_3.

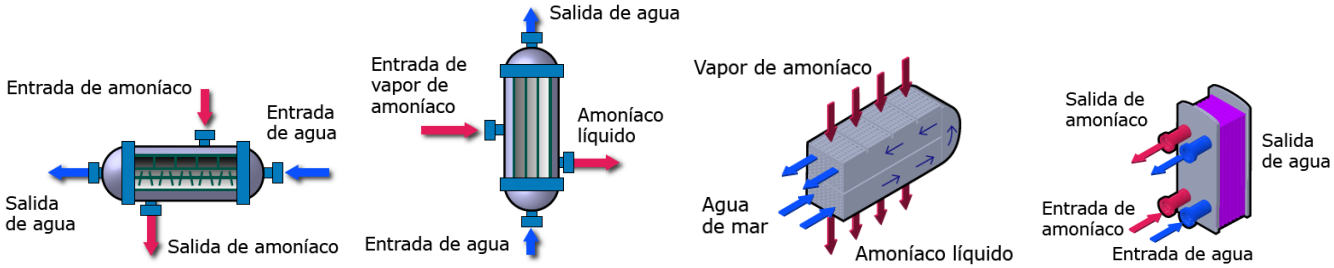

Fig VIII.9.- Tipos de intercambiadores térmicos utilizados en centrales maremotérmicas

Los evaporadores flash utilizados en los sistemas de ciclo abierto incluyen los de:

- *Flujo en canal abierto*
- *Película descendente*
- *Chorro descendente*

En los sistemas de ciclo abierto, una vez que el vapor pasa a través de la turbina, puede condensar en condensadores de contacto directo (mezcla) o en condensadores de superficie. En un condensador de dos etapas, el agua fría se distribuye a través de dos conductos de extremos abiertos rellenos de un material de protección, condensando el 80% del vapor cuando fluye a través del primer conducto en la misma dirección del agua del mar fría. El vapor restante se envía a la parte inferior del segundo conducto y fluye a través de él en dirección opuesta al agua del mar. En la parte superior de este segundo vaso, un sistema de bombas de vacío extrae los gases no condensables con el vapor no condensado.

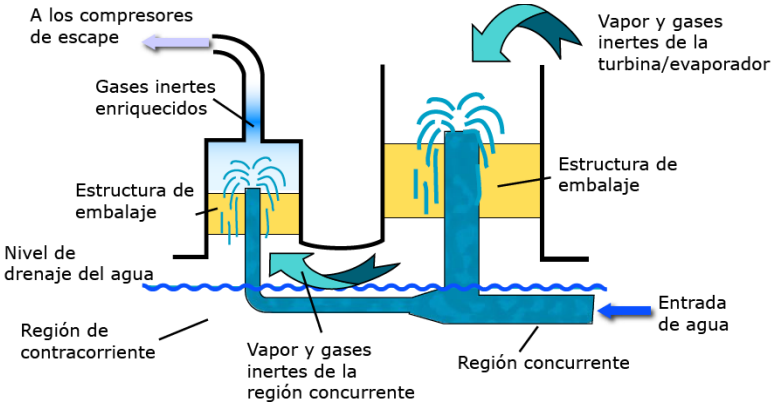

Fig VIII.10.- Condensador de dos etapas, tipo NREL

El vapor de los sistemas de ciclo abierto contiene gases no condensables como el O_2, N_2 y CO_2 que se liberan cuando se somete al agua del mar a la evaporación flash; el aire que entra en la cámara de vacío, se tiene que reducir a niveles muy bajos, ya que de no ser así, pueden interferir en la condensación al cubrir las superficies de los condensadores, e incluso se pueden acumular de forma que lleguen a parar la evaporación.

Estudios realizados para el diseño de las turbinas han llevado a la conclusión de que para gene-

rar 100 MW, las más económicas y fiables deberían funcionar a baja velocidad, 200 rpm, y tener un diámetro del orden de 40 m. Para potencias menores, del orden de 2,5 MW, se podrían utilizar turbinas conformadas por escalones de menor diámetro, como el último escalón de la etapa de baja presión de las turbinas convencionales de condensación utilizadas en centrales térmicas, que tienen un diámetro del orden de 5 m, y que funcionan en condiciones cercanas a las que se necesitan en una planta maremotérmica de ciclo abierto, por lo que serían aptos para trabajar en estas condiciones; plantas mayores requerirían de diversas turbinas de estas características operando en paralelo o la implantación de rotores más grandes.

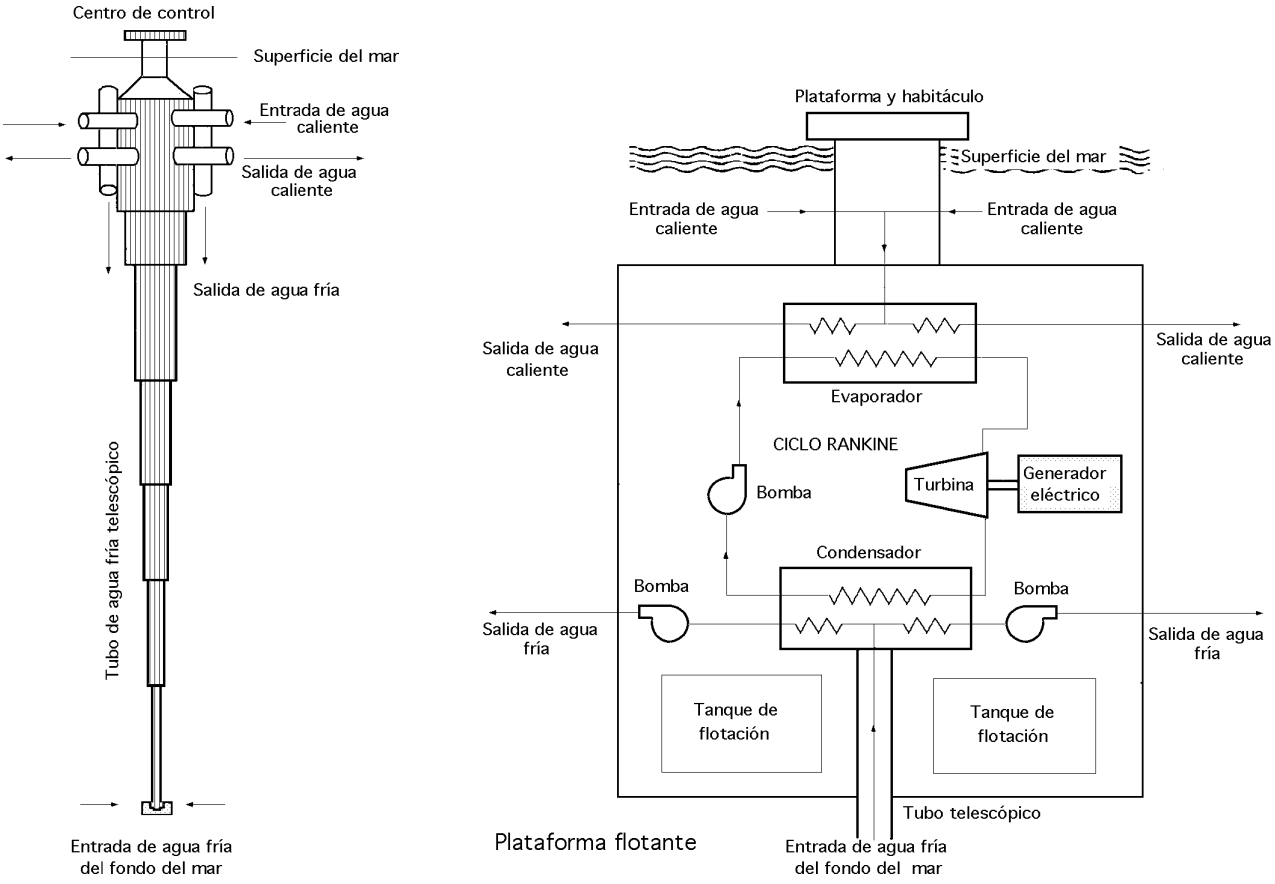

Fig VIII.11.- Disposición esquemática de una central C.E.T.O. de 100 MW

Estos sistemas se podrían utilizar para generar electricidad, o para otras utilidades, como:

- Producción de agua potable

- Generación de hidrógeno por electrólisis, el cual se utilizará como vector de la energía.

- Acuicultura, ya que el agua de las profundidades es muy rica en nutrientes, que servirían para desarrollar un fitoplacton que alimentaría a varias especies marinas

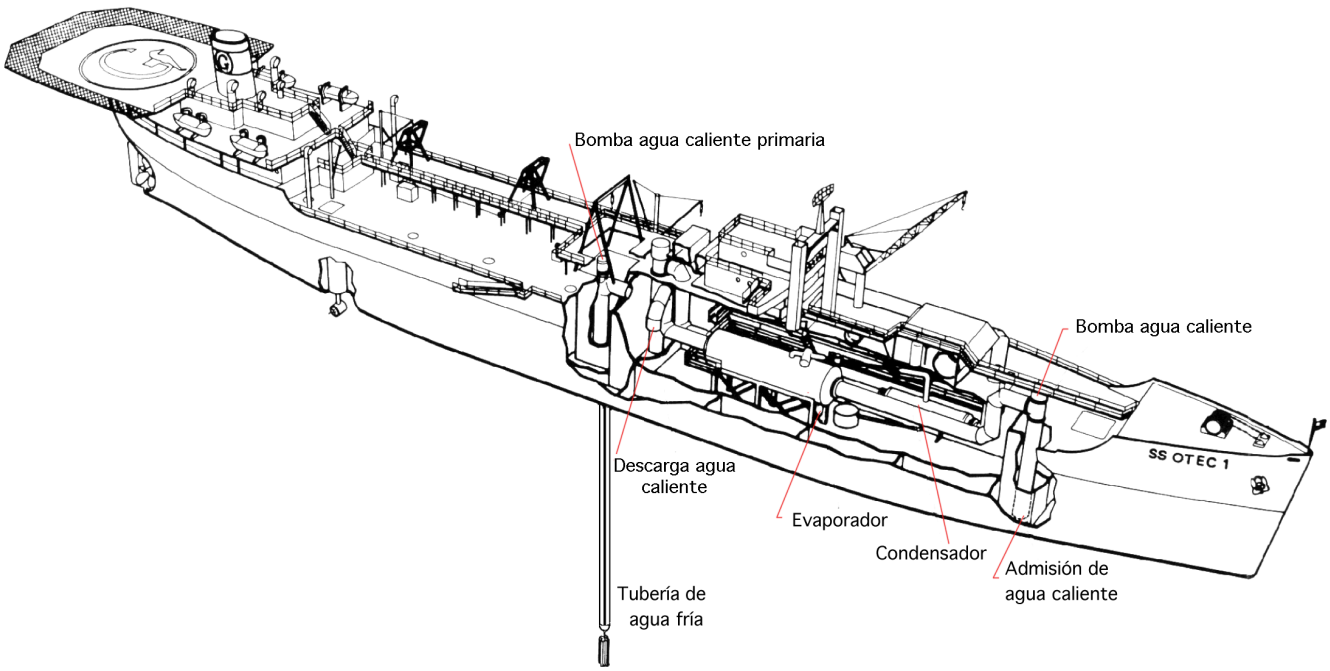

Fig VIII.12.- Vista seccionada de la central C.E.T.O. de 1 MW

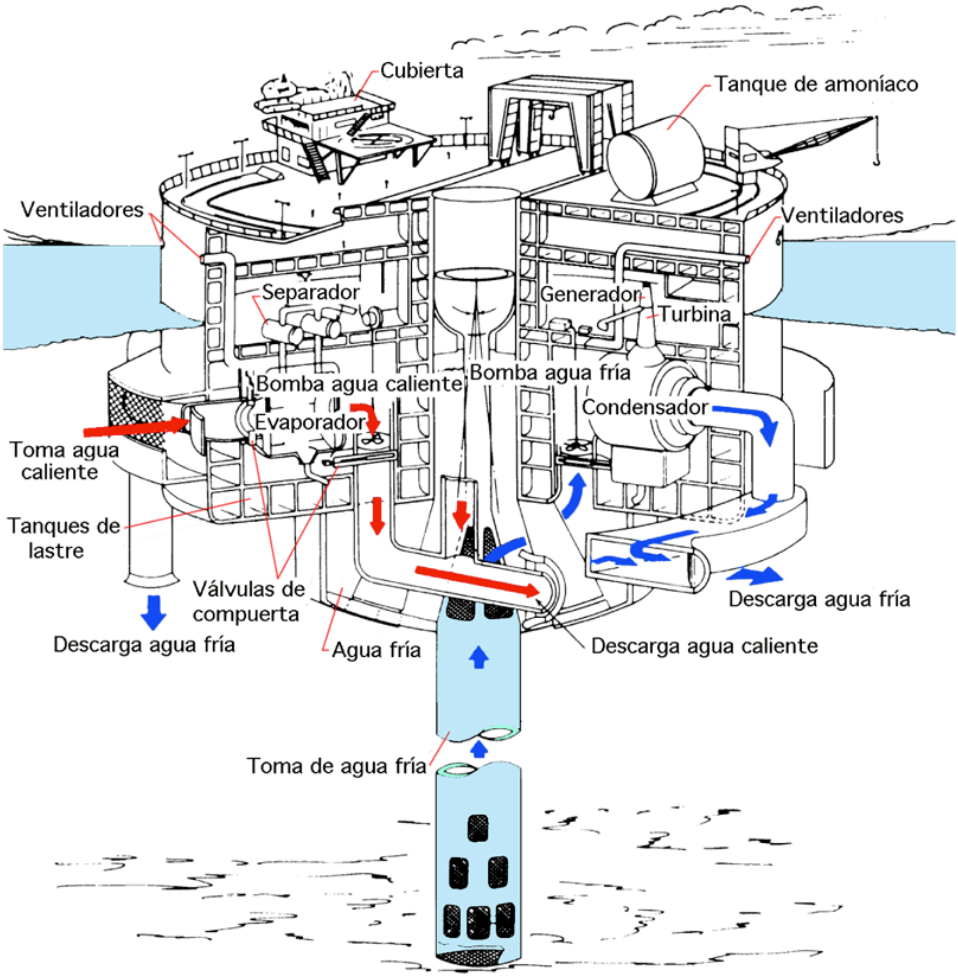

Fig VIII.13.- Vista seccionada de la central C.E.T.O. de 100 MW

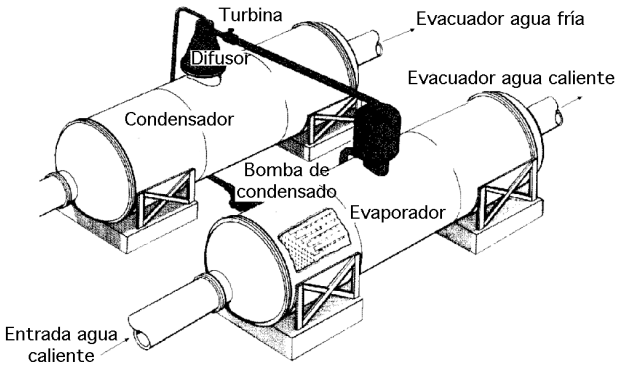

Fig VIII.14 .- Vista de un condensador y un vaporizador de la central C.E.T.O. de 100 MW

Tabla VIII.1.- Coste estimado en % del sistema CETO de 100 MW.
(Mantenimiento: 1,75% anual del coste total de la instalación)

PLATAFORMA	*27,87%*
Casco (Plataforma flotante)	*24,34%*
Equipamiento	*2,70%*
Sistemas auxiliares	*0,83%*
PLANTA DE ENERGÍA	*52,60%*
Condensador (4 unidades) de carcasa y tubos	*21,92%*
Evaporador (4 unidades)	*22,14%*
Turbina (4 unidades)	*2,02%*
Generador eléctrico (4 unidades)	*1,90%*
Instrumentación y control.	*0,65%*
Otros	*3,96%*
DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA	*2,21%*
Transformadores	*0,95%*
Planta eléctrica.	*1,26%*
AGUA DE ALIMENTACIÓN Y DISTRIBUCIÓN	*11,32%*
Tubería telescópica	*10,92%*
Bombas y sistema de propulsión	*3,62%*
Tuberías y otros	*2,72%*

Tabla VIII.2.- Costes estimados de una planta maremotérmica flotante de 100 MW

Distancia a la costa km	*Costos de capital Euros / kW*	*Costo de la energía Euros / kW*
10	*4200*	*0,07*
50	*5000*	*0,08*
100	*6000*	*0,1*
200	*8100*	*0,13*
300	*10200*	*0,17*
400	*12300*	*0,22*

Planta de amoniaco de 100 MW (Fig VIII.15)

- *Energía generada: 100 MW (En 4 módulos de 25 MW)*

- Casco (Plataforma flotante). Diámetro: 103,6 m; Altura: 51,8 m; Peso: 212.000 Tm

- Tubo telescópico de agua fría. (Construido en fibra de vidrio reforzada con plástico) Diámetro: 15,25 m y Longitud: 1225 m

- Fluido de trabajo. 2,65 $x10^6$ litros de amoníaco

- Condensador (4 unidades) de carcasa y tubos; carcasa: 15,25 m de diámetro y 21,16 m de longitud; tubos de titanio 65.400, de 16,55 m de longitud y 0,38 m de diámetro

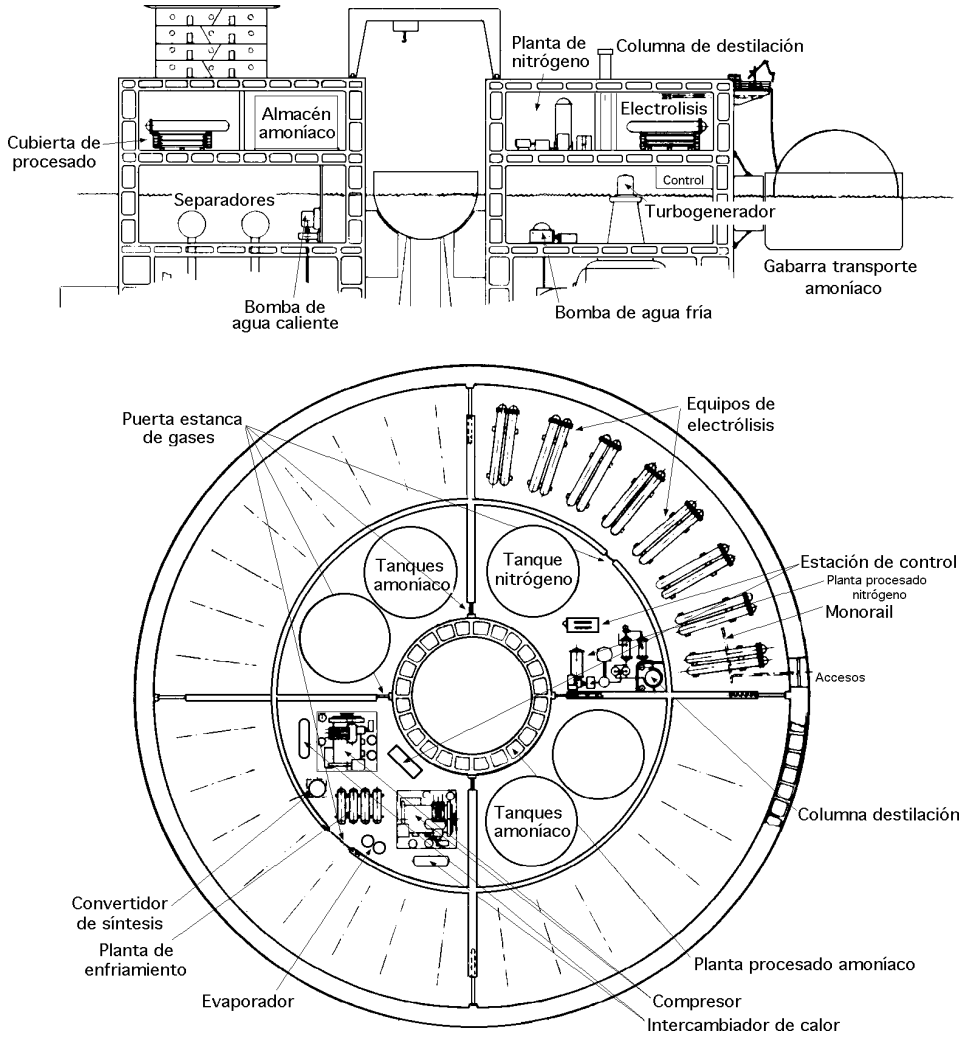

Fig VIII.15.- Vista seccionada de la planta de amoníaco de una central C.E.T.O.

Tabla VIII.3.- Coste estimado en % de una planta de amoníaco de 100 MW, Fig 9

PLANTA DE HIDROGENO Y COMPONENTES VARIOS	*74,00%*
Sistema de purificación del agua de mar	*1,00%*
32 equipos de electrólisis	*45,58%*
Rectificadores de potencia	*6,83%*
Equipamiento auxiliar	*9,20%*
Costes de transporte	*4,56%*
Costes de instalación	*6,83%*
PLANTA DE NITRÓGENO	*7,28%*
Compresores, torres de destilación, cambiadores de calor	*5,18%*
Material de aislamiento	*0,42%*
Costes de transporte	*0,56%*
Costes de instalación	*1,03%*
PLANTA DE AMONIACO	*18,80%*
Compresores, convertidor de síntesis, cambiadores de calor, enfriadores, sistema de reciclado	*15,00%*
Costes de transporte	*1,50%*
Costes de instalación	*2,30%*

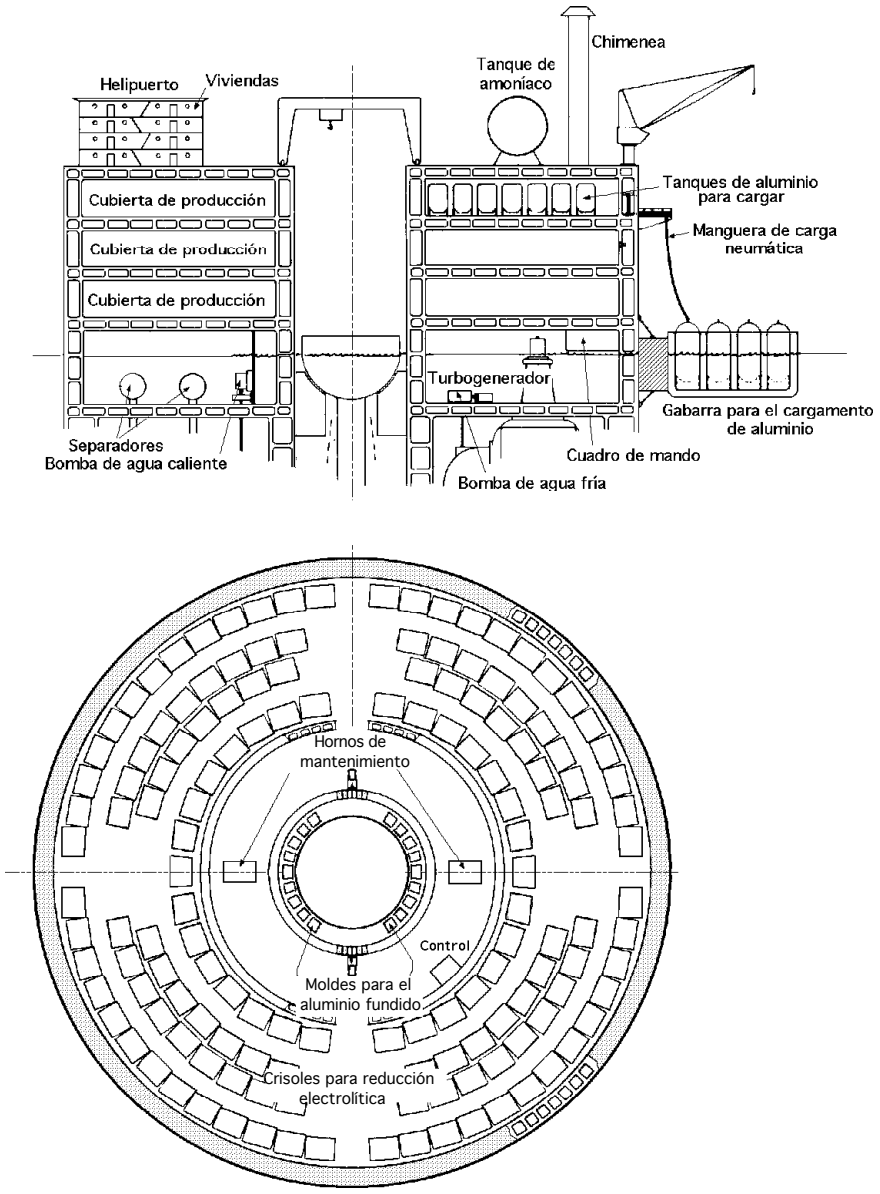

Fig VIII.16.- Planta de una central C.E.T.O. para la producción de aluminio

- Evaporador (4 unidades); igual que el condensador, pero con 75.900 tubos

- Turbina generador (4 unidades); diámetro: 5,77 m; longitud: 14,65 m; eje vertical; difusor montado en el condensador.

- Bombas de agua caliente, (4 unidades); flujo axial con el motor en el tubo de salida del evaporador

- Bombas de agua fría, (4 unidades); flujo axial con el motor en el tubo de admisión del condensador

- Bombas del fluido de trabajo (amoníaco) (4 unidades). Bombas centrífugas, con el motor en el tubo de salida del depósito caliente

Planta de aluminio de 100 MW (Fig VIII.16)

- Capacidad de la planta: 62.700 Tm anuales ó 178,1 Tm día

- Consumo de energía: Electrólisis (280 celdas): 90,9 MW; Energía auxiliar (4 hornos de mantenimiento) más pérdidas: 9,1 MW

- Cada cubierta tiene una superficie de 7.000 m^2 y un volumen de 42.700 m^3

- Número de crisoles electrolíticos: 288 (2 cubiertas)

- Densidad de corriente: (7 a 10 Amp/pulg²); 10.850 a 15.500 Amp/m²

- Características de los crisoles: Dimensiones: 2 m x 3 m x 6 m; Peso: 57 Tm

Energía utilizada en la producción del Al

- Voltaje de las celdas: 5,2 V ; Energía consumida: 14,1 kWh/kg de Al en la electrólisis

a) En operación normal (100%)
- *Cuatro módulos de energía: 9 Amp/pulg²*
- *Electrólisis (280 celdas): 90,9 MW*
- *Elementos auxiliares (4 hornos de mantenimiento): 9,1%*
- *62.700 Tm/año de aluminio*

b) En operación anormal (75%)
- *Un módulo parado y 3 módulos funcionando a 7 Amp/pulg²*
- *Electrólisis (280 celdas): 70,5 MW*
- *Elementos auxiliares (2 hornos de mantenimiento): 4,5%*
- *48.628 Tm/año de aluminio ó 133,2 Tm/día*

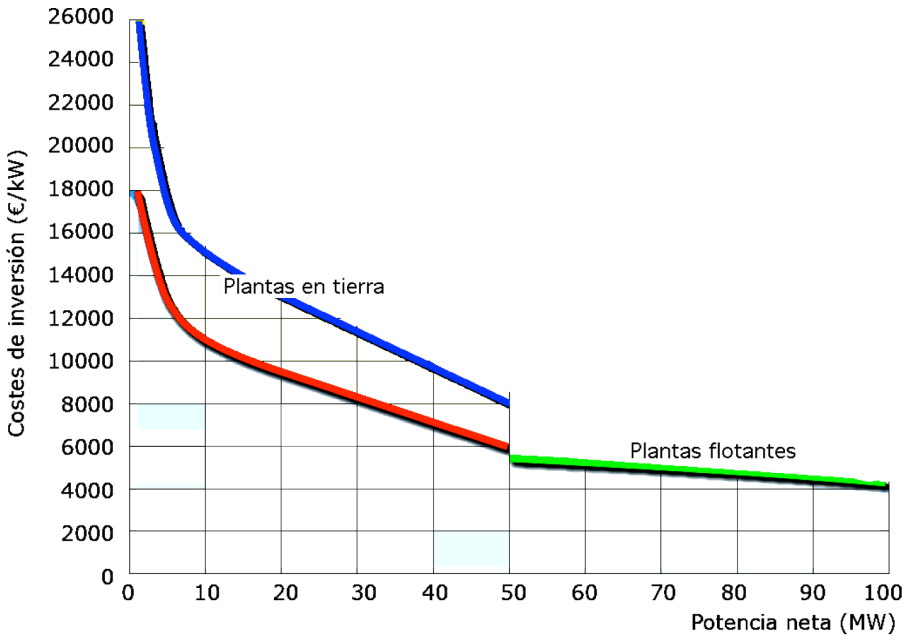

Fig VIII.17.- Costes de inversión estimados de plantas maremotérmicas

VIII.6.- IMPACTO AMBIENTAL

Ventajas:

- Las plantas maremotérmicas usan fuentes naturales de energía, que son abundantes, limpias y renovables. El agua caliente de la superficie del mar y el agua fría de las profundidades reemplazan a los combustibles fósiles para generar electricidad.

- Si están adecuadamente diseñadas producen poco o nada CO_2 u otras sustancias químicas contaminantes que contribuyen a la lluvia ácida o al efecto invernadero

- Pueden producir directamente agua potable y electricidad, lo que es una ventaja significativa en islas donde el agua potable escasea.

- Hay suficiente energía solar almacenada en las capas calientes superficiales del agua de los mares tropicales para cubrir la mayor parte de las actuales necesidades energéticas de la humanidad.

- El agua fría del mar procedente de los procesos maremotérmicos puede tener diversos usos adicionales, como acondicionamiento de aire en edificios, alimentación de peces, crustáceos, algas y otras plantas marinas que encuentran en estas aguas profundas muchos nutrientes (acuicultura)

Inconvenientes:

- Las plantas maremotérmicas producen en la actualidad electricidad a un costo superior al que se obtiene mediante el empleo de combustibles fósiles; estos costos se podrían reducir significativamente si la planta operase sin importantes revisiones en 30 años o más, pero no se dispone de datos al respecto.

- Deben instalarse donde existan diferencias de temperatura a lo largo del año de 20°C, al tiempo que la profundidad del océano esté disponible muy cerca de la costa

- Aunque se han realizado numerosos ensayos de plantas maremotérmicas a pequeña escala, se precisa de la construcción de una planta piloto de demostración, de tamaño comercial, para obtener una mayor información de su viabilidad.

- La construcción de plantas maremotérmicas y la colocación de tuberías en las aguas costeras pueden causar daños en los arrecifes y ecosistemas marinos cercanos.