

de los siete sistemas de transporte de líneas base de la UMTA; editó el reporte de la General Electric; participó en el diseño, evaluación, aceptación y prueba de funcionamiento de los cuatro sistemas de transporte TRANSPO 172; fué responsable de la seguridad mecánica y estructural de los sistemas; co-autor de APLLYN, una simulación dinámica general en computadora adecuada para el estudio del transporte y otros problemas dinámicos.

Profesionalmente, participó en el diseño de Misiles Dirigidas y Barcos para Efectos Superficiales para la Marina de los Estados Unidos, en el diseño de Sistemas de Transporte Automático para el Departamento de Transporte y Sistemas de Conversión de Energía Termal del océano (OTEC) para el Departamento de Energía.

Pertence al Tau Beta Pi, Pi Tau Sigma. AIAA.

## ENSAJE DE UN MODELO A ESCALA ESTRUCTURAL DE UN TUBO DE AGUA FRIA DE CONCRETO ALIGERADO PARA - SISTEMAS DE CONVERSION DE ENERGIA TERMICA DEL OCEANO.

J. S. O'Connor\* y W. J. Cichanski\*\*

### RESUMEN

El Barco Planta de conversión de energía térmica del océano (OTEC) está diseñado para generar electricidad con el uso de las variaciones de temperatura natural de un océano tropical. Grandes cantidades de agua, pasados por un tubo a la superficie de profundidades de un kilómetro son requeridas para condensar el fluido que hace funcionar la planta. Un modelo a una escala de 1/3 de un tubo gufa de agua fría (CWP) de 40 Mw<sub>e</sub> (nominal) del barco-planta fue fabricado, instrumentado y ensayado hasta destruirlo. El modelo tenía 3.2 m en diámetro y 5.3 m de altura incluyendo una región de giro a escala en el centro, los muros fueron de 5 cm de espesor con 7.5 cm de canales para el post-tensado.

La operación de la junta de pivote fue verificada y el endurecimiento de la junta fue determinada experimentalmente. El modelo fue cargado en incrementos hasta su falla. La falla última ocurrió para una carga aproximadamente el 40% más grande que la carga de diseño.

\* Applied Physics Laboratory, Johns Hopkins University, Laurel, Maryland, USA

\*\* ABAM Engineers, Inc., Tacoma, Washington, USA

## INTRODUCCION

En una planta de ciclo cerrado de conversión de energía térmica del océano (OTEC), el agua caliente de la superficie del océano ( $24^{\circ}$ - $28^{\circ}\text{C}$ ) es usado para vaporizar un fluido de trabajo como amonio, el cual hace funcionar una turbina/generador que produce electricidad. Después agua fría a ( $4^{\circ}$ - $7^{\circ}\text{C}$ ) a 700 - 1200 m de profundidad es usado para condensar el fluido de trabajo, el cual es bombeado de regreso al evaporador para empezar el ciclo de nuevo. La energía producida puede ser enviada a tierra por medio de cables, si la planta se localiza cerca de tierra; o usada para la manufactura de productos de energía intensiva como amonio o aluminio, si no se encuentra cerca de tierra.

El concepto de ciclo cerrado (OTEC) fue postulado por primera vez por D'Arsonval aproximadamente hace 100 años. La primera demostración de una alternativa, del concepto ciclo-cerrado fue una planta en tierra construido por Claude en 1930 en la isla de Cuba. La planta de Claude utilizó vapor de baja presión producido por el agua caliente del mar en un vacío y produjo 22 kw de un  $\Delta T$  de océano de  $14^{\circ}\text{C}$ . Esto fue menos de lo necesitado para operar su propia bomba, pero el concepto fue comprobado. En agosto de 1979, la miniplanta OTEC de ciclo cerrado, construido por Lockheed Corp., Dillingham Corp. y el Estado de Hawaii, produjo cerca de 50 kw (0-15 kw net) de fuerza fuera de la costa de Kona de Hawaii. Esta fue la primera demostración de un sistema OTEC que produjo fuerza disponible.

La planta OTEC de Claude utilizó una tubería de acero corrugado para agua fría (CWP) de 1.7 m de diámetro y 2 km de largo, un acontecimiento de ingeniería para el año 1930. El Mini-OTEC refleja 50 años de avances en materiales sintéticos utilizó un tubo de polietileno de 0.6 m de  $\phi$  y 700 m de long.

El Laboratorio de Física (APL) de la Universidad de Johns Hopking y los ingenieros de la Compañía ABAM (APL) Han diseñado un Barco Planta OTEC prototipo (Fig. 1) que tiene una capacidad de 40 MW<sub>e</sub> (netas), la cual utiliza una tubería de agua fría (CWP) de 9 m de  $\phi$  y 925 m de long. (Ref. 1).

Para una planta comercial OTEC de 240-MWe serán necesitados tubos CWP de 12-15 m de diámetro. El desarrollo de tales CWP's es uno de los mayores problemas de ingeniería que deben ser resueltos antes de que un sistema comercial OTEC pueda ser una realidad. Acero, aluminio, plástico reforzado con fibra de vidrio (FRP) y concreto fueron considerados como materiales posibles para la construcción de CWP. De estos materiales, la APL y ABAM juzgaron que el concreto reforzado sería el más atractivo<sup>1</sup>. Concreto reforzado y postensado fueron los más baratos materiales propuestos, y la resistencia de la estructura puede ser cambiada variando la cantidad de acero de refuerzo; el concreto de peso nor-

<sup>1</sup> Otros han investigado otros materiales de CWP particularmente, plástico reforzado de fibra de vidrio (FRP).

mal ( $2300 \text{ kg/m}^3$ ) tiene una larga historia en usos marítimos y ha probado ser un material durable con una habilidad demostrada, de proteger el acero de refuerzo de la corrosión marítima. El concreto también aparta el acero de refuerzo de metales no similares Cp.e. los intercambios de calor del aluminio en la planta OTEC) y reduce la posibilidad de corrosión electrolítica.

Análisis dinámico de plataformas flotantes OTEC con CWP han mostrado que el CWP rígido requeriría paredes muy gruesas y pesadas. El uso de una estructura estándar de concreto aligerado de ( $1750 \text{ kg/m}^3$ ) resultaría como cargas dinámicas grandes en el tubo y un costo muy grande debido al costo del equipo requerido para desarrollar secciones grandes y pesadas y un tiempo adicional necesitado para producir secciones más pequeñas.

Para aliviar estos problemas, fue comenzado un programa para diseñar y ensayar una estructura de concreto que sería casi neutralmente boyante, cuando sumergido en agua del mar (teniendo una densidad de casi  $1125 \text{ kg/m}^3$  compensada con densidad de agua de mar de  $1025 \text{ kg/m}^3$ ) tendría una resistencia a la compresión de diseño de  $f'$  por lo menos 24 MPa, y tener la durabilidad y resistencia a la corrosión de concretos más pesados. El uso de partes o juntas flexibles en el CWP reduciría el esfuerzo máximo y permitiría la reducción del espesor de las paredes de 10 a 20 cm. El diseño de tal CWP fue desarrollado conjuntamente por ABAM como una parte del diseño de la planta piloto.

El concreto ligero escogido fue desarrollado por los Laboratorios de Tecnología de Construcción de la Asociación de Cemento Portland en Skokie, Ill. bajo contratos separados (Ref. 2). Su composición y propiedades son presentados en la Tabla 1. Aunque el concreto es más pesado que lo especificado inicialmente, también es más fuerte y satisface los requerimientos de diseño.

El diseño del CWP principal de 40 MWe para el barco planta consiste de segmentos 9.4 m de diámetro y 15.6 m de largo, los cuales son unidos en el mar para producir 925 m de tubería. Un segmento típico de tubería es mostrado en la Figura 2. Un segmento es unido a otro por medio de resbalar la parte ensanchada (la campana) de uno sobre la parte angosta del otro girando  $15^{\circ}$  atorando el segmento en posición. Empaques de neopreno entre las dos partes de las superficies permiten la flexión relativa de los dos segmentos (Fig. 3).

Este trabajo habla sobre el diseño, construcción y ensayos de un modelo a una escala 1/3 lineal de un segmento CWP. El modelo tenía un diámetro interior de 3.2 m, 5.3 m de altura y pesaba 7500 kg. Contenía  $5 \text{ m}^3$  de concreto ligero y 900 kg de acero. La referencia 4 es el reporte detallado de este proyecto.

## 2.- CARGAS DE DISEÑO

Las cargas en un CWP en el paso marino resulta de la combinación de efectos de:

- El peso sumergido del tubo.

- b).- Movimientos del barco.  
 c).- Olas y corrientes actuando directamente sobre CWP.  
 d).- Fuerza inducida del vórtice.

Cargas inducidas sobre el CWP debido a movimientos de la plataforma, - efectos de las olas y fuerzas inducidas del vórtice fueron computados utilizando una computadora SEGPIP de dominio con frecuencia simulada (Ref. 5). La respuesta de este sistema a una serie de ondas regulares de frecuencias variables y amplitud son superimpuestas linealmente para simular la respuesta predicha al azar. El espectro de la onda al azar  $S_w(f)$  es definido por una distribución Bretschneider:

$$S_w(f) = 5 \left( \frac{H_s}{4} \right)^2 \frac{1}{f_0} \left( \frac{f_0}{f} \right)^5 \exp \left[ -5/4 \left( \frac{f_0}{f} \right)^4 \right] \quad (1)$$

donde  $H_s$  es la altura significativa de la onda y  $f_0$  es la frecuencia del punto - más alto de energía. Las cargas debidas a los efectos de las corrientes fueron calculadas a mano usando y asumiendo un perfil de corrientes y formando un análisis de compatibilidad utilizando las propiedades de rigidez, articulación de la CWP, fueron analizadas utilizando el perfil de corrientes y características de la tubería de arrastre, cargas resultantes y momentos utilizando la matriz de rigidez-articulación.

Durante el diseño preliminar de la planta prototipo 40 MWe, muchos estados del mar fueron analizados. Las dos condiciones de cargas más significantes fueron 1)  $H_s = 18$  ft (5.15 m),  $T_0 = 9.75$  seg. El estado más severo del mar al - cual el barco planta OTEC operará y 2) el "100 yr storm" estado del mar. Para - un sitio potencial de 500 a 1000 km al este de Recife en Brasil designado como - Atlantic-1 (ATL-1) y 100 yr. condiciones de tormenta fueron  $H_s = 29$  ft (8.8 m) :  $T_0 = 18$  seg. El Departamento de Energía publica una descripción del medio am- - biente de varios sitios potenciales de OTEC (Ref 6) y renueva los datos semi- - - - - anualmente.

Para la condición (1), el barco planta está en operaciones normales; - preparado para condición (2), de mantenimiento y existencia controlada.

La computadora SEGPIP analiza los valores medios de las raíces cuadra- - das (MRC) de los movimientos de la plataforma y coordenadas globales del CWP. - Los valores MRC aumentan las fuerzas que influyen en cada junta, entonces MRC se disparan y cambian las rotaciones y los momentos de giro en cada junta. Estos - resultados son observados para ensamblar un conjunto de curvas de diseño estruc- - tural y localizaciones. Los picos o cargas máximas de diseño se calculan por - conteo con la CWP a peso sumergido, usando un factor de carga de 3.7 aplicado a cargas de los MRC.

El factor 3.7 fue seleccionado para dar una carga que tiene una proba- - bilidad 1 en 1000 de ser excedido. El diseño del prototipo de carga axial, cor- - tante, momentos y rotación son discutidos después y presentados en la Tabla 2.

El prototipo CWP tiene juntas e intervalos regulares para reducir los esfuerzos de flexión. Las piezas de neopreno en cada junta permiten una flexión angular hasta  $1^\circ$  entre segmentos, como CWP responde al estado de movimiento inducido por el mar. Este concepto multi-junta produce una estructura dinámica muy completa, simplifica el proceso de desarrollo y logra un costo efectivo, la producción está orientada al proceso de fabricación. Los segmentos pre-esforzados pueden ser precolados en tierra y transportados a la plataforma OTEC para su colocación.

Un segmento típico de CWP es un elemento de concreto prefabricado de - concreto pre-esforzado con 9.2 m de diámetro interior y longitud entre articula- - ciones de 15.6 m.

Un segmento típico de CWP tiene un límite de rotación angular de  $1^\circ$ . - Varios segmentos de CWP de 12.5 m entre articulaciones son usadas en la parte - - más baja del cordón CWP, en respuesta a resultados de análisis hidrodinámicos - - que indican ángulos de rotación de juntas que ligeramente exceden de  $1^\circ$  para un segmento CWP de 15.6 m. Un segmento típico tiene 12 proyecciones en cada extre- - mo y 12 cojines de balines ensamblados. El CWP es unido al casco del barco por una bola modificada que encaja en una esfera o unión mostrada en la Fig. 4. Esta junta, bola y encaje tiene  $18^\circ$  de capacidad de rotación. Es localizado apro- - ximadamente en medio del barco, por eso su centro de rotación está muy cerca del centro de gravedad del barco planta. Esta localización CWP produce maneja- - bilitad adecuada de agua fría a bordo del barco y elimina considerablemente la rota- - ción de cuerpos rígidos entre el CWP y el barco planta. El CWP se compone de 61 segmentos típicos y dos segmentos especiales en las juntas superiores.

El segmento especial más arriba descansa sobre un anillo de soporte de - acero que a su vez descansa sobre una unión esférica de acero, el cual es perma- - nentemente unido al casco de concreto del barco. El segundo segmento especial - - sirve de transición geométrica a los restantes segmentos típicos del cordón de - tubería suspendida.

El segmento especial más arriba es instalado en un anillo de soporte - - de acero mientras que el barco OTEC está en el muelle. Todos los demás segmen- - tos son puestos en el mar utilizando grúas especiales que bajan cada segmento a través del pozo en el barco planta. El anillo de soporte de acero endurecido de la junta superior es una estructura soldada y endurecida, y es colocado con una serie de segmentos cubiertos con capas de nylon elastómero para formar un anillo de interfase circunferencial entre el anillo de soporte de acero y la unión de acero. Cada segmento de estos anillos elastómeros son removidos para inspección, reparación o sustitución.

El bajo coeficiente de fricción entre el nylon y el acero de interfase permite libertad de movimiento entre el anillo de soporte de acero y la platafor- - ma.

Cada segmento contiene ambos aceros, el acero de refuerzo y tendones - - pre-esforzados de alta resistencia. Cada segmento es pre-esforzado longitudinal