



Instituto Panamericano de Ingeniería Naval

Instituto Pan-americano de Engenharia Naval

Pan-american Institute of Naval Engineering

XI CONGRESO PANAMERICANO DE INGENIERIA NAVAL,
TRANSPORTE MARITIMO E INGENIERIA PORTUARIA.

RECUPERACION DE URANIO DEL MAR

PAPER N° 2

CHRISTIAN SCHMIDT MONTES
Director de Investigación y Desarrollo
Armada de Chile.

42

RECUPERACION DE URANIO DEL MAR

SCHMIDT MONTES C.

Christian SCHMIDT Montes (Ph.D.)
Director de Investigación y Desarrollo
Armada de Chile

TABLA DE CONTENIDO

<u>ITEM</u>	<u>Página</u>
1.- INTRODUCCION.....	2
2.- FUNDAMENTOS.....	3
3.- DISEÑO CONCEPTUAL DEL SORBENTE.....	4
4.- PROCESO DE ELUCION.....	10
5.- DESCRIPCION CONCEPTUAL DE LA PLANTA RECUPERADORA DE URANIO DEL AGUA DE MAR.....	12
5.1 Formulación Teórica	13
5.2 Datos de Entrada	14
5.3 Esquema conceptual de Planta	16
6.- CONSIDERACIONES ECONOMICAS	20
7.- CONCLUSIONES.....	21
8.- REFERENCIAS.....	23

1.- INTRODUCCION

En países con limitada cantidad de recursos energéticos y sin reservas de petróleo y gas natural, el uso de la energía nuclear puede jugar un papel fundamental como fuente de energía.

En muchos países desarrollados, por ejemplo Japón, como también en muchos países sub desarrollados, los depósitos de Uranio son muy reducidos y con leyes muy bajas, por lo tanto económicamente no atractivos. Esto ha provocado que países interesados en el futuro uso de la energía nuclear, hayan iniciado hacen ya varios años, investigaciones y programas para extraer Uranio de fuentes no tradicionales.

Países con buen acceso al mar tienen la posibilidad de extraer uranio del agua del mar en caso quieran asegurar una parte importante de su independencia energética.

Los océanos contienen alrededor de cuatro mil quinientos millones de toneladas de uranio; sin embargo la concentración en que se encuentra es muy diluida, promediando .0033 partes por millón (3.34 microgramos por litro), y por lo tanto su concentración requiere un trabajo de concentración inusualmente alto. Este trabajo prodría conseguirse a través de métodos tales como: intercambio iónico, extracción por solvente, coprecipitación, absorción y métodos biológicos. Muchos de estos métodos están actualmente en etapa de investigación en Japón, Suecia, Inglaterra y los Estados Unidos de Norte-América.

El presente trabajo revisa en forma muy abreviada los principales problemas asociados a la recuperación de uranio del agua del mar, y los procesos de absorción mas adecuados para este propósito, muchos de los cuales están estudiándose activamente con el fin de adaptarlos a la recuperación de uranio. Este trabajo concluye con el desarrollo de los parámetros de diseño de una planta naval para recuperar uranio del mar, de una capacidad de 150 toneladas métrica por año, cantidad adecuada para satisfacer los requerimientos anuales de combustible de una planta nuclear tipo PWR de 1000 Mwe. de potencia.

2.- FUNDAMENTOS

Una planta nuclear del tipo de agua a presión (PWR) de 1000 Mwe. necesita en promedio 150 toneladas métricas de U_3O_8 por año. Esta cantidad es equivalente a 3.08×10^5 libras de uranio por año. Con el fin de apreciar los problemas asociados con la recuperación de esta cantidad de uranio del agua de mar usando una planta de extracción, a continuación se muestran las especificaciones de una planta de referencia (1):

1. Concentración: 3.34 micro gramos de U por litro de agua de mar.
2. Cama de absorción con partículas esféricas de 1 mm. de diámetro recubiertas de titanio.:
 - 240 mgr. U/Kg. Ti. es absorbido al término de un ciclo de absorción de cuatro días.
 - 2.1 Kg. Ti./pies² de superficie exterior de la cama de absorción.
 - 80% del contenido de Uranio en el agua es absorbido durante cada ciclo de carga.
3. Tiempo de operación de la Planta: 310 días/año.
4. Ciclo de un día de regeneración (elución) y recuperación del solvente:
 - 3 veces volumen de la cama de absorción (V.A.) de agua de mar para lavado de desplazamiento.
 - Todo el Uranio es extraído por 4 V.A. de solvente al 1 molar de carbonato de amonio (NH_3CO_2) en contra flujo.
 - 4 V.A. para lavado final en contra flujo.
 - Extracción por vapor del carbonato de amonio del solvente.

5. Concentración del Uranio por intercambio iónico.

Figura No. 1 muestra los flujos de esta planta.

Basándose en un ciclo de carga de 248 días, una de estas plantas extractora de U del agua de mar, debería producir U_3O_8 a razón de 1241.8 Libras/día (0.862 Libras/min.) para alimentar un reactor nuclear de 1100 Mwe.

Siendo la concentración del uranio en el agua de mar igual a 0.00334 ppm (partes por millón en peso); el flujo de agua de mar requerido para producir 0.862 libras por minuto de U_3O_8 en una de estas plantas con resinas de una eficiencia de absorción del 80% es 3.87×10^7 galones/minuto. Este flujo es cerca de 110 veces mayor que el flujo total de agua de enfriamiento (350.000 gpm.) que necesita una planta nuclear del tipo PWR. de 1100 Mwe.

Estas cifras dan una clara indicación que este proceso es una operación a gran escala, y por lo tanto, las dos áreas claves de investigación y desarrollo que deben estudiarse en detalle para transformar la recuperación del uranio del agua del mar en un proceso industrial competitivo son:

- 1.- El desarrollo de sistemas absorbedores mas efectivos y selectivos junto con la ingeniería química asociada a los mismos.
- 2.- El desarrollo de métodos económicos que permitan poner en contacto grandes cantidades de agua de mar con sistemas de absorción de mínimas pérdidas.

3.- DISEÑO CONCEPTUAL DEL SORBENTE

El uranio en el agua de mar existe primariamente como complejo de tricarbonato de uranil, como se muestra en la figura No.2. Este ion de ocho-coordenadas tiene un radio de 4.85 Å, siendo uno de los iones mas grandes contenidos en el agua de mar. Sin embargo, la concentración molar del uranio es 8 órdenes de magnitud mas baja que la concentración de los iones grandes contenidos en el agua del mar (Mg, Ca, Na, Cu,....). El complejo tricarbonato es muy estable en solución, sin embargo, cuando el ph es reducido bajo 8, el complejo se descompone facilmente.

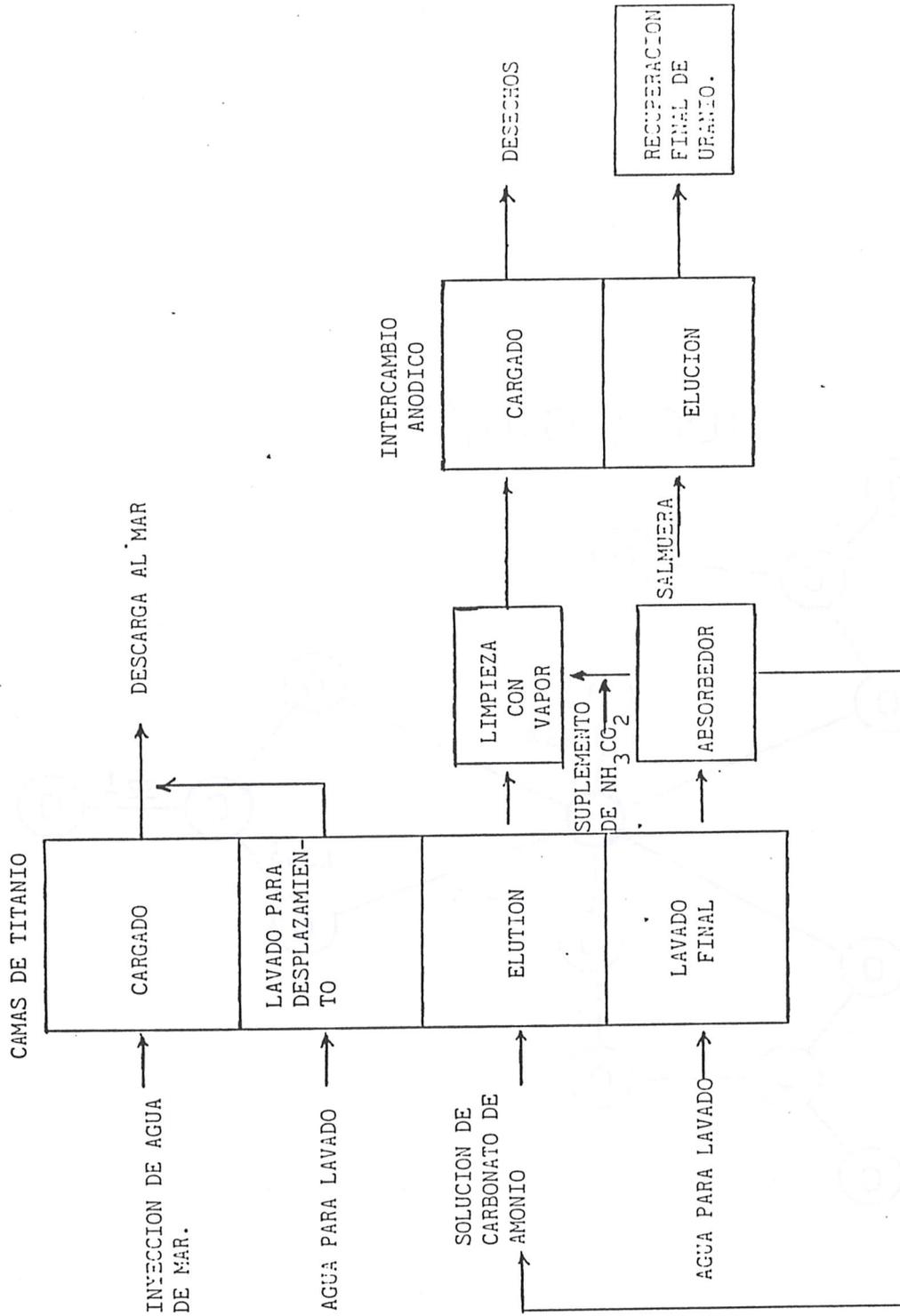


FIGURA No. 1: FLUJO DE PROCESO PARA RECUPERAR URANIO DEL AGUA DE MAR.

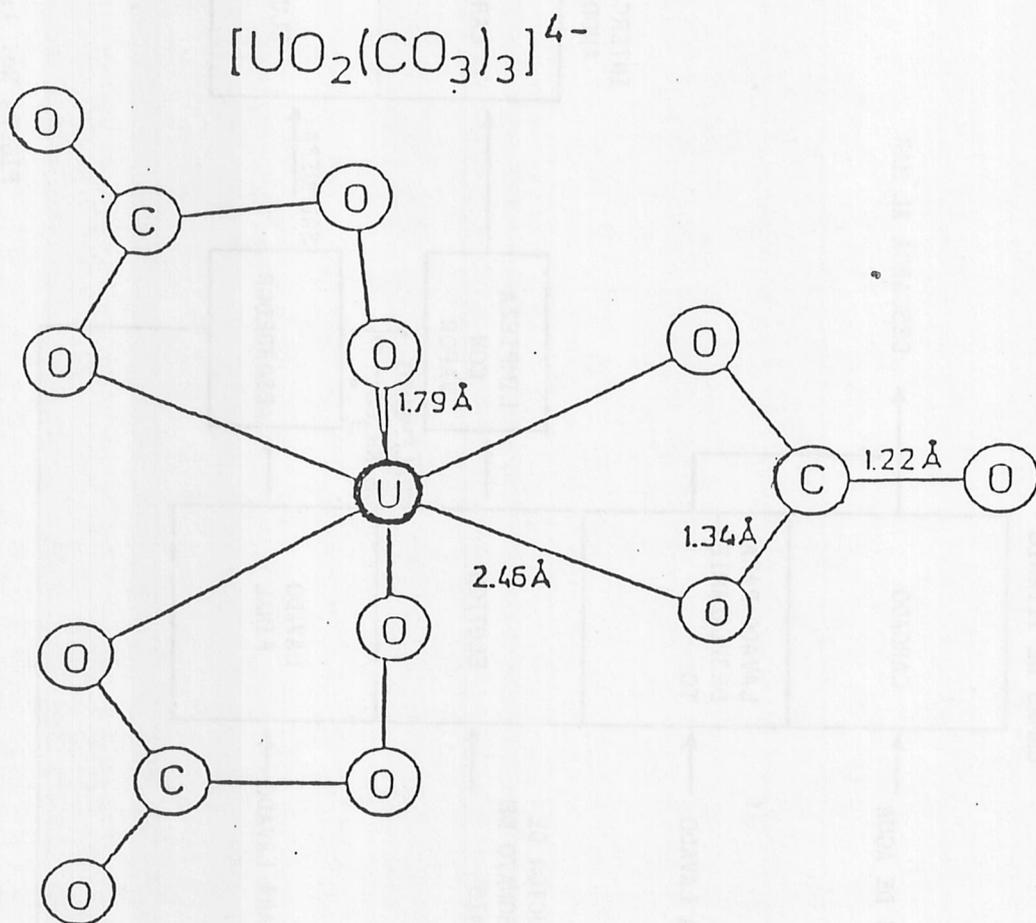


FIGURA No. 2 : ESTRUCTURA DE ANIONES COMPLEJOS DE CARBONATOS DE URANIL (REF. 2).

El complejo de uranio es separado del agua del mar por remoción selectiva usando una variedad de absorbedores. Gran cantidad de investigación esta realizándose en Alemania Federal y Japón sobre este tema (Ref. 3,4, y 5).

El material absorbente ideal debería tener las propiedades que se indican a continuación, las cuales deben optimizarse con el objeto de cumplir con requerimientos económicos y técnicos:

- 1.- **Gran capacidad de absorcion/selectividad.** El sorbente debe ser muy selectivo para el complejo uranio y con alta capacidad de absorción antes de alcanzar su saturación.
- 2.- **Muy alta velocidad de absorcion/velocidad de penetración.** Velocidad a la cual el sorbente se carga con (recolecta) Uranio.
- 3.- **Densidad de los pellets del sorbente.** Influencia el flujo de agua de mar a través del sorbente, y por lo tanto, el suministro de uranio para el proceso de absorción.
- 4.- **Estabilidad contra la abrasión.**
- 5.- **Estabilidad química.**
- 6.- **Sorbente re-usable.** Con solo un simple proceso de regeneración.
- 7.- **Material sorbente no tóxico.** Debido a que este material esta directamente en contacto con el agua del mar, produciéndose ciertas pérdidas que no deben ser contaminantes.
- 8.- **Material sorbente de bajo costo.** Se usan grandes cantidades de material sorbente.

Las propiedades N° 4 y N° 5 son importantes para alcanzar un numero suficientemente alto de ciclos de absorción/regeneración sin pérdida de actividad del sorbente.

La baja concentración de uranio en el agua de mar requiere métodos extremadamente eficientes para su recuperación. Métodos tales como la extracción por solvente y la co-precipitación, aparecen en la literatura como no adecuados debido a razones de tipo económico y de protección del medio ambiente (Ref. 5). En la actualidad el método que aparece mas promisorio es el uso de absorbentes.

A la fecha Oxidos de Hidro Titanio (HTO) y resinas del tipo intercambio iónico (resinas Amidoxinas) estan siendo muy estudiadas para recuperación de U de agua del mar. Los HTO son simples de fabricar y las pruebas a las que han sido sometidos muestran capacidades extractivas de 24-1500 mg.U/Kg. de absorbente. Esta gran capacidad de absorción de U, junto con su baja solubilidad en agua de mar los convierten en una buena elección para recuperar U. Sin embargo debido a que los HTO son suaves y tienden a convertirse en polvo facilmente, se producen pérdidas importantes. La extracción de una Tonelada de U (con una eficiencia del 30%) facilmente pueden originar pérdidas cercanas a 100 ton. de HTO. Es importante hacer presente que este producto es muy barato.

Los HTO tienen el inconveniente de una cinética de absorción lenta, situación que se agudiza en caso se utilizen partículas relativamente grandes (1 mm.). Tiempos de cargado de días y semanas no son poco comunes. Estos inconvenientes limitan la velocidad a la cual el uranio puede ser extraído.

Un medio alternativo son resinas de intercambio iónico las cuales se han mostrado efectivas para absorber uranio. Se ha encontrado que la naturaleza de los grupos funcionales incorporados a las resinas son el factor determinante de sus características de absorción. Las siguientes Tablas N° 1 y N° 2 comparan la efectividad y las propiedades relevantes de los sorbentes HTO y de las resinas de intercambio iónico (resinas IX).

Un aumento de la capacidad de absorción prolonga la fase de absorción, aumentando la concentración de la solución de absorción, lo que permite reducir las escalas de los procesos de desabsorción y refinación. Sin embargo el efecto económico de la capacidad de absorción es relativamente pequeño, debido a que el costo total depende principalmente del propio proceso de absorción. Por otra parte, la velocidad de absorción, confiabilidad y precio del absorbente afectan los costos directamente, de tal manera que actualmente, aparecería mas rentable el uso de HTO, debido a su precio mas bajo. En este aspecto la situación a futuro es impredecible.

<u>Absorbente</u>	<u>Absorción de Equilibrio, A_{∞} ($\mu\text{g/g} \times \text{Abs}$)</u>	<u>Tiempo de Relajación, γ (h)</u>	<u>A_{∞}/γ ($\mu\text{g/g} \times \text{Abs} \times \text{h}$)</u>
HTO	448	70	6.4
Resina IX Amidoxine	640	570	1.1
Absorbentes fibrosos con- teniendo grupos amidoxine	111	58	1.9
Absorbentes fibrosos con- teniendo grupos ami- doxine y car- boxyl	117	41	2.8

TABLA N°1: Comparación de Efectividad entre Resinas Absorbentes IX y HTO. (Ref. 5)

<u>Propiedad</u>	<u>HTO</u>		<u>Resina IX</u>
Capacidad de Absorción	A	<	S
Velocidad de Absorción	A	=	A
Selectividad	N	<	A
Densidad Aparente	S	>	A
Granulometría	A	<	S
Resistencia Física	A	=	A
Resistencia Química	A	=	A
Precio	A	>	N

S = Satisfactorio A = Adecuado N = No Satisfactorio

TABLA N°2 Propiedades de Absorbentes HTO y Resina IX.

De la Tabla No.2 es posible concluir que los absorbentes tipo resina IX tienen mejor capacidad de absorción y de selectividad que los HTO.

Para el caso de este estudio, asumiremos como mas conveniente el uso de resinas IX a base de poliamidoxinas (PAO) para la recuperaci3n de uranio, lo que esta en concordancia con investigaciones realizadas en Alemania con este mismo prop3sito.

Las metas de performance m3nimas a alcanzar por una cama de absorci3n fluida, que real3sticamente podria satisfacer las condiciones de operaci3n de una planta marina para absorci3n de uranio del agua del mar, se muestran a continuaci3n (Ref. 4):

Eficiencia Total de Absorci3n y Eluci3n:	> 85%
Recuperaci3n de uranio	: > 30 ppm/d
Duraci3n del proceso de absorci3n hasta la eluci3n	: > 6 meses
Tiempo de utilizaci3n del sorbente	: > 3 a3os
Costo del Absorbedor (sorbente)	: < 5 US\$/lb.

Precios mas altos del absorbente pueden ser aceptables si el performance (rendimiento) de este aumenta permitiendo usar cantidades menores de absorbedor para la extracci3n de iguales cantidades de uranio durante iguales intervalos de tiempo.

4.- PROCESO DE ELUCION

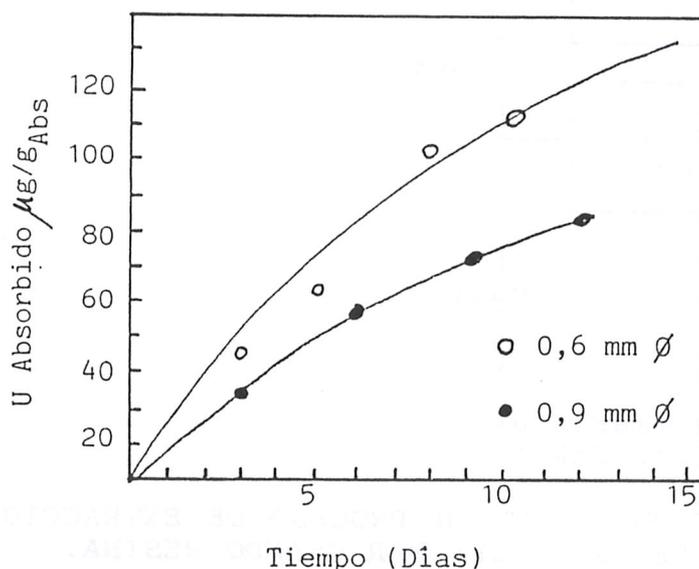
El uranio absorbido por el sorbedor debe ser eluido para aumentar su concentraci3n. Los iones de uranio deben ser removidos con la menor cantidad de l3quido posible para hacer mas f3cil la siguiente separaci3n.

Acidos tales como el hidroclicrico y sulf3rico pueden usarse como eluentes. Carbonatos de Amonio, Sodio o el bi-carbonato de Sodio tambi3n son apropiados para el proceso.

Acidos relativamente concentrados pueden causar la destrucci3n de los gr3nulos del sorbedor disolvi3ndolos. Estos 3cidos deben descartarse por razones econ3micas. Concentraciones diluidas de 3cidos, tal como 0.2N de HCl., requieren tiempos mas largos de eluci3n que las soluciones con carbonatos. Usualmente se usa carbonato y bi-carbonato de amonio como eluyentes.

Antes y despu3s de la eluci3n, las camas tienen que lavarse con cantidades significativas de agua dulce (Ref. 6) para remover residuos indeseados y ayudar a su regeneraci3n.

Los tiempos de elución varían en proporción a la concentración del uranio absorbido y a la velocidad del flujo de eluido, como se muestra en la siguiente figura (Ref. 2):



La figura N° 3 muestra un diagrama de flujo de un proceso de elución que usa resinas amidoxine para absorción de uranio del agua de mar, junto con otras dos resinas, una que tiene glicina-N, N-bis denominada UR y la otra, una resina de intercambio iónico IX fuertemente básica SA-10A (tipo Cl) denominado SA para revertir el sorbimiento, separar y concentrar la "Torta Amarilla" (Yellow Cake) como producto final. El uranio contenido en el eluido usando este esquema, es concentrado entre 20 y 100 veces, con la resina UR y 20 a 30 veces con la resina de intercambio iónico SA.

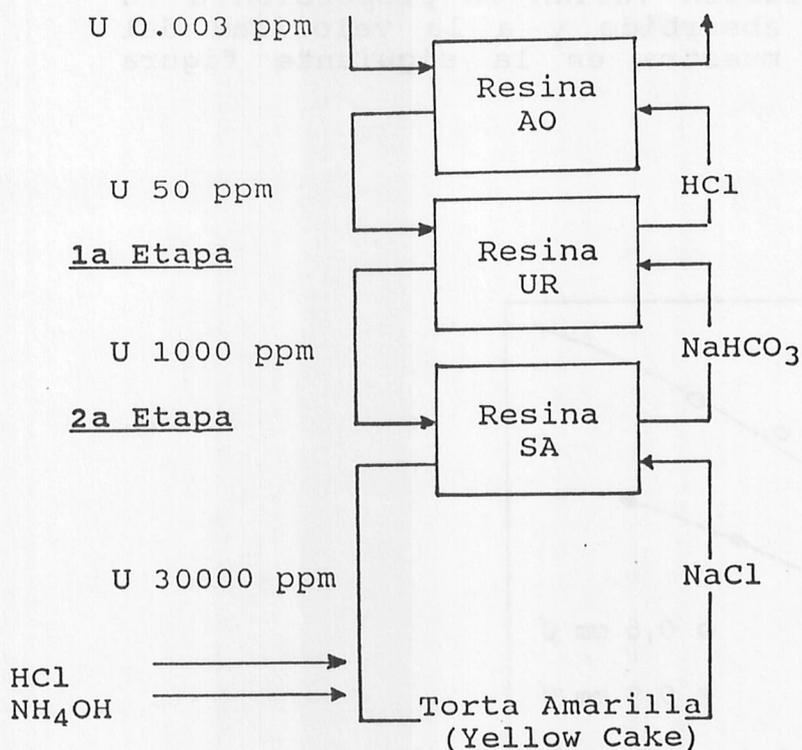


FIGURA N° 3 : DIAGRAMA DE FLUJO DE UN PROCESO DE EXTRACCION DEL URANIO DEL AGUA DEL MAR USANDO RESINA.

5.- DESCRIPCION CONCEPTUAL DE LA PLANTA RECUPERADORA DE URANIO DEL AGUA DE MAR.

Tal como ha sido mencionado en la precedente sección N° 2, la otra área clave que debe desarrollarse para hacer económicamente posible la recuperación de uranio del agua del mar es el desarrollo a un método económico para poner en contacto cantidades inmensas de agua de mar con un sistema sorbedor. Esta sección presentará una forma de satisfacer este objetivo.

Diversos conceptos muestra la literatura para plantas productoras de uranio a partir del agua del mar (ref.8,9,10). Para la etapa de recuperación, aparentemente existe acuerdo que entre los mejores sorbentes para emplearse en el proceso de absorción, están los óxidos de hidrógeno titanio (HTO) y las resinas orgánicas de intercambio iónico en base a

poliamidoxina (PAO) en forma granulada. El contacto entre el agua de mar y el granulado absorbedor es realizado en capas compactas o fluidas con velocidades de agua de mar del orden de 1 cm./seg.. Debido al tremendo volumen de agua de mar que debe ser procesada en estas plantas, por cada kilogramo de uranio producido, aproximadamente mil millones de litros de agua de mar tienen que bombearse a través de una unidad apropiada de recuperación. A velocidades del agua tan bajas es necesario usar capas con áreas bastante grandes situación que tiende a aumentar los costos de capital de la inversión. Con el objeto de evitar esta desventaja, y poder trabajar con velocidades de agua de mar mas altas, M. Driscoll del Massachusetts Institute of Technology (MIT) de los Estados Unidos, ha propuesto usar superficies (capas) de filtros fabricados de fibras PAO dispuestos como el algodón con alta fracción de vacíos. Este arreglo podría permitir velocidades de 7 a 8 cm./seg. sin muchas pérdidas (caídas) de presión en las superficies de absorción.

Otro concepto posible de usar para resolver el mismo problema de aumentar la velocidad del agua de mar a través de la capa de absorbedor, es el concepto del "Loop de Absorción", el cual puede adaptarse para uso de granulados PAO en lugar de material fibroso (Ref:11). En este caso el granulado de absorción es llevado en conjunto con el agua de mar a una configuración tipo loop, donde se le separa antes de que esta deje la unidad de absorción. Usando este concepto, es posible alcanzar velocidades de agua de mar del orden de 10 a 50 cm./seg., reduciendo considerablemente el área (superficie) de la camada de absorción de la planta de producción.

5.1. FORMULACIONES TEORICAS

El siguiente conjunto de relaciones matemáticas simples, relacionan importantes especificaciones técnicas de plantas de absorción para recuperación de uranio del agua del mar, permitiendo además calcular algunos parámetros limitantes del proceso y del diseño de la planta.

$$\text{Producción } \overset{\circ}{P} \text{ (ton/Dia) : } \overset{\circ}{P} = \overset{\circ}{V} \times \rho \times c \times \gamma \times 24 \quad (1.)$$

$$\text{Volumen requerido de agua } \overset{\circ}{V} \text{ (mt}^3\text{/hr): } \overset{\circ}{V} = \frac{\overset{\circ}{P}}{\rho \times c \times \eta \times 24} \quad (2.)$$

Considerando una velocidad w (mt/seg) y una camada de sorbedor de un área igual a F (mt²)

$$\overset{\circ}{V} = F \times w \times 3600 \quad (3.)$$

$$F = \frac{\overset{\circ}{V}}{w \times 3600} \quad (4.)$$

Llamando a la velocidad (razón) de cargado de la resina absorbadora $\overset{\circ}{b}$, la velocidad (razón) de producción $\overset{\circ}{P}$ puede expresarse como :

$$\overset{\circ}{P} = M_{\text{ABS}} \times \overset{\circ}{b} \quad (5.) \quad M_{\text{ABS}} = \frac{\overset{\circ}{P}}{\overset{\circ}{b}} \quad (6.)$$

- $\overset{\circ}{P}$ = Capacidad de producción en Ton/día de la planta
- $\overset{\circ}{V}$ = Velocidad de flujo de agua de mar a través de la planta en (m³/hr)
- ρ = Densidad de agua de mar = 1,028 (Ton/m³)
- c = Concentración relativa de uranio en agua de mar = 3.3×10^{-9}
- η = Eficiencia del proceso de absorción.
- b = Velocidad (razón) de cargado, aumento en la razón de masa (masa uranio absorbido/masa sorbente) por unidad de tiempo (dia⁻¹)
- w = Velocidad superficial del agua de mar a través de la unidad de absorción en mt/seg.
- M_{ABS} = Inventario de masa de absorbedor (sorbente) de la planta en toneladas (Ton).

5.2. DATOS DE ENTRADA

Para el análisis y discusión del concepto de planta productora que se describe en la siguiente sección N° 5.3, se han elegido para el material sorbente los parámetros que se muestran en la tabla N° 3, tomados de la Referencia 10.

<u>Parámetro</u>	"a"		"b"	
	<u>Caso 1</u>		<u>Caso 2</u>	
η	0.50		0.75	
\dot{b} (d ⁻¹)	10 x 10 ⁻⁶		15 x 10 ⁻⁶	
w (mt/seg)	0.13		0.42	

"a" Caso 1 : Datos obtenidos en forma experimental
 "b" Caso 2 : Datos extrapolados.

TABLA N° 3 PARAMETROS DE ENTRADA DEL SORBENTE PARA DISEÑO DE UNA PLANTA RECUPERADORA DE URANIO DE AGUA DE MAR.

Asumiendo una planta piloto de una capacidad de producción anual de 150 ton/año (Tamaño necesario para satisfacer los requerimientos anuales de combustible para una planta nuclear PWR de 1000 Mwe), la producción diaria de uranio al 100% de carga debe ser igual a 0.411 toneladas métricas/día. Esta capacidad de producción junto con los datos de entrada para el sorbente que se muestran en la tabla N° 3, permite calcular los parámetros de proceso, para esta planta piloto de recuperación usando las relaciones matemáticas descritas en la sección 5.1. Estos parámetros de proceso se resumen en la siguiente tabla N° 4.

<u>Parámetro</u>	<u>Caso 1</u>	<u>Caso 2</u>
$\overset{\circ}{V}$ (m ³ /hr)	10.09 x 10 ⁶	6.73 x 10 ⁶
F (m ²)	21560 x (2)	4451 x (2)
M _{Abs} (^t on)	41100	27400

TABLA N°4 PARAMETROS DE PROCESO PARA UNA PLANTA RECUPERADORA DE URANIO DE UNA CAPACIDAD P=0.411TON METRICAS/DIA.

De las tablas N° 3 y N° 4 es posible concluir que un aumento en la eficiencia de absorción " η " de 0.5 a 0.75 reduce el flujo necesario de agua de mar alrededor de un 33%. Asimismo, con velocidades del agua de mar más de 3 veces superiores para el "Caso 2" ($w = 0.13$ m/seg versus $w = 0.42$ m/seg), el área necesaria de camada de sorbedor para el "Caso 2" es 20 % menor que para el "Caso 1". El aumento en la razón (velocidad) de carga b° de 10 ppm/día a 15 ppm/día permite una reducción de 33 % en el inventario de sorbedor.

5.3. ESQUEMA CONCEPTUAL DE LA PLANTA

Gran diversidad de diferentes arreglos para plantas recuperadoras de uranio del agua del mar han sido propuestos, usándose construcciones fijas en la costa; o flotantes, costeras y de alta mar, equipadas con camadas sorbentes fijas, o camadas fluidizadas.

La mayoría son diseños que usan bombas para la circulación del agua de mar, sin embargo otros sacan ventaja del movimiento de las olas y de las mareas.

Para cumplir los objetivos de este estudio se restringirá el análisis al proceso de absorción de uranio en el mar utilizando camada fluidizadas del tipo loop y dispuestas en un buque especialmente acondicionado para este propósito. Los procesos siguientes, relativos a la transferencia de resinas cargadas con uranio a plantas terrestres, para su elución y posterior preparación de la "Torta Amarilla" (yellow cake), no serán tratados en este estudio, debido a que estos son considerados procesos muy conocidos empleados en la recuperación de minerales terrestres de baja ley.

Nuestra planta de absorción diseñada tomando como base plantas similares que figuran en las referencias 9, 10 y 11, se supone autosuficiente, flotante de alta mar, y especialmente acondicionada en un buque del tipo porta contenedores. Como granulado absorbedor (sorbente) se utilizará resinas orgánicas de intercambio iónico a base de poliamidoxinas (PAO) los cuales están libremente disponibles en el comercio. Las resinas a usarse deben tener un tamaño de grano entre 0.3 cm y 1.2 cm de diámetro y una densidad de 1.1 gr/cm³ (Ref. 10).

El contacto entre el agua de mar y las resinas PAO es realizado utilizando el "concepto de loop absorbedor"; en el cual el granulado es mezclado con el agua de mar y arrastrado por esta hacia la configuración tipo loop, donde el granulado es procesado y nuevamente separado del flujo, con el objeto de ser reciclado hacia la entrada del agua del mar, descargándose el agua empobrecida en U, al costado.

La siguiente tabla N° 5 muestra las dimensiones principales y especificaciones de un buque porta contenedores con las necesarias modificaciones para llevar una planta recuperadora de uranio por absorción.

Eslora (mts)	287,73
Manga (mts)	32,20
Puntal (mts)	24,00
Calado (mts)	13,056
Tonelaje Bruto (Ton)	58.384,6
Potencia de Máquina (HP)	2 x 30820

TABLA N° 5 : CARACTERISTICAS PRINCIPALES DE BUQUE PORTA CONTENEDORES (TIPO "FRANKFURT EXPRESS", CONSTRUIDO EN 1981 POR HOWALDTSWERKE-DEUTSCHE WERFT AG KIEL/HAMBURGO PARA HAPOG-LLOYD AG).

Analizando las características del buque especificado en la tabla N° 5, es posible concluir que a este buque porta contenedores de tipo standard, con pequeñas modificaciones se le puede acomodar un arreglo horizontal de absorción de un área aproximada a 6.000 mt^2 , cuyas dimensiones podrían ser $30 \text{ mt} \times 200 \text{ mt}$. Esta cama (arreglo) de absorción podría ser construida como se muestra en la siguiente figura N°4, instalando 20 secciones idénticas de 300 mt^2 ($10 \text{ mt} \times 30 \text{ mt}$), conteniendo cada una los loops de absorción alimentados con agua de mar a través de tomas ubicadas en el fondo del casco.

Cada sección puede tener 4 loops combinados en grupos de a dos con un ancho de 30 metros. De esta forma las dimensiones horizontales de cada loop alcanzan a $10 \text{ mt} \times 7,5 \text{ mt}$. Cada loop es alimentado por su propia bomba, la cual va instalada en su propia inyección de agua de mar en el fondo del casco. El agua "emprobecida" en contenido de Uranio (procesada) de 2 loops es descargada cerca de la superficie del mar hacia ambos costados del buque.

Usando este tipo de arreglo un buque puede acomodar 80 loops independientes con una sección de 6.000 mt^2 . Considerando los parámetros de absorción mostrados en la Tabla N° 4 como "CASO N°1", la planta de producción requerida para satisfacer los requerimientos de combustible de un reactor nuclear PWR de 1000 Mwe ($150 \text{ Ton U}_3\text{O}_8/\text{año}$) debería tener 8 buques iguales de a lo menos cada uno de una capacidad de producción de 18.75 tonelada de uranio por año. Para el "CASO N° 2", con dos buques sería suficiente.

Usando el concepto "Loop de Absorción", se puede alcanzar flujos de agua de mar con velocidades de alrededor de 0.13 mt/seg sin pérdidas significativas de sorbente granulado (Ref. 10).

Usando los datos mostrados en las tablas N° 3 y N°4, la siguiente tabla N°6, presenta los parámetros de diseño calculados para una planta de una capacidad productiva de 0.411 ton U/día usando como sorbente resinas PAO cargadas en el sistema "Loop de Absorción".

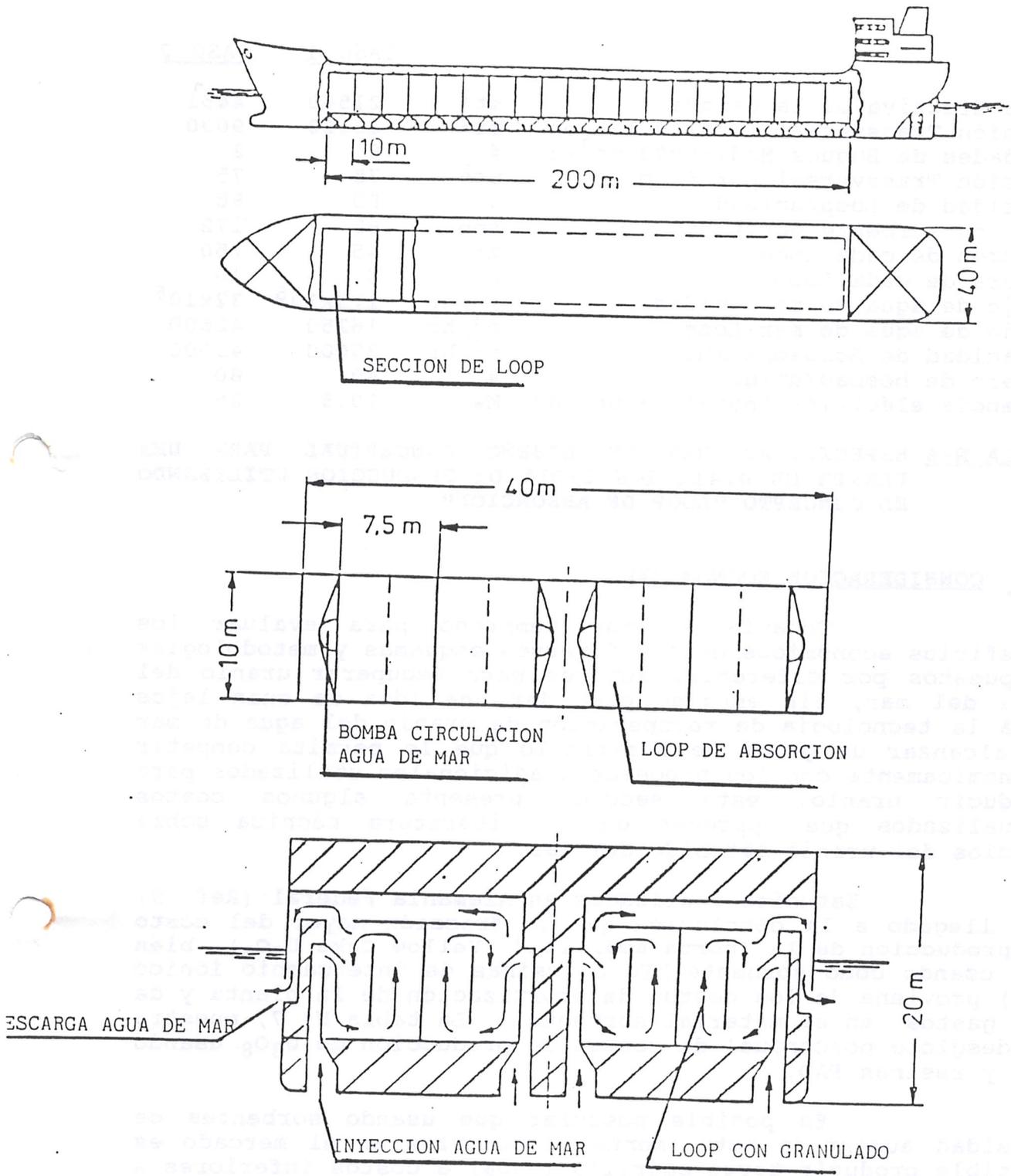


FIGURA No.4 : ARREGLO DE PLANTA TIPO LOOP DE ABSORCION RECUPERADORA DE URANIO PARA BUQUES.

		<u>CASO 1</u>	<u>CASO 2</u>
Area Efectiva de la Camada	mt ²	21560	4451
Sección Transversal Total del Loop	mt ²	43120	9000
Unidades de Buques Mod. (6000 mt ² /u.)	#	8	2
Sección Transversal por Loop	mt ²	75	75
Cantidad de Loop/unidad	#	80	80
Masa de sorbente por Loop	ton	65	172
Volumen de cada Loop	m ³	450	750
Altura de cada Loop	m	6	10
Flujo de agua de mar/unidad	m ³ /hr	1.3x10 ⁶	32x10 ⁶
Flujo de agua de mar/Loop	m ³ /hr	16250	42500
Capacidad de Bombeo/Bomba	m ³ /hr	35000	43000
Número de bombas/unidad	#	40	80
Potencia eléctrica Instalada/unidad	Mw	10.5	26

TABLA N°6 ESPECIFICACIONES DE DISEÑO CONCEPTUAL PARA UNA PLANTA DE 0.411 TON U/DIA DE PRODUCCION UTILIZANDO EL CONCEPTO "LOOP DE ABSORCION"

6.-. CONSIDERACION ECONOMICAS

Todavía es muy temprano para evaluar los beneficios económicos de los diversos esquemas y metodologías propuestos por diferentes autores para recuperar uranio del agua del mar, sin embargo para dar una idea de cuan lejos está la tecnología de recuperación de uranio del agua de mar de alcanzar un grado de desarrollo que le permita competir economicamente con los procesos tradicionales utilizados para producir uranio, esta sección presenta algunos costos actualizados que aparecen en la literatura técnica sobre precios del uranio obtenido del mar.

Estudios realizados en Alemania Federal (Ref. 9) han llegado a la conclusión que la fracción mayor del costo de producción de la "torta amarilla" (Yellow Cake U₃O₈), bien sea usando como sorbente HTO o resinas de intercambio iónico (IX) proviene de los costos de amortización de la planta y de los gastos en el material sorbente. La tabla N° 7, muestra un desglose porcentual de costos de producción de U₃O₈ usando HTO y resinas PAO.

Es posible postular que usando sorbentes de densidad aumentada actualmente disponibles en el mercado es factible producir torta amarilla (U₃O₈) a costos inferiores a los 200 US\$ dolares por libra.

	<u>HTO</u>	<u>PAO</u>
Costo del Sorbente	25 %	25 %
Amortizacion Planta	37 %	44 %
Costo Elucion	14 %	2 %
Costos Mantención	9 %	11 %
Costos Personal	3 %	4 %
Costos Energía	3 %	3 %
Costos Seguros	9 %	11 %

TABLA N° 7 : DESGLOSE PORCENTUAL DE COSTOS DE PRODUCCION DE U₃O₈

7.- CONCLUSIONES

1.- La recuperación de uranio del agua del mar es una operación a gran escala debido a la muy baja concentración de 0.0033 ppm de uranio en el agua de mar.

2.- Para hacer competitivo el proceso de extracción de uranio del agua del mar las dos áreas claves donde debe hacerse investigación y desarrollo son :

a) Desarrollo de sistemas sorbentes mas efectivos y selectivos en conjunto con la ingeniería química asociada con estos.

b) Desarrollo de un método económico para poner en contacto inmensas cantidades de agua de mar con los sistemas sorbentes.

3.- Las principales características del material sorbente que deben investigarse y mejorarse son :

- Gran capacidad de absorción/selectividad del sorbente.
- Alta velocidad de absorción.
- Alta velocidad de penetración
- Gran estabilidad física y química
- Sorbente no tóxico.
- Apropiada densidad y
- Bajo costo.

- 4.- La extremadamente baja concentración de uranio en el agua del mar impide su recuperación usando los métodos tradicionales extracción por solvente, y la coprecipitación, apareciendo en la actualidad, como lo mas prometorio el uso de materiales absorbentes para esta finalidad.
- 5.- Los materiales absorbentes que a la fecha aparecen con las mejores posibilidades son los Oxidos de Hidro Titanio (HTO) y las resinas poliamidoxinas de intercambio iónico (PAO). De todas formas es importantes hacer presente que todavía no existe a nivel mundial acuerdo sobre el tipo mejor de sorbente y su configuración mas adecuada.
- 6.- No existe aun acuerdo sobre los arreglos mejores para poner en contacto cantidades muy grandes de agua con sistemas sorbentes.
- 7.- Una planta marina para operar en alta mar de una capacidad de producción anual de 150 toneladas métricas de uranio, utilizando resinas poliamidoxinas de intercambio iónico (PAO) como sorbente, requiere utilizar 8 buques modulares de 59000 toneladas de desplazamiento, adaptados para llevar cada uno 65 toneladas de resina PAO distribuida en una área efectiva de 6000 mt^2 y con la maquinaria necesaria para circular $1.3 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{hr}$ de agua de mar a través de camada fluidizadas en arreglo del tipo "Loop de Absorción".
- 8.- Falta aún más investigación y desarrollo para evaluar los beneficios económicos de los esfuerzos destinados a recuperar uranio de agua de mar; sin embargo considerando la tecnología actualmente disponible, aparece como posible recuperar uranio del mar a costos inferiores a los 200 US dolares por libra de U_3O_8 .

8.- REFERENCIAS

- 1.- Brooks N., "Process Design Evaluation for the Recovery of Uranium from Seawater", MIT Thesis, August 1976.
- 2.- Romanik P., "Process Design Using ASPEN of Uranium from Seawater Recovery System", MIT Thesis, May 1982.
- 3.- Witte E. et al, "The Extraction of Uranium from Seawater by Hydroxylamine Derivatives of Polyacrylonitrile Resins", Proceedings of International Meeting, "Rec. of U from Seawater", 17-19 Oct. 1983, Tokio, Japon.
- 4.- Fremery M and Bitte J. "Views on the Preparation of Fluidized Bed Sorbers for the Extraction of Uranium from Seawater", Proceedings of International Meeting, "Rec. of U from Seawater", 17-19 Oct. 1983, Tokio, Japon.
- 5.- Omichi H. et al., "Recovery of Uranium from Seawater with Fibrous Adsorbents Containing Amidoxine Groups", Proceedings of International Meeting, "Rec. of U from Seawater", 17-19 Oct. 1983, Tokio, Japon.
- 6.- Best F. y Driscoll M. "Prospect for the Recovery of Uranium from Seawater", MIT Energy Lab Report N° MIT-EL80-001, January 1980.
- 7.- Sugasaka K. et al., "Separation and Concentration from Acidic Eluate", Proceedings of International Meeting, "Rec. of U. from Seawater", 17-19 Oct. 1983, Tokio, Japon.
- 8.- Driscoll M. et al. "A Ship-Borne High-Performance System for the Recovery of U from Seawater", 1982.
- 9.- Ludwing K. et al., "Comparison of Different Extraction Concepts for the Recovery of Uranium from Seawater", Proceedings of International Meeting "Rec. of U. from Seawater", 17-19 Oct. 1983, Tokio, Japon.

- 10.- Koske H. y Ohlrogge K., "The Design of a Modular Pilot Plant Based on The Adsorber Loop Concept", Proceedings of International Meeting "Rec. of U from Seawater", 17-19 Oct. 1983, Tokio, Japon.
- 11.- Koske H. y Ohlrogge K., "The Adsorber Loop Concept for the Contact Between Seawater and Absorber Granulate", Proceedings of International Meeting "Rec. of U from Seawater", 17-19 Oct. 1983, Tokio Japon.