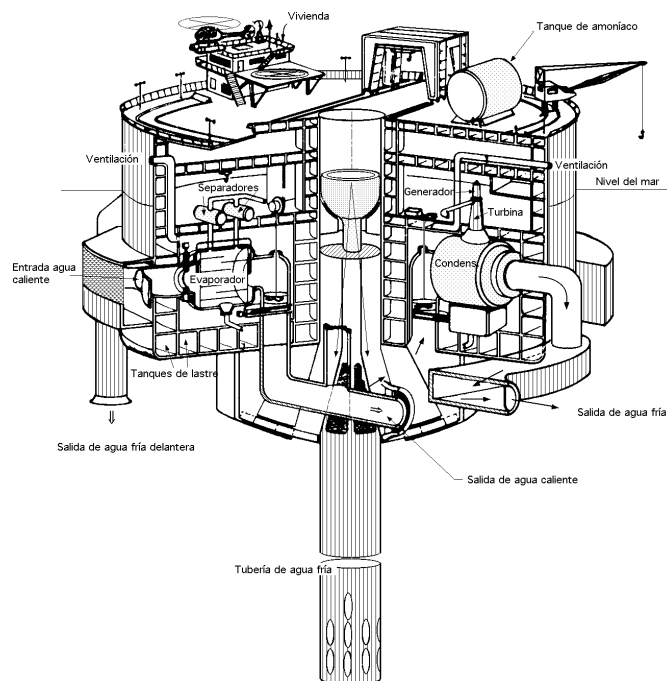


# DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ENERGÉTICA

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA

# ENERGÍA MAREMOTÉRMICA



**Pedro Fernández Díez**

## **V.- ENERGÍA MAREMOTÉRMICA CENTRALES (CETO)**

### **V.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 a 900 metros bajo la superficie del océano, la temperatura es de aproximadamente 5°C. 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 temperatura promedio sea de 25°C a 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:

*a) La superficial, de 100 a 200 metros de espesor, que actúa como colector de calor, con temperaturas entre 25 y 30 grados.*

*b) La intermedia, entre los 200 y 400 metros de profundidad, con una variación rápida de temperatura y que actúa como barrera térmica entre las capas superior y profunda.*

*c) La profunda, en la que la temperatura disminuye suavemente hasta alcanzar 4°C a 1000 metros y 2°C a 5000 metros.*

Por lo tanto, en los mares tropicales existe una diferencia de temperatura, entre la superficie y una profundidad de 1000 metros, del orden de 18 a 20°C que podría aprovecharse 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 metros 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.

## **V.2.- SISTEMA 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 amoníaco 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 a 900 metros.

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 a 1500 metros 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 V.10, o el metanol, o el amoníaco para la industria de fertilizantes Fig V.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 los Estados Unidos y en otras partes del mundo que intentan perfeccionar la conversión de la energía térmica del océano como una tecnología viable antes del final del siglo XX.

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,  $T_1 = 30^\circ\text{C}$  y  $T_2 = 4^\circ\text{C}$  tendría un rendimiento máximo:

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

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

### V.3.- CARACTERISTICAS 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, como hemos visto, es muy bajo, 0,073 si el agua caliente está a  $28^\circ\text{C}$  y la fría a  $6^\circ\text{C}$ ; 0,086 para el agua caliente a  $30^\circ\text{C}$  y la fría a  $4^\circ\text{C}$ . 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 esto se ha propuesto emplear un fluido auxiliar, como el amoníaco, cuya tensión de vapor varía con la tem-

peratura 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 producir grandes cantidades de agua dulce del orden de las 300 Ton/hora en una central de 3,5 MW; por otro lado, el agua profunda utilizada para refrigerar el condensador, saldría de la instalación a la temperatura de unos 16°C (18.000 Termias/hora en el caso citado) y sería por tanto utilizable como agua de refrigeración en determinadas industrias.

### V.3.- ANTECEDENTES HISTÓRICOS

**Realizaciones y proyectos.-** En 1881 Arséne Arsonval presenta por primera vez la idea de una central maremotérmica. 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 un estanque cerrado en el que se había practicado un vacío suficiente para llevar el agua a la ebullición; el vapor producido 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 movía una turbina conectada a un generador, produciendo así energía eléctrica, Fig V.1.

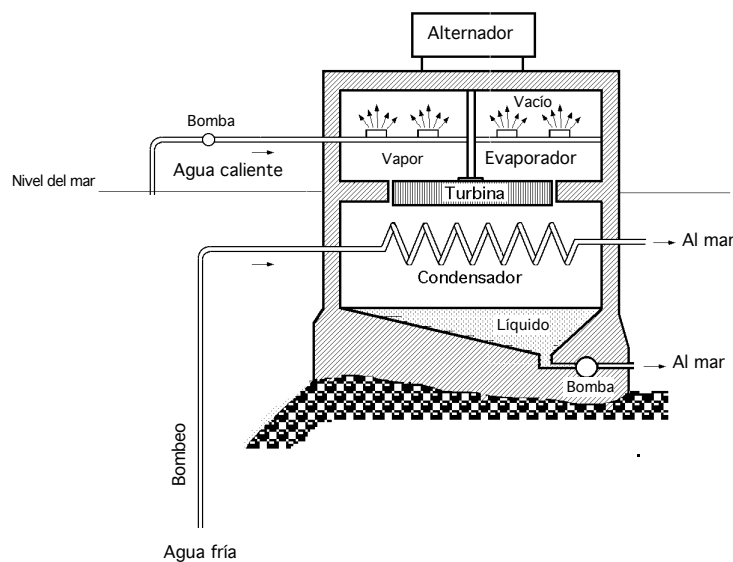


Fig V.1.- Máquina de Claude

Un experimento con aparatos de dimensiones reales, pero todavía en condiciones imaginarias, 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 de agua fría del fondo de 1,6 metros de diámetro y 2 Km de longitud, que funcionó 11 días hasta que fue destruida por una tempestad, y luego en aguas de Río de Janeiro (1934-35), 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 financia el estudio de la instalación de una central para la producción de energía eléctrica alimentada por la energía térmica de los océanos, con 2 módulos de 5 MW netos cada uno; 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 V.2.

A finales de los 60 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).

A raíz de estos trabajos se empezaron a construir las siguientes plantas experimentales: La Mini-C.E.T.O. en Hawaii, de 50 KW, y la C.E.T.O.1 en el Caribe, de 1 MW.

En la actualidad está en proyecto la construcción de una central de 40 MW, para luego construir una de 100 MW. Los japoneses han construido una central de 1 MW en la isla de Nauru y proyectan otra de 100 MW. Varios países europeos (Francia, Italia, Alemania) también están realizando investigaciones sobre este tipo de centrales.

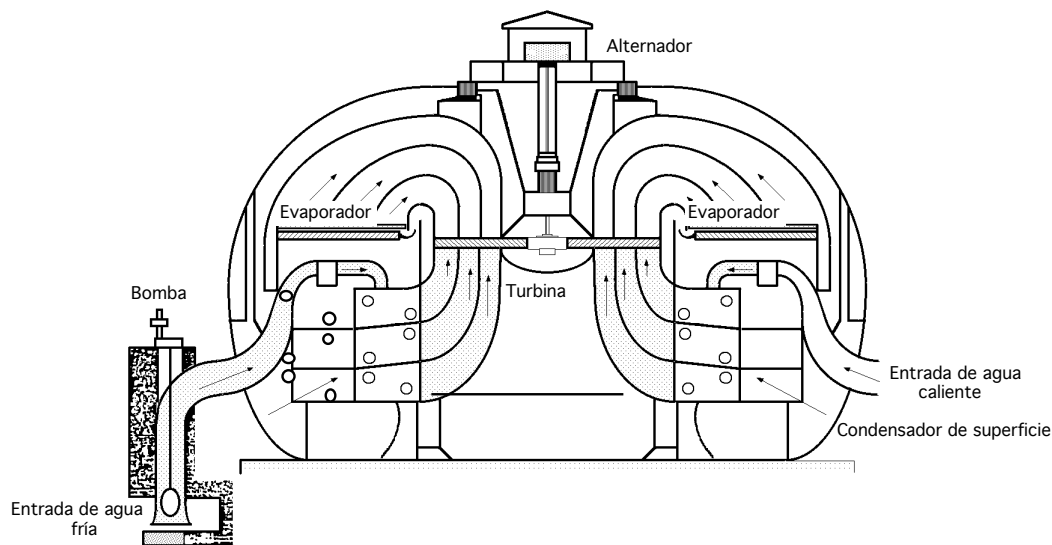


Fig V.2.- Proyecto de la central maremotérmica de Abidján

#### V.4.- FUNDAMENTOS DEL APROVECHAMIENTO DE LA 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 que conforma un gran estanque 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. 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 lleve únicamente vapor saturado seco.

El condensador puede ser de contacto (mezcla), Fig V.3, o de superficie (intercambiador de calor), Fig V.4, 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.

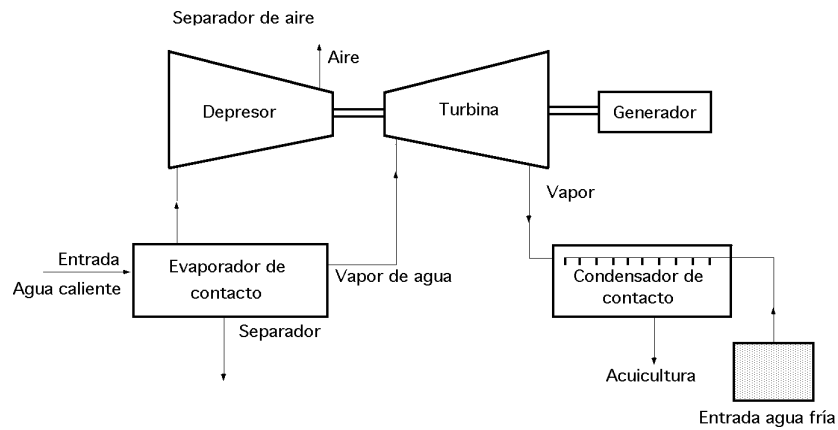


Fig V.3 .- Central maremotriz C.E.T.O. para producción de energía y acuicultura

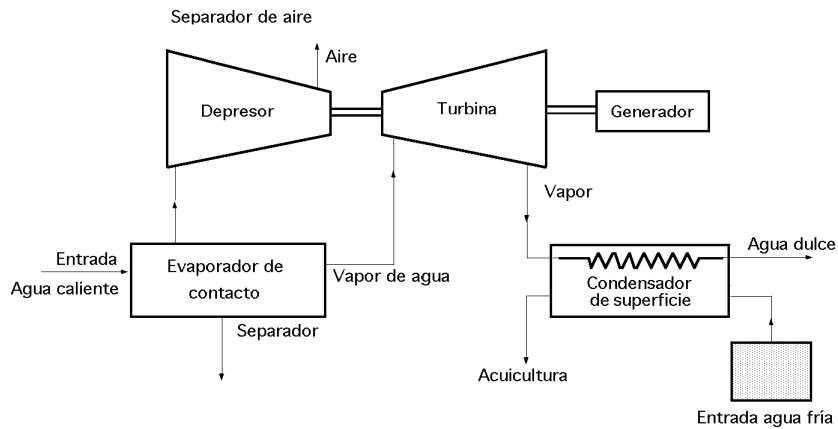


Fig V.4 .- Central maremotriz C.E.T.O. para producción de energía y agua dulce

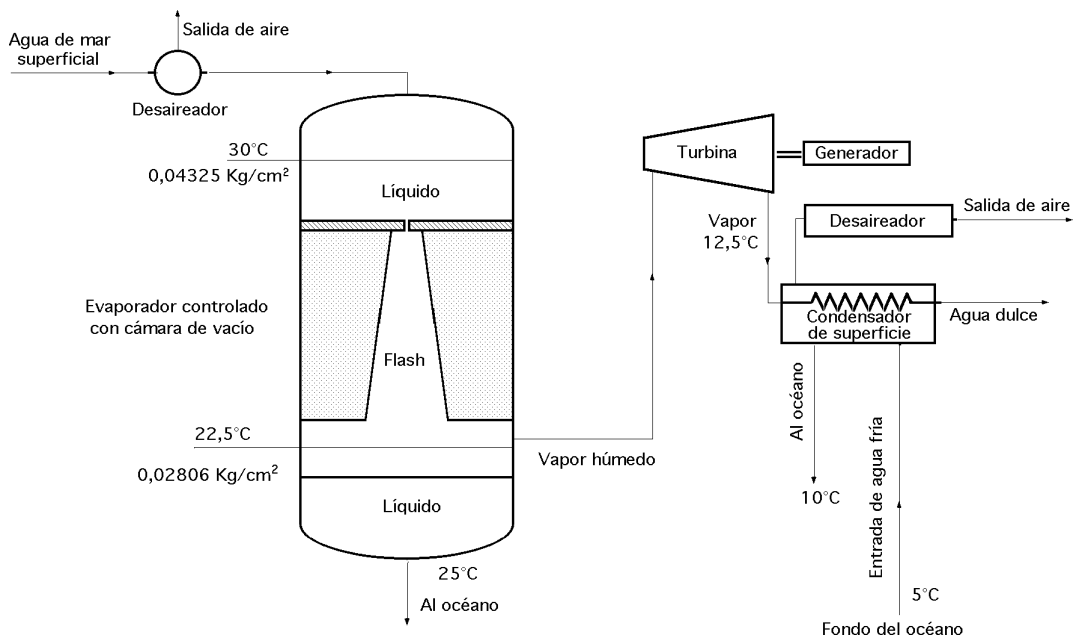


Fig V.5.- Ciclo abierto con evaporación controlada por contacto en cámara de vacío (evaporación "flash")

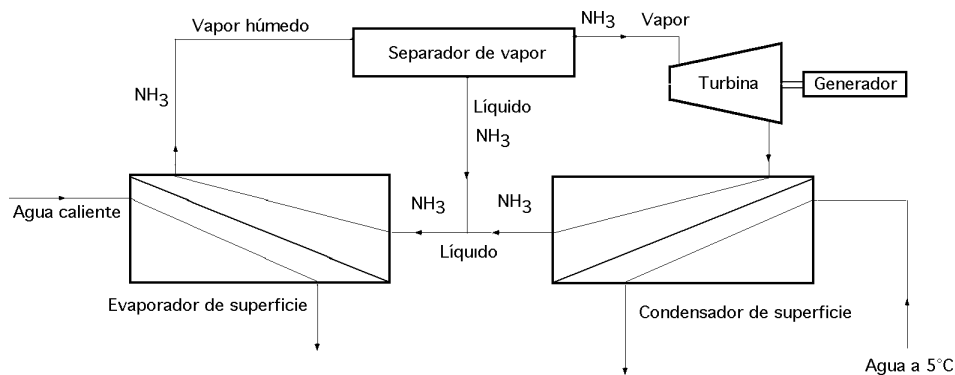


Fig V.6 .- Central maremotérmica de ciclo cerrado

**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 V.6.

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 al amoníaco en los ciclos cerrados es muy grande, ya que debe de circular mucha agua, y ésto encarece el sistema.*

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

a) *Los efectos corrosivos del agua de mar y la necesidad de tratarla y desgasificarla para poder introducirla en la turbina.*

b) *Utilizan una turbina mucho más grande que en el ciclo cerrado, ya que en este último se usa un vapor a más presión que en el primero.*

**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 pueden instalarse en 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.

Estos sistemas pueden aprovecharse, tanto para producción de energía, como para estas otras utilidades:

a) *Producción de agua potable*

b) *Generación de hidrógeno por electrólisis, el cual se utilizará como vector de la energía.*

c) *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.*



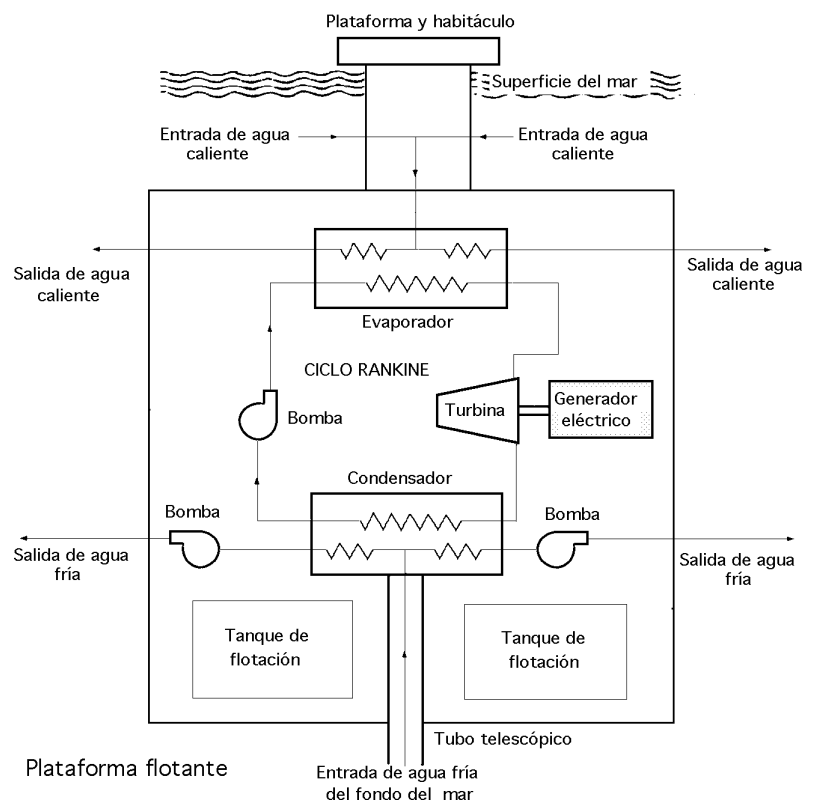
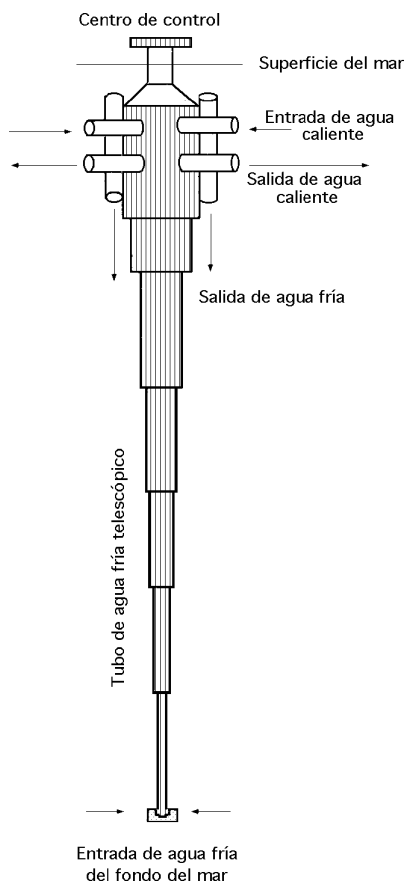
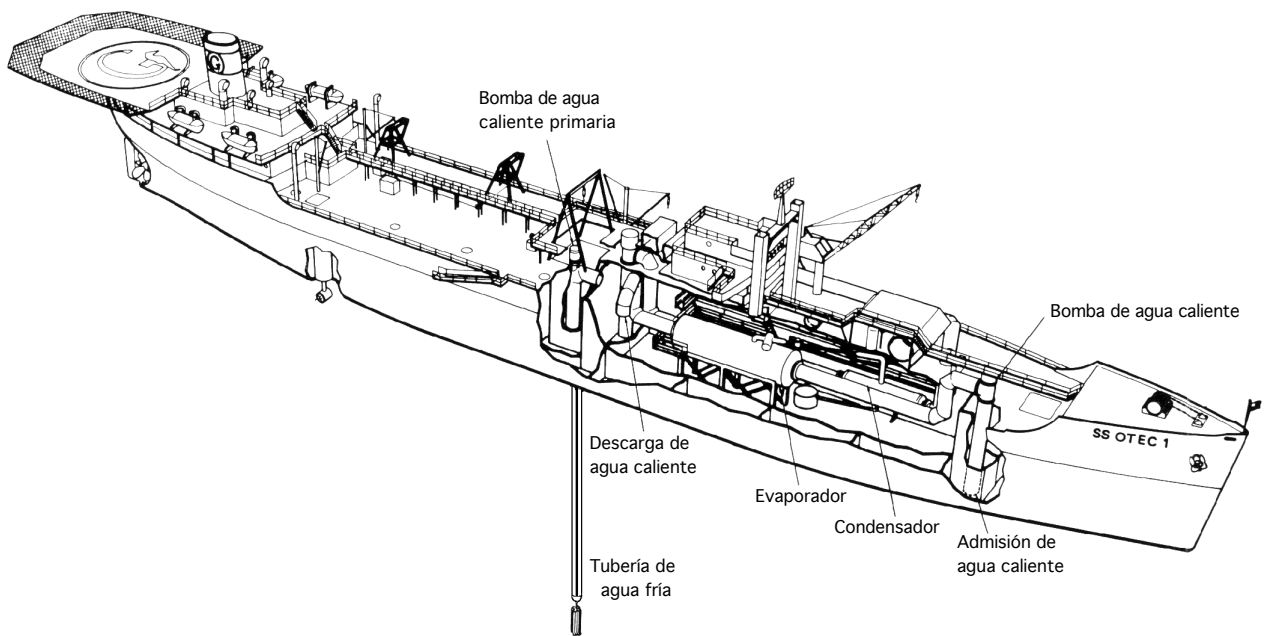


Fig V.7 .- Disposición esquemática de una central C.E.T.O. de 100 MW

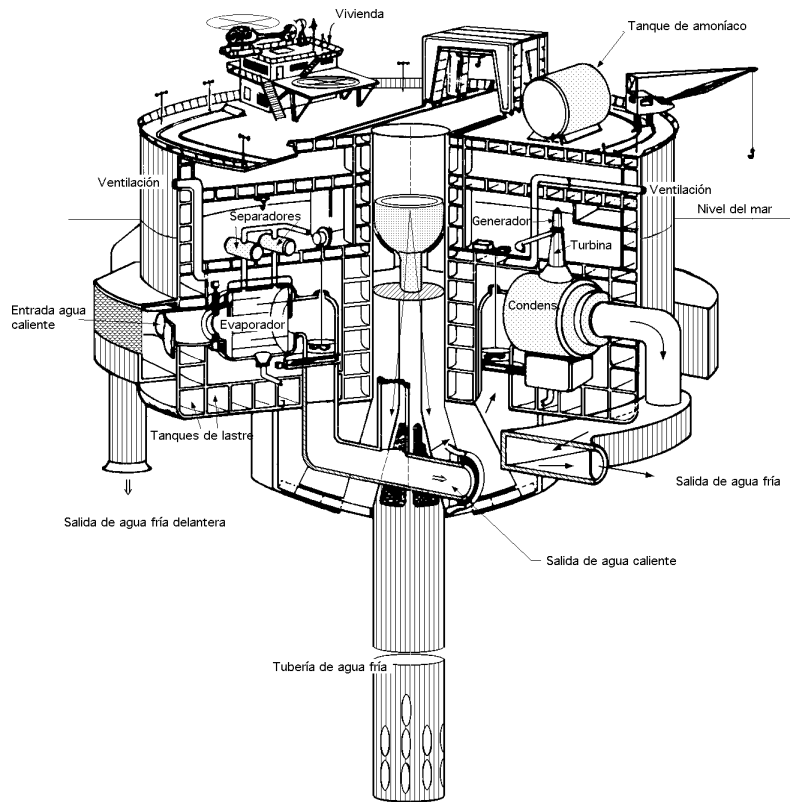


Fig V.8.- Vista seccionada de la central C.E.T.O. de 100 MW

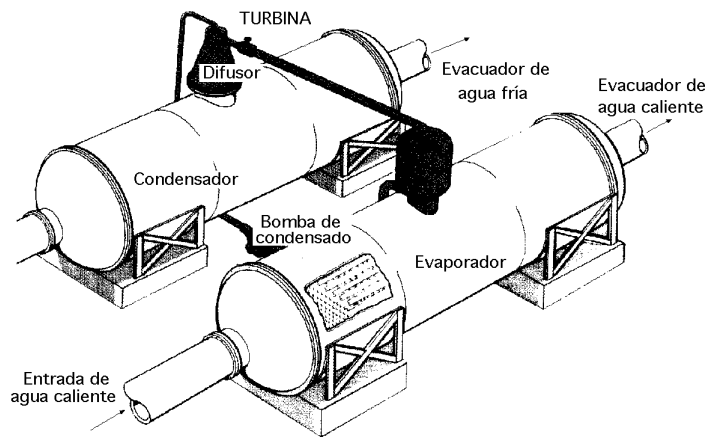


Fig V.8a.- Vista de un condensador y un vaporizador de la central C.E.T.O. de 100 MW

### ***Características técnicas del sistema C.E.T.O. de 100 MW***

- 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; Longitud: 1225 m
- Fluido de trabajo.  $2,65 \times 10^6$  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

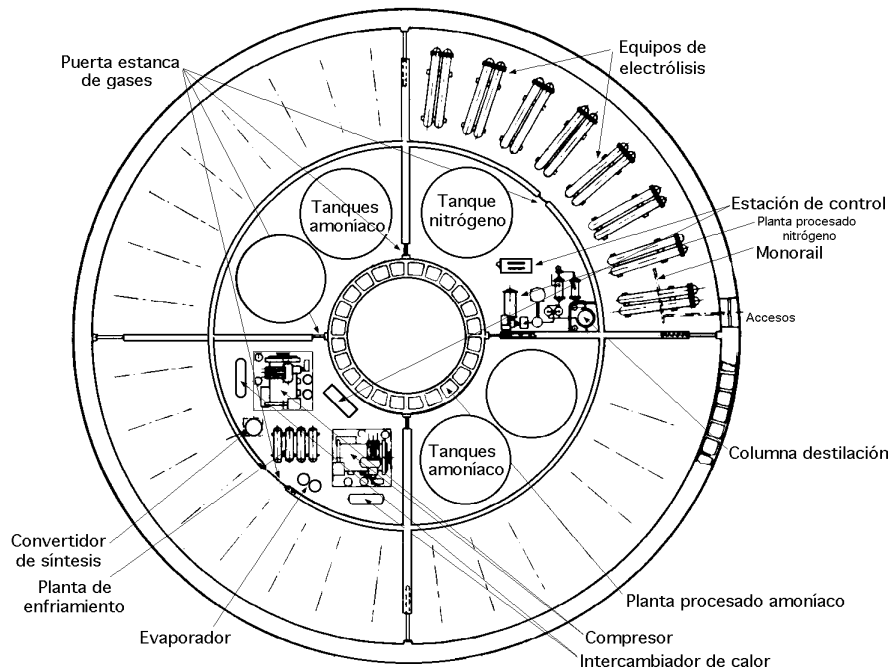
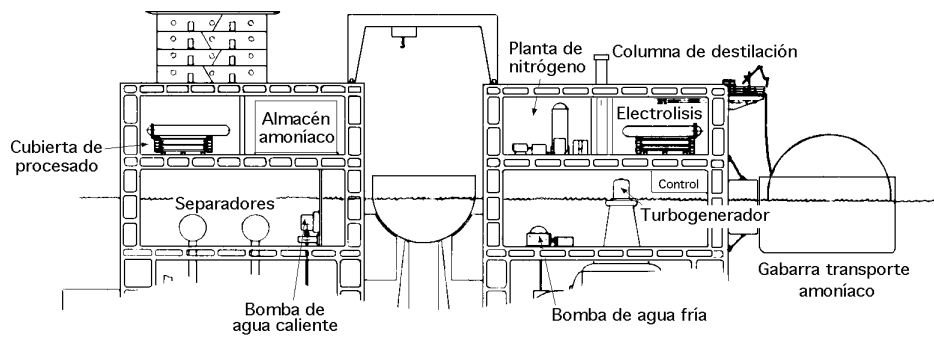


Fig V.9 .- Vista seccionada de la planta de amoníaco de una central C.E.T.O.

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

<b>PLATAFORMA</b>	27,87%
Casco (Plataforma flotante)	24,34%
Equipamiento	2,70%
Sistemas auxiliares	0,83%
<b>PLANTA DE ENERGÍA</b>	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%
<b>DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA</b>	2,21%
Transformadores	0,95%
Planta eléctrica.	1,26%
<b>AGUA DE ALIMENTACIÓN Y DISTRIBUCIÓN</b>	11,32%
Tubería telescópica	10,92%
Bombas y sistema de propulsión	3,62%
Tuberías y otros	2,72%

Coste estimado en % de una planta de amoníaco de 100 MW, Fig V.9

<b>PLANTA DE HIDROGENO Y COMPONENTES VARIOS</b>	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%
<b>PLANTA DE NITRÓGENO</b>	7,28%
Compresores, torres de destilación, cambiadores de calor.....	5,18%
Material de aislamiento.....	0,41%
Costes de transporte.....	0,56%
Costes de instalación.....	1,03%
<b>PLANTA DE AMONIACO</b>	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%

- 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 localizado en el tubo de salida del evaporador.
- Bombas de agua fría, (4 unidades); flujo axial con el motor localizado en el tubo de admisión del condensador
- Bombas del fluido de trabajo (amoníaco) (4 unidades). Bombas centrífugas, con el motor localizado en el tubo de salida del depósito caliente.

#### **PLANTA DE ALUMINIO DE 100 MW (Fig V.10)**

- 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<sup>2</sup> y un volumen de 42.700 m<sup>3</sup>.
- Número de crisoles electrolíticos: 288 (2 cubiertas)
- Densidad de corriente: (7 a 10 Amp/pulg<sup>2</sup>); 10.850 a 15.500 Amp/m<sup>2</sup>
- 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/pulg<sup>2</sup>)
- 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 inoperante. Tres módulos de energía funcionando con (7 Amp/pulg<sup>2</sup>)

- *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*

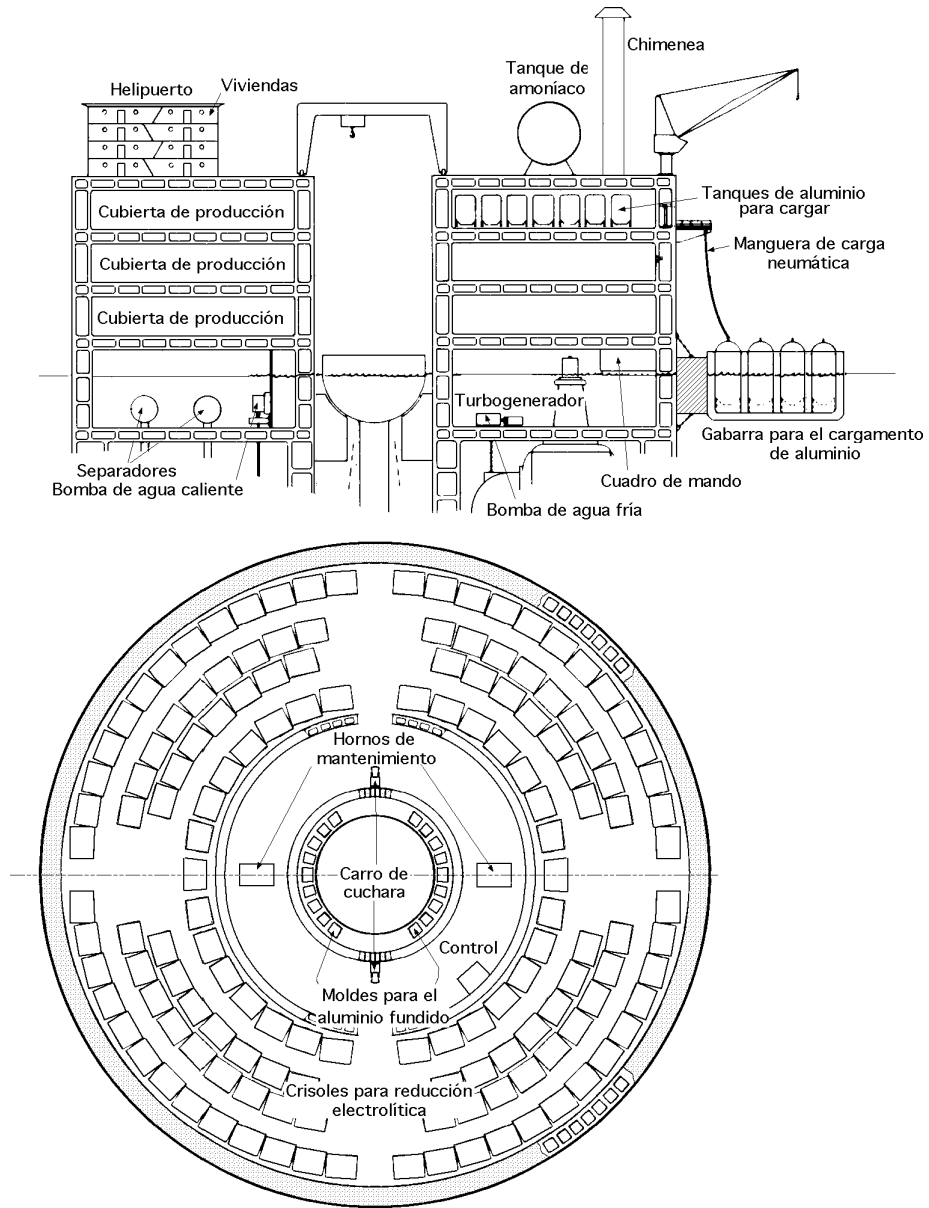


Fig V.10.- Planta de una central C.E.T.O. para la producción de aluminio