

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
FACULTAD DE QUIMICA



**LA SEPARACION ISOTOPICA IMPORTANCIA,
POSIBILIDADES Y PERSPECTIVAS PARA
MEXICO Y SU INDUSTRIA NUCLEAR**

T E S I S

**Que Para Obtener el Título de
INGENIERO QUIMICO
P r e s e n t a**

OCTAVIO REYES VENEGAS

México, D. F.

1978



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

TESIS 1978
AÑO M.C. 1978 361
FECHA _____
MISC. _____



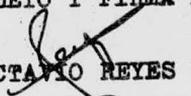
JURADO ASIGNADO ORIGINALMENTE SEGUN EL TEMA:

PRESIDENTE: LUIS GALVEZ CRUZ
VOCAL: LUIS CABRERA MOSQUEDA
SECRETARIO: RUBEN FRANCISCO ORTEGA CARMONA
1er. SUPLENTE: CIELITA ARCHUNDIA DE LA ROSA
2do. SUPLENTE: GUILLERMINA BURILLO A. DE VELAZQUEZ

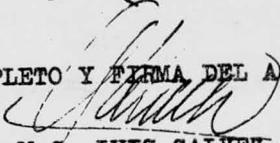
SITIO DONDE SE DESARROLLO EL TEMA:

CENTRO DE ESTUDIOS NUCLEARES (CEN-UNAM)

NOMBRE COMPLETO Y FIRMA DEL SUSTENTANTE:


OCTAVIO REYES VENEGAS

NOMBRE COMPLETO Y FIRMA DEL ASESOR DEL TEMA:


M.C. LUIS GALVEZ CRUZ

"Aunque los mares y los continentes nos separen, aún así seremos compañeros en nuestro viaje a la Montaña Sagrada".

K. Gibran

Con amor y cariño:

A mis padres
por ser mis raíces

A mis hermanos
por ser el tronco
y las ramas

A Flor y Tania
por ser las primeras flo
res y frutos; con espe--
cial cariño y amor.

A MIS MAESTROS:

"Ningún hombre podrá revelaros nada que no yazga aletargado en la aurora de vuestro conocimiento.

El maestro, que rodeado de sus discípulos camina por la sombra del templo, no os da de su sabiduría, sino más bien, de su fe y de su afecto.

Si en verdad es sabio, no os vedará el acceso a su saber, sino os conducirá mejor - al umbral de vuestra propia inteligencia.

El astrónomo podrá hablaros de su conocimiento del espacio, más no podrá daros su entendimiento.

El músico podrá instruiros en el ritmo que hay en el espacio, más no podrá daros el oído que lo capta y la voz que lo expresa.

Y el versado en la ciencia de los números podrá hablaros de las regiones del peso y la medida, más no llevaros hasta ellas.

Porque la visión de un hombre no presta sus alas a otro hombre".

K.G.

A MIS COMPAÑEROS:

"Amigo mío, tú no eres mi amigo, pero -
¿cómo hacértelo entender? mi camino no es el
tuyo; sin embargo, caminamos juntos, con las
manos unidas".

K.G.

I N D I C E

INTRODUCCION

CAPITULO I

Antecedentes	4
--------------	---

CAPITULO II

Teoría de la Separación Isotópica	12
-----------------------------------	----

CAPITULO III

Métodos de Separación	25
Clasificación	26
Difusión Térmica	30
Centrifugación Gaseosa	35
Proceso Fenn o Separación Sonda	49
Separación Vortex	50
Separación con Boquillas-Nozzle	51
Difusión Gaseosa	55
Proceso Membrana Jet o	
Proceso de Invasión	73
Rayos Moleculares Cruzados	75
Intercambio Químico	76
Procesos de Destilación	86
Electromagnético-Calutrón	92
Separación con Plasmas Centrifugos	96
Proceso Electrolítico	103
Separación con Laser	104

CAPITULO IV

El Reprocesamiento de Combustible como Método de Separación Isotópica	113
--	-----

CAPITULO V

Análisis Comparativo	120
----------------------	-----

CAPITULO VI

Factibilidad	126
--------------	-----

CAPITULO VII

Participación en la Industria Nuclear. Importancia Estratégica	130
---	-----

CONCLUSIONES	140
--------------	-----

BIBLIOGRAFIA	145
--------------	-----

"Treinta rayos convergen en el círculo de la rueda y por los espacios que hay entre ellos es donde reside la utilidad de la rueda. La arcilla se trabaja en forma de vasos y en el vacío reside la utilidad de ellos. - Se abren puertas y ventanas en las paredes de una casa y por los espacios vacíos es que podemos utilizarla. Así, de la no-existencia viene la utilidad y de la existencia la posesión".

Leo Tse en Tao Te King.

INTRODUCCION

La industria de separación de isótopos es una parte importante en el ciclo de combustible nuclear, cualquiera que sea el tipo de reactor involucrado en el ciclo: - LWR, HWR, HTR, FBR. El desarrollo futuro de la fusión - termonuclear aumenta las perspectivas de utilización de esta industria y en el campo de la investigación, igualmente desarrolla un papel muy importante.

Los requerimientos mundiales de combustible para reactores nucleares del año 1974 al 2000, se estima serán de aproximadamente 6 millones de toneladas de U_3O_8 .

Los costos de enriquecimiento estimados por procesar esta cantidad de mineral es de aproximadamente 150 - billones de dólares (1, 2).

Si el ciclo es de uranio natural para reactores tipo Candu, se requiere gran cantidad de agua pesada (D_2O)

La capacidad de producción mundial no es mayor de 10^6 Kg/año y probablemente no sea suficiente.

Las estimaciones canadienses predicen necesidades en exceso del orden de 4×10^6 Kg/año para los reactores que ellos construirán (3).

El presente costo de producción de deuterio es 10^3 veces menor que el de U-235 sobre una base por átomo.

Las estimaciones de necesidades de enriquecimiento predicen una expansión rápida y continua.

Este crecimiento puede ser mayor del deseado y algunos países que no tienen esta industria podrían ver retrasado su programa nuclear por saturación de las plan--

tas de los países que sí disponen de instalaciones para realizar el trabajo separativo (4, 5, 6).

Además, ya se predicen déficits en capacidad de trabajo separativo para el período de 1980-82. La comunidad europea por ejemplo, difícilmente podrá cubrir sus necesidades para la década de los ochentas, plantea pues la posibilidad de efectuar el enriquecimiento bajo un plan de interdependencia regional: técnica, estructural y decisional (7).

Si se consideran las posibilidades del ciclo de torio para reactores HTR y el prospecto del reciclado de -- plutonio en FBR, las necesidades involucradas de enriquecimiento deberán también de ser implementadas.

México se encuentra en la etapa inicial de desarrollo de su industria nuclear y prácticamente debe partir -- de cero.

Los recursos naturales disponibles (uranio, torio) -- aún se encuentran en evaluación, los cuadros técnicos y -- científicos en formación y sus posibilidades económicas -- serán buenas para 1982, si no hay imprevistos.

Bajo estos postulados resulta vital, que las decisiones del plan núcleo-eléctrico nacional sean lo más adecuadas y las más redituables a mediano y largo plazo.

De aquí la necesidad de revisar los esquemas de separación isotópica actuales y de un modo especial los que -- se encuentran en desarrollo para poder discernir cual es el más adecuado al modelo de desarrollo nuclear que debe seguirse de acuerdo a un plan nacional de uso racional y -- óptimo de energéticos.

La industria de separación isotópica, tal vez no sea tan vital en la primera fase de desarrollo, pero su importancia será decisiva en los próximos 25 años.

CAPITULO I

ANTECEDENTES

En el período de 1911-13, J.J. Thomson y F.W. Aston, experimentaban la desviación de haces de partículas gaseosas cargadas por medio de fuerzas electrostáticas y magnéticas, con el objeto de comparar directamente los pesos de partículas atómicas. Mediante este experimento se descubrieron los primeros isótopos, es decir los átomos de un mismo elemento que difieren en el número de neutrones en su núcleo; los primeros isótopos descubiertos fueron los del neón y a la fecha se han reconocido especies isotópicas para casi todos los elementos conocidos.

El aislamiento de un elemento de un compuesto ó de un compuesto de una mezcla de elementos, se hace comunmente aprovechando las propiedades químicas de esos átomos.

Estas propiedades están casi enteramente determinadas por la nube electrónica que rodea el núcleo.

Los isótopos de un mismo elemento, tienen virtualmente nubes electrónicas idénticas y únicamente difieren ligeramente en su configuración geométrica.

Como resultado, la separación isotópica por métodos químicos siempre ha sido muy difícil y por lo general, se ha intentado hacerla por medios físicos, que han dependido mayormente de la pequeña diferencia másica en el núcleo de los isótopos.

Evidentemente, el descubrimiento de isótopos vino acompañado del primer proceso de separación, así, los experimentos de Thomson y Aston dieron lugar al espectrómetro de masas; este aparato con algunas modificaciones sirvió más tarde (1940) a Nier para obtener Uranio 235 y demostrar que era un material fisiónable. En 1944 en EUA, empezó a funcionar una planta de calutrones (nombre de los espectrómetros modificados para enriquecimiento), siendo capaces de producir enriquecimientos del orden de 10-15% en U-235 mediante una cascada de 96 calutrones. Posteriores desarrollos de este aparato han llevado a la construcción de aceleradores de partículas, cada vez más perfeccionados.

La versatilidad del espectrómetro de masa auspició un gran desarrollo en la investigación pura y aplicada. El descubrimiento de algunas propiedades útiles de ciertos isótopos, catalizó la creación de nuevos métodos de separación de isótopos que fueran más baratos.

La importancia estratégica de algunos isótopos como el uranio 235 y el deuterio (en forma de agua pesada), -- centró las investigaciones de un modo marcado hacia los años cuarentas, pero aún se lograron antes desarrollar métodos como el de difusión gaseosa (1920), por el mismo Aston que trabajo con neón; el de difusión térmica, cuya teoría había sido desarrollada desde 1911-17 por Chapman-Enskog y su sencilla implementación por Clusius y Dickel (1938) proveyó otro método de separación simple, aunque no muy eficiente y barato; por la misma época surgió la difusión másica, la cromatografía y la electromigración. -- métodos poco eficientes o bien específicos y convenientes

para otros isótopos diferentes de U-235 y agua pesada, y por é ello relegados al uso de laboratorio.

Los tensos y angustiosos años de la segunda guerra mundial, detuvieron la investigación pura y se aceleró - la aplicada, de tal manera que los días iniciales de la industria nuclear fueron parte de un programa de armas nucleares antes que de producción de energía: fue así como el interés se centró en uranio y en agua pesada como moderador.

Las plantas de difusión gaseosa para tratar uranio - tuvieron un éxito inmenso en comparación con los otros - métodos intentados en esa época. La escala a la que fueron construidas las plantas de enriquecimiento por difusión gaseosa para propósitos de defensa y la eficiencia - con la que estuvieron trabajando hicieron extremadamente difícil que otros procesos igualaran o superaran a las - plantas de difusión en términos del costo de producto.

La difusión gaseosa fue efectivamente el único método a escala de producción industrial disponible en el -- mundo durante los últimos 27 años.

Aún hoy día es el método número uno para enriquecer uranio, pero algunos otros métodos con mayor independencia de energía, tales como la centrífuga están marcando - nuevas posibilidades.

En cuanto al agua pesada, su obtención durante la - guerra se hizo por métodos electrolíticos (1943), cuyos - requerimientos de energía eléctrica lo hacen incosteable actualmente.

Los procesos de intercambio químico, aunque ya conocidos antes de 1943, no se habían implementado a escala industrial para agua pesada. Este es el proceso que actualmente se utiliza en su modalidad de $H_2S - H_2O$, mundialmente conocido como proceso (G-S). También se elucubró, por esas fechas, la destilación de hidrógeno, pero los problemas relacionados con la ingeniería de bajas temperaturas impidieron su desarrollo hasta 1960, fecha en la cual no resultó competitivo con el (G-S).

Muchos años de estudios posteriores a la guerra buscando un método más barato, han proporcionado nuevas posibilidades, pero las pequeñas unidades prototipo pueden -- producir errores en la interpolación a escala industrial, sobre todo en costos, aunque estos errores tienden a disminuir después de 30 años de experiencia en este campo.

Actualmente se puede considerar que existe una mejor evaluación de los costos reales que se involucran al trabajar algunos de estos procesos a escala industrial. Aún cuando gran parte de la tecnología de enriquecimiento es clasificada, se puede vislumbrar la factibilidad e importancia de algunos de ellos.

El que sea una información de baja disponibilidad es debido a su alto costo de desarrollo de tecnología.

Con esto, los nuevos procesos como la centrifugación gaseosa, que se vislumbró desde 1946-47 y se desarrolló en los 60's y en 1973-74 alcanzó su madurez industrial. - muestran su potencialidad para uranio; al igual que los procesos de separación por boquillas o nozzle que desde 1969 se desarrolla en Alemania y ya funcionan dos plantas piloto.

Surgieron otros procesos de tipo aerodinámico como: el proceso Vortex, el proceso Fenn, rayos moleculares cruzados, membrana jet; todos éstos con vistas de -- ser utilizados para uranio.

Pero hay un mayor interés por procesos de cierta novedad y sofisticación tecnológica, como son el de plasmas rotantes o centrífuga plásmica y el laser, ambos son lo suficientemente versátiles para obtener enriquecimiento de uranio y agua pesada y aún otros isótopos que empiezan a ser de gran importancia.

Estos últimos procesos y más aún el laser, son fuertemente investigados por el hecho de que son sistemas -- que tienen una gran participación en el desarrollo de la fusión nuclear controlada (8, 9, 10). Además la investigación de las propiedades y utilidad de otros isótopos -- han proveído pruebas de desarrollo en física cuántica, -- como por ejemplo, el helio -3 y helio -4 que han mostrado sus propiedades de super-fluidez y super-conductividad a pesar de que uno es un fermión y otro un bosón --- (11), en general, se puede vislumbrar que un desarrollo general de la ciencia en el campo de nuevos materiales -- está unido al proceso de separación isotópica.

El total mundial de ventas anuales de otros isótopos diferentes a U-235 y D, son menos de 5 millones de dólares.

La importancia de enriquecimiento isotópico para otros elementos no es muy notable en el presente, pero -- sus posibilidades de nuevos usos en investigación científica, en diagnóstico médica, en agricultura, pruebas ambien

tales y en tecnología, dependen de una fuente de obtención de bajo costo, que es básicamente el objetivo que se han planteado los investigadores de separación con laser.

Para dar una idea de la restricción que significan -- los costos involucrados, muestro a continuación una tabla de precios de algunos isótopos comúnmente utilizados en la actualidad:

<u>ISOTOPO</u>	<u>ABUNDANCIA NATURAL %</u>	<u>ENRIQUE- CIMIENTO %</u>	<u>PRECIO DOLS. USA/MOL (1975)</u>	<u>METODO</u>
D	0.015	99	1	Intercambio Químico
¹³ C	1.11	96	10 ³	Destilación
¹⁷ O	0.037	40	10 ⁵	Destilación
³⁴ S	0.042	90	6 x 10 ²	Destilación
³⁷ Cl	25	90	10 ⁴	Calutrón
⁴⁸ Ca	.185	95	10 ⁶	Calutrón
⁵⁷ Fe	2.19	90	2 x 10 ⁵	Calutrón
⁷⁹ Br	50	90	4 x 10 ⁴	Calutrón
¹⁹⁶ Hg	.15	48	10 ⁸	Calutrón
²³⁵ U	.75	3	10 ³	Difusión Gaseosa

Es evidente que se requiere una investigación extensiva para el desarrollo de métodos de separación para cual--quier elemento y utilizar el más óptimo de ellos; es pues, muy importante identificar aquellos isótopos que son de --gran valor en presente y cuales serán importantes en el futuro, como es el caso del deuterio, tritio y boro 11, los-isótopos de berilio, vanadio, carbono y litio cuyo papel -de combustibles, transmisores de calor, pantallas colecto--ras y material deflector es de utilidad primaria en la fu--sión nuclear, ampliándose con esto la importancia de los -procesos de separación isotópica a un corto plazo (20 años a lo sumo).

Otra alternativa de utilización de esta industria se--parativa, con un aprovechamiento de la técnica laser se --presenta con grandes ventajas en el tratamiento de desechos radiactivos:

Primero: es posible realizar un tratamiento remoto --por medio de la radiación laser, sin contacto directo con las partes principales del separador; reduciéndose los - -riesgos de radiación marcadamente.

Segundo: el tratamiento laser podría proveer una separación de múltiples propósitos para los elementos químicos, isótopos e isómeros nucleares simultáneamente. En consecuencia es posible aislar elementos radiactivos que no pueden--ser prácticamente separados por utilización de sus propie--dades físicas o químicas, y

Tercero: el laser puede producir, en principio, un --alto grado de concentración de cualquier elemento radiacti--vo.

Nuestro país está por implementar su industria nuclear, prácticamente obligado por los requerimientos y aspectos energéticos que plantea el futuro status del planeta, que hacen optimizar y utilizar todos los recursos disponibles en nuestro habitat.

Los problemas energéticos son serios y la relación del uso futuro de nuestros recursos en ese aspecto hacen cada vez más prioritario lanzarse a un campo de utilización óptima de ellos. En el caso particular de la energía nuclear es difícil empezar, pues el costo es realmente alto y ningún país podría actualmente desarrollar independientemente todos los procesos necesarios.

México no es la excepción: aunque cuenta con recursos naturales, los económicos y técnicos no están aún a su alcance.

Afortunadamente estos problemas son reconocidos mundialmente y algunas organizaciones tratan de hallar la solución óptima.

La industria de separación isotópica es sólo una de las requeridas en el ciclo de combustible, pero posiblemente sea la más importante en el desarrollo futuro de los ciclos de reactores de crianza o regeneradores y en el de producción de combustible para una planta de fusión termonuclear.

CAPITULO II

TEORIA DE LA SEPARACION ISOTOPICA

Aún cuando los métodos de separación de isótopos se han diversificado, la mayoría, salvo casos especiales, tienen el mismo fundamento teórico.

De acuerdo a esto se han desarrollado varios conceptos y relaciones especiales (12, 13, 14):

La unidad de separación.- Es el elemento más pequeño de una planta en el cual se efectúa la separación del material procesado.

Paso de cascada.- Es un grupo de unidades conectadas en paralelo, todas alimentadas a una misma concentración y que producen un producto parcial a una determinada concentración.

En algunos casos una unidad sirve como paso, pero cuando se trata de unidades de baja capacidad es necesario conectarlas en paralelo.

Factor de separación α .- Es el grado de separación lograda en un paso y se define para una mezcla de 2 componentes, como:

$$\alpha = E'/E'' \quad (1)$$

Donde $E' = \frac{X'}{1-X'}$, E' y E'' son relaciones de abundancia en las corrientes de producto y desecho respectivamente. X es la fracción átomo del isótopo de interés.

Por lo tanto α , también puede expresarse de la si---

guiente manera:

$$\alpha = \frac{x'(1-x'')}{x''(1-x')} \quad (2)$$

El factor de corte o número de corte.- Es la fracción de la alimentación que se extrae como producto, es decir - la relación de flujo: saliente de producto o cabeza L' a - flujo de alimentación a una unidad donde también existe un flujo de cola L'' ; así ϕ se expresa como:

$$\phi = \frac{L'}{L} \quad (3)$$

$$\text{o, } \phi = \frac{x-x''}{x'-x''} \quad (4)$$

Factor de separación de cabezas β .-

$$\beta = \frac{E'}{E} \quad (5)$$

que también sirve para medir el grado de separación alcanzado, aquí es la relación de abundancia en la alimentación.

De correlacionar α , ϕ y β se obtiene:

$$\beta^{-1} = \frac{(\alpha-1)(1-\phi)}{1+\phi(\alpha-1)(1-x')} \quad (6)$$

En una unidad se establecen tres corrientes:

- i) De alimentación, F , con composición x_f .
- ii) De cabeza o parcialmente enriquecida, P , con composición x_p .
- iii) De cola o parcialmente agotada, W , con composición x_w .

Estos seis parámetros son variables externas en una cascada.

Tipos de cascada:

a) Simple: la corriente de producto de un paso es la alimentación del siguiente y las colas no se reprocesan.

b) De recirculación a contracorriente: donde las colas si se reprocesan por su importancia económica.

Así la alimentación de cada paso es de la cabeza del paso inmediato inferior y las colas del inmediato superior

Estos flujos internos junto con su composición son variables internas.

Sección de enriquecimiento.- Es la parte de la cascada entre la alimentación y el producto.

Sección de agotamiento.- Es la parte entre alimentación y desecho en la cascada.

Haciendo un balance global (Fig. 1).

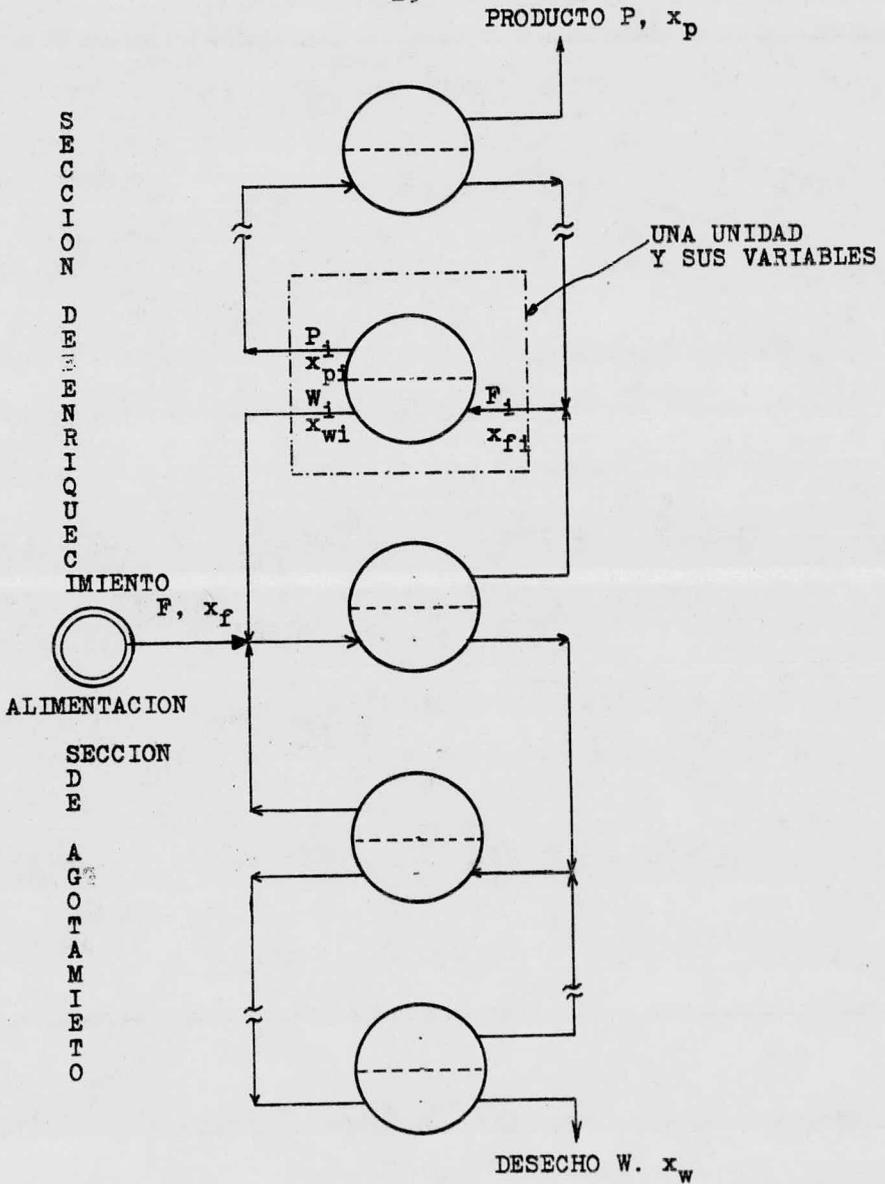
$$F = P + W \quad , \quad y \quad (7)$$

$$Fx_f = Px_p + Wx_w \quad (8)$$

$$o, \quad F = \frac{P(x_p - x_w)}{x_f - x_w} \quad (9)$$

$$y, \quad W = \frac{P(x_p - x_f)}{x_f - x_w} \quad (10)$$

Para las variables internas.- Considerando numeración de los pasos de abajo hacia arriba, siendo n el último superior y n_w el último de sección de agotamiento.



- FIGURA 1 -

a) Sección de enriquecimiento.

$$Ly_n - (L - P)x_{n+1} = Py_p \quad (11)$$

$$y_n = (1 - P/L)x_{n+1} + (P/L)y_p \quad (12)$$

b) Sección de agotamiento.

$$Lx_2 - (L - W)y_1 = Wx_w \quad (13)$$

L no es necesariamente constante, ya que puede variar de un paso a otro debido al cambio en el tamaño de los pasos, lo que a menudo se hace para aumentar la eficiencia de la cascada.

"Cascada cuadrada".- Cascada en la cual L es constante, al igual que el tamaño de los pasos.

Para mantener cualquier grado de separación en un paso o cascada, parte de la corriente de producto debe regresar como reflujo de la corriente que va en la dirección contraria. La relación de reflujo se define como producto-regresado sobre producto removido.

Si todo el producto se regresa, se trabaja a reflujo total, la relación L/P tiende a infinito. Cuando esto sucede, el número de pasos necesarios en la separación es mínimo, en estas condiciones:

$$y_n = x_{n+1} \quad (14)$$

que sustituida en (3)

$$\alpha = \frac{y_n(1 - x_n)}{x_n(1 - y_n)} = \frac{x_{n+1}(1 - x_n)}{x_n(1 - x_{n+1})} \quad (15)$$

la cual es cierta para cualquier valor de n.

Si multiplicamos para los N pasos de la cascada, nota remos que las relaciones mol de pasos adyacentes se cancelan y obtenemos:

$$\alpha^N = \frac{y_n(1 - x_1)}{x_1(1 - y_n)} \quad (16)$$

$$\alpha^N = \frac{y_p(1 - x_w)}{x_w(1 - y_p)} \quad (17)$$

Resolviendo para N:

$$N = \ln \frac{y_p(1 - x_w)}{x_w(1 - y_p)} \cdot \frac{1}{\ln \alpha} \quad (18)$$

La relación de concentraciones que aparece en el numerador suele llamarse "separación global de cascada", \mathcal{W} :

$$\mathcal{W} = \frac{y_p(1 - x_w)}{x_w(1 - y_p)} \quad (19)$$

De acuerdo a la ecuación (18) el número mínimo de pasos se incrementa conforme la separación global aumenta y alfa tiende a la unidad.

Entonces (18) se puede escribir, como:

$$N = \frac{1}{\Psi} \ln \mathcal{W} \quad (20)$$

donde $\Psi = \ln \alpha$ o $\Psi = (\alpha - 1)$ si α es cercano a la unidad

Para condiciones de reflujo mínimo:

$$y_{n+1} = y_n \quad (21)$$

por lo que,

$$(L/P)_{\min} = \frac{(y_p - y_n)(y_n + \alpha(1 - y_n))}{(\alpha - 1)y_n(1 - y_n)} \quad (22)$$

Y en términos de composición de las colas:

$$(L/P)_{\min} = \frac{y_p(\alpha x_{n+1} - x_{n+1}) - x_{n+1} \alpha}{(\alpha - 1)x_{n+1}(1 - x_{n+1})} \quad (23)$$

En caso que $y_n \ll 1$:

$$(L/P)_{\min} = \frac{y_p - y_n}{y_n} \cdot \frac{\alpha}{\alpha - 1} \quad (24)$$

Cascada ideal.- Existe el mínimo de flujos internos y mezcla de corrientes de diferente composición no existe, es decir:

a) El factor de separación de cabeza β permanece constante en todos los pasos.

b) Las corrientes de cabeza y cola que alimentan cada-paso tienen la misma composición:

$$x_{n+2} = y_n \quad (25)$$

Con estas condiciones $\beta = \sqrt{\alpha}$ siendo la propiedad clave de la cascada ideal. En los casos donde $(\beta - 1)$ y $(\alpha - 1) \ll 1$:

$$\beta - 1 = \frac{\alpha - 1}{2} \quad (26)$$

$$y, \quad \alpha = \frac{x_{n+2}(1 - x_n)}{x_n(1 - x_{n+2})} \quad (27)$$

Y resolviendo para los N número de pasos de la cascada bajo las condiciones de reflujo total:

$$N = \ln \frac{y_p(1 - x_w)}{x_w(1 - y_p)} \cdot \frac{1}{\ln \beta} - 1 \quad (28)$$

$$o, \quad N = 2 \frac{\ln \alpha}{\ln \alpha} - 1 \quad (29)$$

lo cual es exactamente el doble del número mínimo de pasos menos uno.

Para la sección de agotamiento encontramos:

$$N_w = \ln \frac{x_f(1 - x_w)}{x_w(1 - x_f)} \cdot \frac{1}{\ln \beta} - 1 \quad (30)$$

$$L_{ideal} = \frac{2 \alpha (x - x_w)}{\Psi x(1 - x)} \quad (31)$$

y en la sección de enriquecimiento:

$$N - N_w = \ln \frac{y_p(1 - x_f)}{x_f(1 - y_p)} \cdot \frac{1}{\ln \beta} \quad (32)$$

$$y, \quad L_{ideal} = \frac{4P(y_p - x)}{x(1 - x) \Psi} \quad (33)$$

De las ecuaciones de flujo ideal se observa que la relación de flujo es mas grande en el punto de alimentación y decrece gradualmente hacia los términos de la cascada.

El flujo total da una medida del tamaño de una planta y puede calcularse por la siguiente ecuación:

$$J = \frac{\beta + 1}{(\beta - 1) \ln \beta} (Pv_p + Wv_w - Fv_f) \quad (34)$$

El primer factor es una medida de la relativa facilidad o dificultad de separación, es grande cuando beta es cercana a la unidad y pequeña cuando difiere marcadamente.

El segundo factor es una medida de la magnitud del -- trabajo de separación y es proporcional al flujo total desalida: es grande cuando el producto y el desecho difieren sustancialmente en composición de la alimentación y pequeño cuando son cercanamente iguales, o sea, es una medida de la velocidad a la cual la cascada efectúa la separación.

La ecuación (34) expresada en función de α :

$$J = \frac{4}{(\alpha - 1)^2} (Pv_p + Wv_w - Fv_f) \quad (35)$$

donde:

$$v(x) = (2x - 1) \ln \frac{x}{1 - x} \quad (36)$$

$V(x)$ es el potencial de separación que es función única mente de la composición y es adimensional.

El trabajo realizado en una etapa sobre una alimentación determinada, debe ser independiente del contenido isotópico de dicha alimentación, por lo que podemos expresar dicho trabajo en otros términos:

$$\Delta U = \frac{L}{8} \Psi^2 \quad (37)$$

y el trabajo total realizado en toda la cascada será la suma de los trabajos de las etapas que la constituyen, por lo tanto:

$$AU_t = \frac{1}{8} \sum L_i \Psi^2 \quad (38)$$

El AU_t y por ello el costo de separación isotópica, es proporcional a la integración de L con respecto al número de pasos totales de la cascada:

$$AU_t = \frac{4}{\Psi^2} \int L d_n \quad (39)$$

En función de la composición:

$$AU_t = Pv(x_p) + Wv(x_w) - Fv(x_f) \quad (40)$$

Si las condiciones de una cascada se conocen, puede evaluarse el trabajo de separación y en consecuencia el costo de la planta; si el trabajo se trata como una propiedad constante de la cascada, puede representarse otra nueva cascada en función de otro conjunto de condiciones. Esto se mantiene cierto si bajo las condiciones de cambio, el número de unidades de separación en serie o paralelo son reorganizadas, de tal modo que se evite la mezcla de corrientes de diferente composición.

Con el trabajo de separación se encuentra el tamaño óptimo de cascada, cuando no existe costo de alimentación no se requiere sección de agotamiento; pero conforme aumenta el costo, es necesario, desde el punto de vista económico, extraer más cantidad del isótopo que nos interesa, siempre y cuando el valor del trabajo utilizado para ello no sea mayor que el valor del isótopo recuperado.

Debido a esto, para cada valor, costo de alimentación, C_f y costo de trabajo separativo C_s se establece un óptimo-

de recuperación, o lo que es igual, un valor óptimo de colas x_o .

En la figura (2), se muestra la contribución del trabajo de separación y de alimentación a los costos de producción y el tamaño de la sección de agotamiento en función de la composición de desecho. En la sección de enriquecimiento estos factores son independientes de la composición por lo que se obtiene un valor constante. De la figura, se obtiene la x_w óptima en donde se cruzan las curvas, éstos es a costos mínimos.

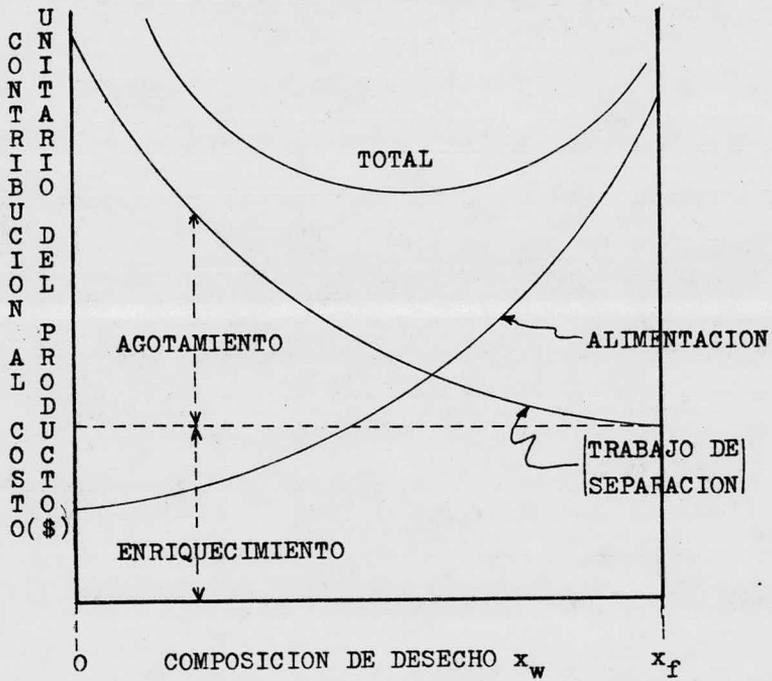
En muchas plantas el costo inicial es proporcional al trabajo de separación y los costos anuales de operación son proporcionales a la cantidad de trabajo efectuado durante el año. En tal caso, la inversión y operación de las cargas exclusivamente de la alimentación son SC_s , donde S es el trabajo separativo hecho en un año y C_s el costo de la unidad de trabajo separativo (UTS o SWU). Si F son las moles alimentadas por año y C_f su costo, el costo total anual está dado por:

$$C_t = SC_s + FC_f \quad (41)$$

Si P son las moles del producto a un costo C_p , este último puede calcularse:

$$C_p = C_f \frac{F}{P} + C_s \frac{S}{P} \quad (42)$$

Así por ejemplo: C_p es el costo de uranio con una concentración x_p en fracción mol de U^{235} ; C_f , el costo de unidad de uranio natural en forma de UF_6 ; C_s , el costo de la-



- FIGURA 2 -

unidad de trabajo separativo (UTS o SWU)

$$\frac{F}{P} = \frac{\text{Alimentación}}{\text{Producto}} ; \quad \frac{S}{P} = \frac{\text{Trabajo separativo}}{\text{Producto}}$$

Así para uranio al 3% en U-235, su $C_p = \frac{\$978.5 \text{ Dlls.}}{\text{Kg}}$ en 1977.

El costo de separación isotópica es de $\frac{\$100 \text{ Dlls.}}{\text{Kg UTS}}$ para U-235 y para agua pesada de $\frac{\$200 \text{ Dlls.}}{\text{Kg D}_2\text{O}}$ (A fines del 77)

En función del potencial de separación la ecuación anterior se transforma:

$$C_p = (v_p - v_f) - (x_p - x_f) \frac{v_f - v_w}{x_f - x_w} \quad (43)$$

Para una composición óptima en el desecho x_o , donde el costo unitario del producto sea mínimo es necesario que:

$$\frac{\partial C_p}{\partial x_w} = 0 \quad (44)$$

Si se conoce el costo de la alimentación C_f y el costo unitario del trabajo de separación C_s , la composición x_o está dada por la siguiente expresión:

$$C_f = C_s (2x_f - 1) \ln \frac{x_f(1 - x_o)}{x_o(1 - x_f)} + \frac{(x_f - x_o)(1 - 2x_o)}{x_o(1 - x_o)} \quad (45)$$

Por lo que el costo del producto en estas condiciones de composición puede calcularse:

$$C_p = C_s (2x_p - 1) \ln \frac{y_p(1-x_o)}{x_o(1-y_p)} + \frac{y_p - x_o(1 - 2x_o)}{x_o(1 - x_o)} \quad (46)$$

Esta es la "ecuación del precio teórico" y nos da el costo óptimo para obtener un producto a un enriquecimiento específico.

CAPITULO III

METODOS DE SEPARACION ISOTOPICA

Existen gran número de métodos de separación de isótopos; algunos de ellos sólo es posible utilizarlos en casos específicos, ejemplo son: la cromatografía y la electroforesis.

Analizar y describir cada uno de ellos es una tarea compleja y de gran desarrollo en términos temporales.

Debido a estos factores he centrado la atención en ca torce procesos o métodos de separación, cuya importancia es grande en relación al desarrollo de la industria nuclear.

Dentro de estos métodos se puede distinguir entre los procesos que se verifican a nivel industrial, como son: -- difusión gaseosa, centrifugación gaseosa y los experimentales o en fase de desarrollo: laser, plasma, Fenn, etc. -- (Ver tabla).

Clasificar estos métodos es difícil dentro de un marco riguroso dada la complejidad y variaciones que presentan, ya que no existe un criterio específico para clasificarlos; una aceptable forma es la siguiente:

- | | | | | |
|--|---|--------------------------|---|---|
| I.- PROCESOS
AERODINAMICOS | { | Difusión Térmica. | } | Procesos
Tipo
Chapman-
Enskog |
| | | Centrifugación Gaseosa. | | |
| | | Separación Sonda o | | |
| | | Proceso Fenn. | | |
| | | Separador Vortex. | | |
| | | Separación con Boquillas | | |
| | | o Nozzle. | | |
| | | Difusión Gaseosa. | | Proceso
Tipo
Interacción
Molecular |
| | | Proceso de Invasión o | | |
| | | Jet-Membrana. | | |
| | | Rayos Moleculares | | |
| | | Cruzados. | | |
| II.- PROCESOS QUIMICOS: | | Intercambio Iónico. | | |
| III.- PROCESOS DE DESTILACION. | | | | |
| IV.- PROCESOS ELECTROMAGNETICOS. | | | { | Calutrón y Aceleradores de |
| | | | | Partículas. |
| | | | | Plasma Centrifugo. |
| V.- PROCESOS ELECTROLITICOS. | | | | |
| VI.- PROCESOS LASER | | | | |
| VII.- REPROCESAMIENTO DE COMBUSTIBLE (QUIMICO - FISICO). | | | | |

Dentro de los procesos aerodinámicos se distinguen:

Procesos tipo Chapman-Enskog: por su relación del modo de separación, dependiente mayormente de propiedades estadísticas globales del gas.

Procesos tipo interacción molecular: por su relación directa como agente separativo de interacciones entre partículas.

El criterio utilizado para la clasificación está fundamentado, considerando el medio separativo utilizado, así para procesos aerodinámicos, es la dinámica de un gas dentro del proceso específico; en procesos químicos, la dinámica de un proceso de equilibrio; en electromagnéticos, la dinámica de una partícula dentro de un campo magnético, -- etc.

El reprocesamiento no es considerado un proceso de separación isotópica, pero bajo ciertas consideraciones que haré más adelante se explicará su aparición dentro de la clasificación.

CUADRO DESCRIPTIVO DE PROCESOS DE SEPARACION ISOTOPICA

<u>NOMBRE DE PROCESO</u>	<u>ALIMENTACION.</u>	<u>AGENTE DE SEPARACION</u>	<u>PRODUCTO</u>	<u>PRINCIPIO</u>	<u>EJEMPLO</u>	<u>REF.</u>	<u>STATUS</u>
Difusión Gaseosa	Gas	Gradiente de Presión, AP	Gas	Diferencia en flujo Knudsen a través de superficies porosas Tipo Chapman-Enskog.	U ²³⁵ F ₆ de U ²³⁸ F ₆	12, 33-41	Nivel industrial
Difusión Mésica	Gas	Vapor Condensable	Gas	Diferencia en difusividad Tipo Chapman-Enskog.	He de metano, Ne-22 Ar-36, C-13	12	En desuso
Difusión Térmica	Gas o Líquido	Gradiente de Temperatura, AT	Gas o Líquido	Diferencia en difusión térmica Tipo Chapman-Enskog.	U ²³⁵ F ₆ de U ²³⁸ F ₆	12, 15-19	Experimental, en desuso a nivel industrial
Por Boquillas o Nozzle	Gas	AP: Gradiente de Presión Δc: Por Fuerza Centrifuga	Gas	Arrastre de gas pesado por gas ligero, con expansión inducida por pared fija curva. Tipo Chapman-Enskog.	H ₂ -UF ₆ He-UF ₆	30-32	Nivel industrial
Fenn o Sonda	Gas	Gradiente de Presión. Origina Δc Direccional	Gas	Deflexión selectiva a alta velocidad con variación de densidad Tipo Chapman-Enskog.	U ²³⁵ F ₆ de U ²³⁸ F ₆	21, 27-29	Experimental en desarrollo

NOMBRE DE PROCESO	ALIMENTACION	AGENTE DE SEPARACION	PRODUCTO	PRINCIPIO	EJEMPLO	REF.	STATUS
Centrifugación Gaseosa	Gas	ΔP : Gradiente de Presión $\Delta \rho$: Por Fuerza Centrífuga	Gas	Dependencia de la masa en la fuerza centrífuga Tipo Chapman-Enskog.	U^{235}_{F6} de U^{238}_{F6}	12, 20-26	Nivel industrial
Vortex	Gas	Gradiente de Presión Origina $\Delta \rho$ Tangencial	Gas	Formación de tornado neumático Tipo Chapman-Enskog	U^{235}_{F6} de U^{238}_{F6}	27,28	Experimental en desarrollo
Rayos Moleculares Cruzados	Gas	Variación de Momentum de Inercia	Gas	Colisiones de desarrollo inercial posterior. Tipo Interacción Molecular	U^{235}_{F6} de U^{238}_{F6}	28	Experimental en desarrollo
Membrana Jet o Proceso de Invasión	Gas	Gradiente de Presión, Penetración Diferencial Isotópica dentro de la Estructura de un Jet	Gas	Expansión súbita por paso a través de barrera de choques produciendo separación selectiva. Tipo Interacción Molecular	U^{235}_{F6} de U^{238}_{F6}	29 43 21	Experimental en desarrollo
Electromagnético	Gas	Campo Magnético \bar{B}	Gas	Iones con misma carga pero diferente masa, se desplazan en función relativa a sus masas, dentro de un campo magnético	U^{235} de U^{238} Pu, Np casi todos los elementos.	12,15 57,58	Nivel medio industrial, hasta cantidades de investigación.

NOMBRE DE PROCESO	ALIMENTACION	AGENTE DE SEPARACION	PRODUCTO	PRINCIPIO	EJEMPLO	REF.	STATUS
Electrolítico	Líquido	ΔV : Diferencia de potencial	Líquido	Transferencia selectiva de iones por efecto electrocinético.	D_2O-H_2O	12	Escala industrial tienda a desuso por altos costos
					D_2-H_2 $HD-H_2$	44	
Destilación	Líquido	Diferencia de Volatilidad $\Delta \alpha_r$	Líquido	Diferencia en distribución fraccional en fases.	H_2O, H_2 CO_2 , Aire	12 49 50-56	Nivel industrial
Intercambio Químico	Gas o Líquido	Diferencia de Temperatura Intercambio Iónico por efecto de equilibrio	Gas o Líquido	Transferencia mutua de iones, de un compuesto a otro. Por estabilización energética del sistema.	H_2O-HOS H_2O-DCI H_2O-NH_3 UUV-UVI	12,15, 29 44-49	Nivel industrial
Plasma Centrifugo Electromagnético	Plasma o Gas Parcialmente Ionizado	ΔN : Diferencia de Densidad de Plasma por efecto Rotativo	Gas, Líquido o Sólido	Dependencia de la masa en un campo centrifugo. Rotación producida por fuerza Lorentz	xe, Ne UF ₆ , H ₂	59-70	Experimental, rápida expansión a nivel industrial o medio
Laser	Gas o Rayo Atómico	Inercial, por atracción Magneto-Eléctrico, cambio de Fase.	Gas Sólido Líquido	Diferencias en estructura electrónica que permite activar selectivamente un isótopo de interés	Para todos los elementos y sus isótopos	71-78	Planta piloto, experimental.

PROCESOS AERODINAMICOS TIPO CHAPMAN - ENSKOG

DIFUSION TERMICA

HISTORIA.

El fenómeno de difusión térmica fue predicho teóricamente en 1911 por Enskog, a partir de la teoría cinético - molecular y confirmado experimentalmente por Chapman en -- 1917.

Este efecto fue considerado como una curiosidad científica hasta 1938, cuando Clusius y Dickel desarrollaron - una columna de difusión, haciendo la separación isotópica con un equipo simple. En 1957 se reportaban varios trabajos de separación de isótopos de uranio y otros elementos - (15). En México se realizaron algunos trabajos y experimentos para obtención (a nivel experimental) de algunos isótopos como el Boro-10 (16, 17, 18).

FUNDAMENTO.

Cuando una gradiente de temperatura se establece en - una mezcla de composición constante, pequeñas corrientes - de difusión se establecen con uno de los componentes transportándose en la dirección del calor y otro en la dirección opuesta.

La mezcla que va a separarse se confina en un estrecho espacio anular entre dos tubos concéntricos verticales, el interno se calienta y el exterior se enfría.

El flujo de calor de la pared del tubo interno establece una ligera diferencia en el contenido debido al efecto de difusión térmica, con el isótopo ligero concentrándose en la zona caliente adyacente al cilindro interno. Al mismo tiempo, corrientes de convección se establecen con el gas caliente adyacente a la pared interna moviéndose hacia arriba y el gas frío adyacente a la pared externa moviéndose hacia abajo (Ver Fig. 3).

Este contraflujo multiplica la diferencia de concentración por difusión térmica simple y hace posible separaciones en una columna de longitud práctica.

Para máximo rendimiento la mezcla debe ser gaseosa y el gradiente de temperatura lo más alto posible.

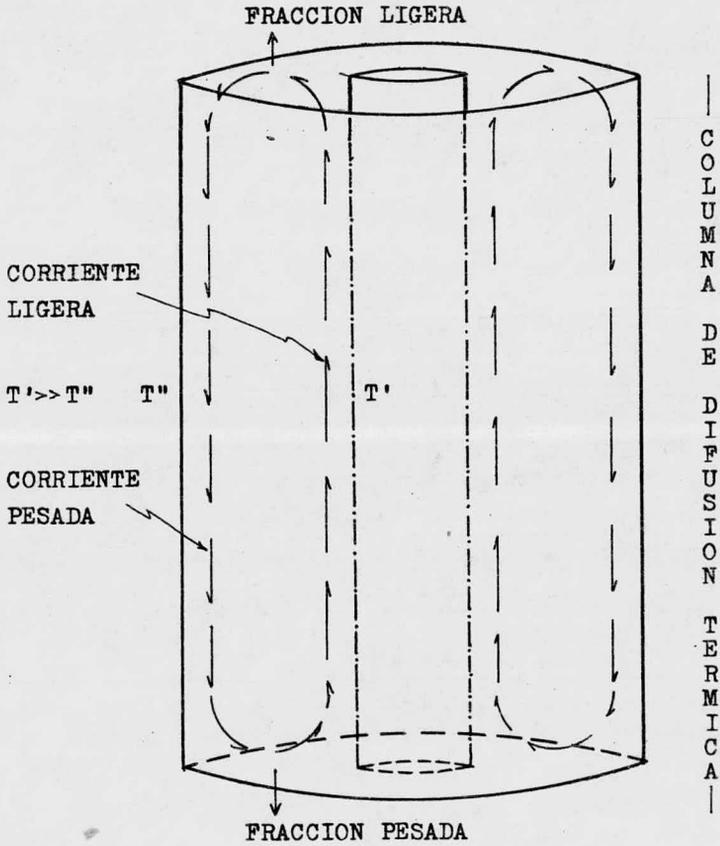
Para algunos gases estables la superficie caliente puede proporcionar un alambre calentado eléctricamente.

Las superficies caliente y fría deben estar lo más cercanas posible; generalmente la presión óptima de operación es cercana a la atmosférica, pero en gran escala se usan altas presiones. El factor de separación es mucho menor de uno. La eficiencia también es muy baja. Por este método, sin embargo, se han separado gran cantidad de isótopos (12)

En una mezcla de 2 componentes en reposo la velocidad de difusión molar del componente ligero esta dada por

$$N_1 = D_0 \rho \left[x(1-x) \frac{\gamma}{T} \frac{\partial T}{\partial r} - \frac{\partial x}{\partial r} \right] \quad (1)$$

donde, $-D_0 \rho \frac{\partial x}{\partial r}$, representa la velocidad de difusión ordinaria



- FIGURA 3 -

ria en la dirección opuesta al gradiente de la fracción -- mol $\partial x / \partial r$.

$D_0 e^{x(1-x)} \frac{\gamma}{T} \frac{\partial T}{\partial r}$ representa el componente adicional de la velocidad de difusión causado por la difusión térmica. Cuando $\frac{\partial T}{\partial r}$ es lo suficientemente grande el efecto de difusión térmica llega a ser el dominante y transporta el componente ligero a una región de alta concentración molar γ es la constante de difusión térmica de acuerdo a la teoría cinético molecular para mezclas isotópicas:

$$\gamma = \frac{105 M_2 - M_1}{118 M_1 + M_2} RT$$

Factor de separación: Si la ecuación 1 se integra para los límites x'' y T'' en la pared fría ($r = 0$) y x' y T' en la pared caliente ($r = d$)

$$N_1 d = D_0 e^{\left[\bar{\gamma} \bar{x} (1 - \bar{x}) \ln T' / T'' - (x' - x'') \right]}$$

donde $\bar{\gamma}$ y \bar{x} son valores promedio. Si x' y x'' son muy parecidos, se pueden sustituir por \bar{x} ; se define por consiguiente el factor de separación α :

$$\alpha - 1 = \left[\frac{x' - x''}{\bar{x}(1 - \bar{x})} \right]_{N_1=0} = \bar{\gamma} \ln \frac{T'}{T''}$$

Los valores de α son sumamente pequeños. Una completa explicación teórica fue dada por Furry y Jones (19).

IMPLEMENTACION.

La implementación es sumamente sencilla (16).

ASPECTO ECONOMICO

Método incosteable desde el punto de vista industrial. Se emplea aún para separar pequeñas cantidades para experimentos, pero se tiende a utilizar el proceso electromagnético para este fin. No hay datos sobre costos.

PROCESOS AERODINAMICOS TIPO CHAPMAN - ENSKOG

CENTRIFUGACION GASEOSA

HISTORIA

Este tipo de proceso se ha desarrollado desde los años cincuentas por J.W. Beams, Standard Oil Devel Co., y Westinghouse en USA; Groth, P. Harteck en Alemania (12).

En los años sesentas Inglaterra, RFA y Holanda demostraron su factibilidad económica (20). Francia la estudia desde 1966 y ha desarrollado cuatro generaciones de centrifugas (21). En 1973 la planta piloto alemana (Uranit), logró 25 TmUTS y la británica en Capenhurst 8 TmUTS.

En 1974, como parte del plan de Urenco-Centec (22), --alianza tecnológica entre RFA, Inglaterra y Holanda, se decidió construir una planta comercial, en un programa de -- 2000 TmUTS; actualmente debe de encontrarse en operación; -- para 1982 alcanzará los 2000 TmUTS y en 1985 deberán ser -- 10,000 TmUTS. EUA construye actualmente su planta.

FUNDAMENTO

Cuando un gas de peso molecular M y densidad molar ρ es sujeto a una aceleración centrífuga, $a = \Omega^2 r$, experimenta una fuerza: $M \rho \Omega^2 r$, por unidad de volumen, Ω es la velocidad angular y r el radio.

Bajo esta condición si consideramos un estrecho cilindro vertical rotando sobre su eje a muy alta velocidad angular y si una mezcla isotópica de gas se encuentra dentro --

del cilindro, el componente de peso molecular más alto se concentra en las cercanías de la pared interna del cilindro y la parte ligera hacia el centro del eje (Ver Fig. - 4).

Al moverse la corriente ligera hacia el centro del cilindro (su eje) axialmente y la corriente pesada también axialmente, pero en dirección contraria, se origina un gradiente de concentración, el cual si la máquina es lo suficientemente larga, dará una buena diferencia de concentración entre un extremo y otro.

El gradiente de presión establecido en el gas será:

$$\frac{dP}{dr} = M \rho \Omega^2 r = \frac{MP}{RgT} \Omega^2 r$$

que integrando para límites r' y r'' :

$$\frac{P''}{P'} = \exp \left[M \Omega^2 (r''^2 - r'^2) / 2RgT \right]$$

considerando una mezcla binaria en equilibrio:
para el componente ligero:

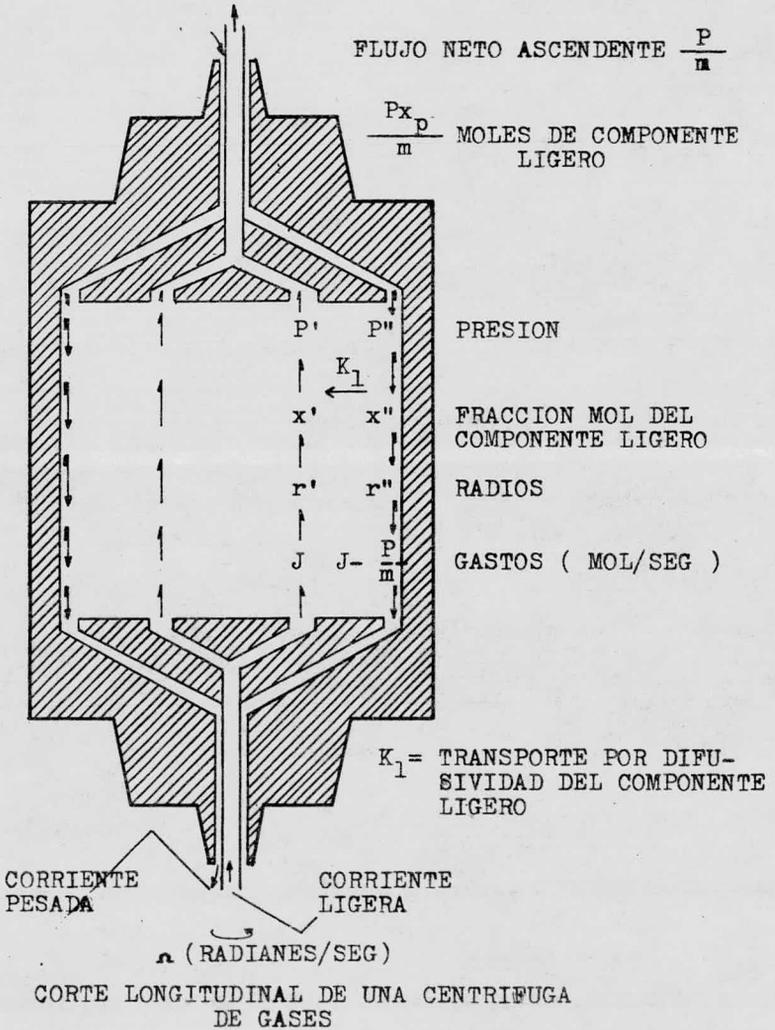
$$\frac{P''x''}{P'x'} = \exp \left[M_1 \Omega^2 (r''^2 - r'^2) / 2RgT \right]$$

para el componente pesado:

$$\frac{P''(1-x'')}{P'(1-x')} = \exp \left[M_2 \Omega^2 (r''^2 - r'^2) / 2RgT \right]$$

y por consiguiente:

$$\alpha = \frac{x'(1-x'')}{x''(1-x')} = \exp \left[(M_2 - M_1) \Omega^2 (r''^2 - r'^2) / 2RgT \right]$$



De acuerdo a investigaciones teóricas (23) de las propiedades separativas de la centrífuga de gas, en la cual un flujo a contracorriente es sostenido internamente, ya sea por medios térmicos o mecánicos, el factor de separación por etapa α y la energía o trabajo separativo se pueden expresar en función del número de corte o factor de corte ϕ y el gasto de alimentación F, como sigue:

$$\alpha - 1 = g \left[\frac{1 - \exp(-g \phi (1 - \phi) \Theta F)}{g \phi (1 - \phi) \Theta F} \right]$$

$$dU = \frac{1}{2} \frac{g}{\phi} \left[\frac{1 - \exp(-g \phi (1 - \phi) \Theta F)}{g \phi (1 - \phi) \Theta F} \right]^2$$

donde:

$$g = \frac{1}{\sqrt{2}} (a^2 R^2) (E)^{1/2} \frac{Z}{R} \frac{2m}{1+m^2}$$

$$a^2 = \Delta M \Omega^2 / 2RgT_0$$

$$CD = \sqrt{\frac{RgT_0}{\pi M / N_A \pi \sigma^2}}$$

$$\frac{1}{\phi} = \frac{1}{\sqrt{2}} (a^2 R^2) \sqrt{E} (2\pi CDR) m.$$

En estas expresiones, R es el radio del rotor, Z la longitud del rotor, ΔM la diferencia de masa entre $U^{238}F_6$ y $U^{235}F_6$; T_0 la temperatura; σ el diámetro de colisión de la molécula de UF_6 ; Rg constante de los gases y N_A el número de avogadro; M el peso molecular de UF_6 .

Los parámetros m y E que aparecen en la expresión para g y λ , representan el efecto de flujo interno y degradación del enriquecimiento debido al flujo en el rotor. -- Ambos parámetros dependen del perfil de velocidad axial del gas procesado en el rotor.

La eficiencia del flujo patrón E , requiere conocimientos de la forma del perfil de velocidad y el parámetro de recirculación m , de la magnitud y forma de la velocidad axial

Un análisis hidrodinámico del rotor nos da una predicción satisfactoria de m y E (24):

$$m = \frac{4A(A^2-1)^{1/2}}{3} \frac{\mu}{\rho_D} \frac{\Delta T}{T_0} \left(\frac{\Delta P}{\rho \mu} \right)^{1/2}$$

$$E = \frac{32}{A^4} \frac{\left(\left(\frac{1}{2}A^2 - 1 \right) \exp\left(\frac{1}{2}A^2 \right) + 1 \right)^2}{(A^2 - 1) \exp(A^2) + 1}$$

donde

$$A^2 = \left(\frac{\Omega R}{2RgT_0} M^{1/2} \right)$$

ν , $\frac{\mu}{\rho_D} = \text{No. Schmidt} \approx 0.75$ para UF_6

μ es la viscosidad.

P es la presión del gas en la periferia y ΔT la diferencia de temperatura entre el plato superior y el inferior

Tipos de cascadas: existen tres tipos diferentes, -- aplicables a enriquecimiento de uranio, la ideal, por pasos

y por pasos gradualmente disminuídos.

La cascada por pasos, originalmente diseñada para difusión gaseosa, debido a consideraciones económicas es la típica de pasos con 2 secciones, una de enriquecimiento y otra de agotamiento y el consiguiente flujo interetapa en cada paso en la sección de enriquecimiento y agotamiento.

La cascada de pasos disminuídos tiene una etapa especial en cada paso para "descuadrar" el flujo de interetapa en ese paso.

Para el caso de cascada en pasos, considerando N pasos en la sección de enriquecimiento y m pasos en la sección de agotamiento, da un producto de fracción mol x_p y el flujo P y el desecho con W y x_w , la alimentación F, x_f . El trabajo separativo de la cascada es S.

Los valores de diseño de las concentraciones de producto x_p , de desecho x_w y del trabajo separativo S están dadas por las condiciones límites de optimización.

El número de pasos en la sección de enriquecimiento y agotamiento están por consiguiente dadas. Bajo estas condiciones se encuentra la más eficiente cascada por pasos.

Haciendo un balance de material (Ver Fig. 5).

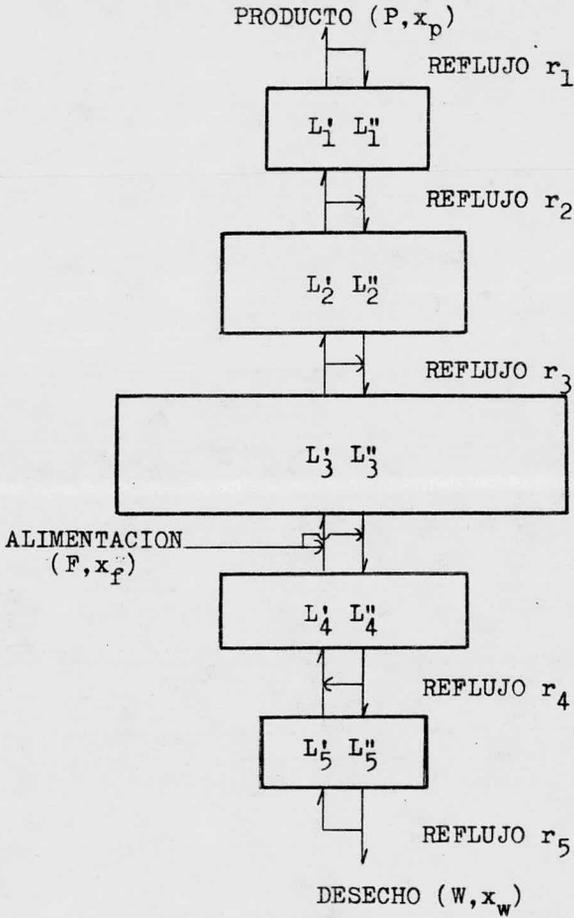
Total: $P + W = F$, en función de componente ligero:

$$x_p P + x_w W = x_f F$$

$$y \quad PV(x_p) + WV(x_w) - FV(x_f) = S$$

donde $V(x)$ es la función value:

$$V(x) = -\ln \frac{x}{x_f} + (x - x_f)/x_f$$



- FIGURA 5 -

DIAGRAMA ESQUEMATICO DE UNA CASCADE POR PASOS 3-2

Los gastos y razón de reflujo en cada paso esta dado por:

A) En la sección de enriquecimiento ($1 \leq i \leq n$)

$$L'_i = \frac{\theta_i}{2\theta_i - 1} P$$

$$L''_i = \frac{1 - \theta_i}{2\theta_i - 1} P$$

$$r_i = \frac{\theta_{i-1} - \theta_i}{2\theta_{i-1}\theta_i}$$

donde L'_i , L''_i y r_i son los gastos de salida, entrada y - reflujo de ese paso. El número hipotético de corte O_0 , es tá definido como $\theta_0 = 1$ para simplificación de cálculos.

B) en la sección de agotamiento ($n + 1 \leq i \leq n + m$)

$$L'_i = \frac{\theta_i}{1 - 2\theta_i} W$$

$$L''_i = \frac{1 - \theta_i}{1 - 2\theta_i} W$$

$$r_i = \frac{\theta_i - \theta_{i+1}}{(1 - \theta_i)(1 - 2\theta_{i+1})}$$

se define

$$\theta_{n+m+1} = 0$$

El flujo del isótopo deseado está dado por el balance

de materia entre 3 etapas sucesivas y es:

a) Para todas las etapas, excepto las limitantes:

$$G_{i,j} = \alpha_i \theta_i G_{i,j+1} + \frac{1-\theta_i}{\beta_i} G_{i,j-1}$$

Aquí, $G_{i,j}$ es el flujo deseado de isótopos en la j -ésima etapa en el i -ésimo paso.

b) En las etapas limitantes entre el $(i-1)$ -ésimo paso y el i -ésimo paso.

b-1) Sección enriquecimiento ($2 \leq i \leq n-1$)

$$G_{i-1,d_{i-1}} = (1-r_i) \alpha_i \theta_i G_{i,1} + \frac{1-\theta_{i-1}}{\beta_{i-1}} G_{i-1,d_{i-1}-1}$$

$$G_{i,1} = \alpha_i \theta_i G_{i,2} + \frac{1-\theta_{i-1}}{\beta_{i-1}} G_{i-1,d_{i-1}-1} + r_i \alpha_i \theta_i G_{i,1}$$

d_i , es el número de etapas en el i -ésimo paso.

b.2) Límites entre el enriquecimiento y sección de agotamiento ($i = n$ y $n + 1$)

$$G_{n,d_n} = \alpha_{n+1} \theta_{n+1} G_{n+1,1} + \frac{1-\theta_n}{\beta_n} G_{n,d_n-1} + r_f x_f F$$

$$G_{n+1,1} = \alpha_{n+1} \theta_{n+1} G_{n+1,2} + \frac{1-\theta_n}{\theta_n} G_{n,d_n} + (1-r_f) x_f F$$

Donde r_f es la relación del flujo alimentado a los fondos (la etapa d_n -ésima) del n -ésimo paso.

b.3) Sección de agotamiento ($n + 2 \leq i \leq n + m + 1$)

$$G_{i-1,d_{i-1}} = \alpha_i \theta_i G_{i,1} + \frac{1-\theta_{i-1}}{\theta_{i-1}} G_{i-1,d_{i-1}} - 1 + r_{i-1} \frac{1-\theta_{i-1}}{\theta_{i-1}} G_{i-1,d_{i-1}}$$

$$G_{i,1} = \alpha_i \theta_i G_{i,2} + (1-r_{i-1}) \frac{1-\theta_{i-1}}{\theta_{i-1}} G_{i-1,d_{i-1}}$$

Etapa superior y etapa de fondos:

$$G_{1,1} = \alpha_1 \theta_1 G_{1,2} + r_1 \alpha_1 \theta_1 G_{1,1}$$

$$G_{n+m,d_{n+m}} = \frac{1-\theta_{n+m}}{\theta_{n+m}} G_{n+m,d_{n+m}} - 1 + r_{n+m} \frac{1-\theta_{n+m}}{\theta_{n+m}} G_{n+m,d_{n+m}}$$

De esta manera se obtiene el conjunto de ecuaciones para $G_{i,j}$: El enriquecimiento de la j -ésima etapa en el i -ésimo paso $x_{i,j}$ será:

$$x_{i,j} = \frac{G_{i,j}}{L'_i + L''_i}$$

y particularmente para el producto y desecho será:

$$x_p = \alpha_1 x_{1,1}$$

$$x_w = \frac{x_{n+m, d_{n+m}}}{\theta_{n+m}}$$

En consecuencia, podemos obtener el contraste de producto y desecho, si el número de etapas d_i y el número de corte θ_i de cada paso esta dado.

El índice de bondad de la cascada es la eficiencia - para lograr una cierta cantidad de trabajo separativo, es decir, la cascada con el menor número de centrifugas es - la más eficiente entre las que tienen la misma capacidad de trabajo separativo. Se define la eficiencia de la cascada como

$$\eta = \frac{S}{N dU_{max}}$$

donde N y dU son el número de centrifugas en la cascada y el trabajo separativo máximo respectivamente.

$$\therefore U = (S - P |_{x_p - x'_p} \left| \frac{dV(x)}{dx} \right|_{x=x_p} - W |_{x_w - x'_w} \left| \frac{dV(x)}{dx} \right|_{x=x}) \cdot (N dU_{max}).$$

Aquí x'_p y x'_w son las concentraciones molares en el producto y en el desecho de la cascada que va ha ser optimizada.

El primer término en el paréntesis es el trabajo separativo hecho por la cascada y los términos siguientes -

expresan las cargas de penalidades cuando el contraste del producto y desecho se desvían de los valores de diseño.

Las técnicas de optimización de difusión no son aplicables a centrifuga. Para este caso el número de etapas no puede considerarse como variable continua, porque el factor de separación por etapas es relativamente grande. El número de centrifugas es una variable discreta. Existe un método de optimización el Complex Method (25).

De acuerdo a este método se obtuvieron los resultados que se observan en la siguiente tabla: (Pag. 47)

CARACTERISTICAS SEPARATIVAS OPTIMIZADAS

TIPO DE CASCADA	NUMERO TOTAL DE CENTRIFUGAS (RELATIVO)	PERDIDAS DE MEZCLADO TONUTS/AÑO	PERDIDAS DEBIDO A OPERACION NO IDEAL (TONUTS/AÑO)	EFICIENCIA DE CASCADA %
Ideal	100	-	-	100
Pasos	112.1	120.6	1.1	89.1
Pasos disminuidos	106.0	53.1	6.0	94.4

Trabajo separativo 1000 TonUTS/año
 Producto 177 Ton(U)/año, 4.0%
 Desecho 1231 Ton(U)/año, 0.25%
 Alimentación 1408 Ton(U)/año, 0.72%

IMPLEMENTACION

Este proceso es de tipo modular. Los requerimientos para el sistema de suplemento eléctrico son de alta integridad, motor de velocidad estable y ausencia de resonancia entre una centrífuga y otra. Hasta ahora se ha trabajadado con 6 tipos de centrífugas (20). Se requiere de una capacidad de producción de centrífugas muy grande; se debe trabajar a presión cercana a la atmosférica; el por--centaje de fallas debe ser muy bajo y se recomienda des--centralizar el control de manejo de operación y servicios auxiliares.

La tecnología puede estar pronto disponible. México no tiene la industria para implementar las partes de las centrífugas.

Los requerimientos de energía son altos, pero no --tanto como en difusión gaseosa.

ASPECTOS ECONOMICOS

En este tipo de plantas es posible aumentar su capacidad fácilmente dado su caracter modular, por ejemplo -aumentar capacidad en 300 TmUTS, el costo de inversión -va de 120 a 200 millones de dólares (1975) (26).

La inversión y costo de operación que no involucran energía son mayores que para difusión. Los costos de utilización de energía son menores en un factor de 2 a 3. - Los costos de procesamiento de uranio vienen siendo de -la mitad en relación a difusión gaseosa.

PROCESOS AERODINAMICOS TIPO CHAPMAN - ENSKOG

PROCESO FENN O SEPARACION SONDA (27, 28, 29)

Es de muy reciente desarrollo; en un tubo obtuso se inyecta una corriente de gas a velocidad supersónica, obligando al isótopo ligero a curvarse alrededor del tubo y el isótopo pesado es colectado en el mismo y bombeado hacia afuera a través de él (no se ha implementado). La relación de corte o separación es pequeña. Cálculos preliminares revelan altos costos (21).

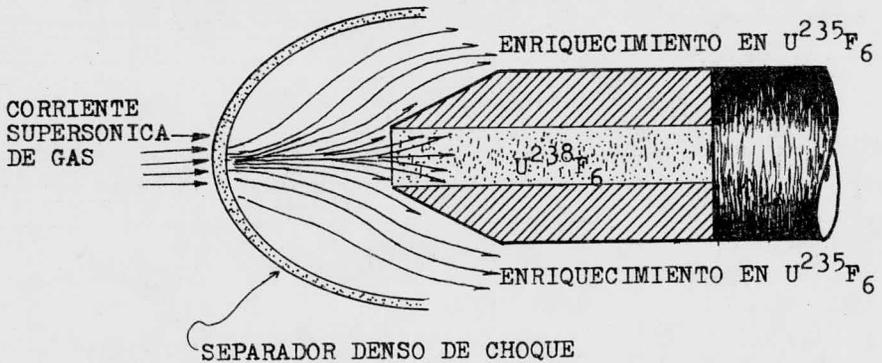
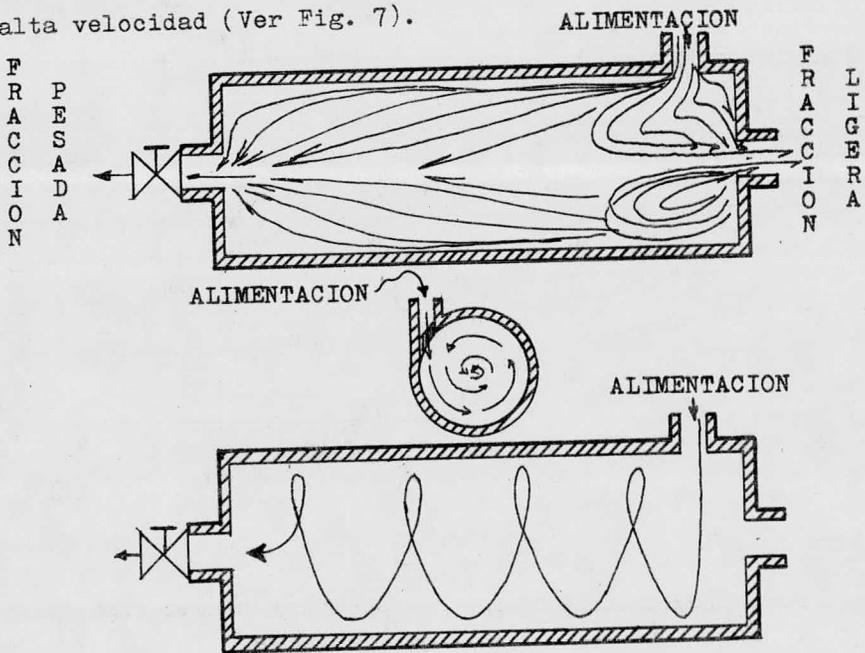


DIAGRAMA DE PROCESO FENN-SONDA

PROCESOS AERODINAMICOS TIPO CHAPMAN - ENSKOG

SEPARACION VORTEX (27, 28).

También es de reciente desarrollo; básicamente se induce la formación de un tornado neumático, así el flujo gaseoso se inyecta tangencialmente en un tubo desplazándose axialmente del centro, creándose un vórtice giratorio de alta velocidad (Ver Fig. 7).



VORTICE DE GAS

PROCESOS AERODINAMICOS TIPO CHAPMAN - ENSKOG

SEPARACION POR BOQUILLAS-NOZZLE.

HISTORIA

Método desarrollado íntegramente por Alemania (30) -- desde 1969; se ha implementado para uranio. Existen trabajando desde 1972 y 1974 dos plantas piloto en Karlsruhe, - Alemania. Actualmente se construye una planta a escala industrial (31). En 1975, Brasil adquirió derechos sobre este proceso (32).

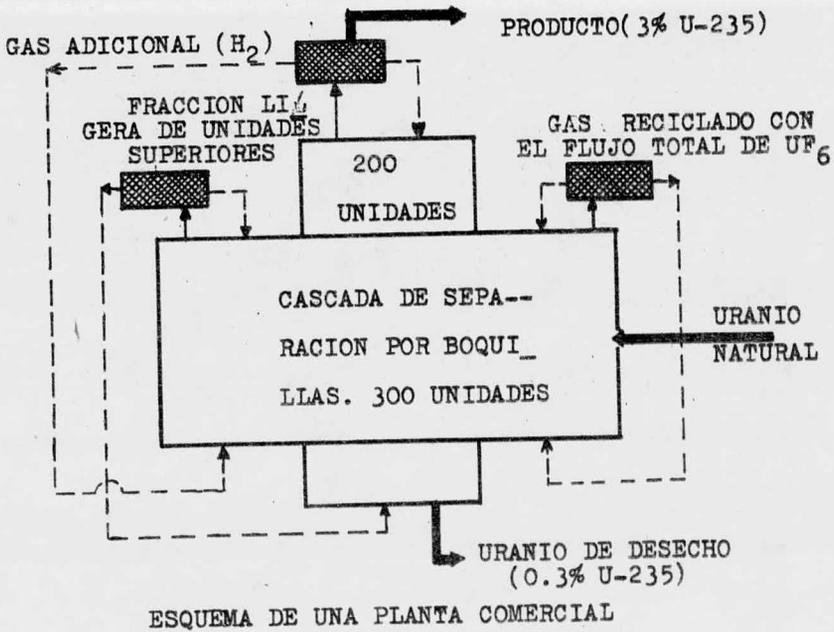
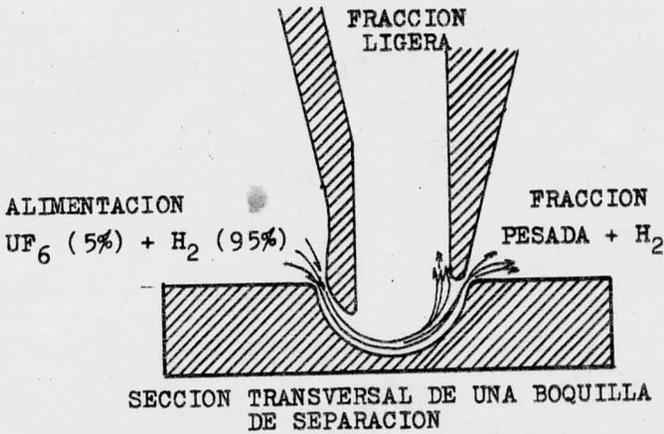
FUNDAMENTO.

UF_6 gaseoso, mezclado con un gas auxiliar ligero - -- (He o H_2) se expande a lo largo de una pared fija curvada, al final de la deflexión el flujo es dividido en una fracción ligera y una pesada por medio de un separador. (Ver - Fig. 8)

El gas auxiliar ligero que esta presente en exceso. - aumenta la velocidad del flujo de UF_6 y por consiguiente - incrementa la fuerza centrífuga que determina la separa---ción. En consecuencia, el gas ligero produce diferentes retardos en la sedimentación de los isótopos del UF_6 en el - campo centrífugo, lo cual tiene un efecto favorable sobre- la separación isotópica.

La descripción teórica aún no ha sido probada. El flujo es una complicada transición de régimen entre continuum y condiciones de libre molecularidad.

- FIGURA 8 -



Los cálculos de perfil de flujo revelan fuerte interacción entre flujo y procesos de difusión.

La optimización usando UF_6-H_2 como mezcla, se logró - variando: parámetros geométricos, presión y concentración.

VARIACIONES DEL METODO

En el proceso convencional, existen altos gradientes de velocidad en la región del flujo cercana a la pared. Esto produce pérdidas por fricción relativamente altas y efectos adversos sobre la fuerza centrífuga que determina la separación; esto se está tratando de evitar por acción de un flujo contrario de gas que provoque la deflexión y en consecuencia se reduce el trabajo de compresión, pero aumenta el volumen de succión. Este proceso puede ser más económico.

IMPLEMENTACION

Los componentes a escala industrial se han desarrollado y son relativamente fáciles de construir. En Alemania - la Steag Ag. Essen diseña y construye los prototipos desde 1970. Las dimensiones pequeñas aumentan la operación económica, por lo que se recurre a fotograbado para miniaturización de elementos de boquillas.

Se requieren 500 unidades de separación en serie para lograr enriquecimientos del orden del 3% en U-235 y desechos con 0.3%.

Cada etapa modular consta de un compresor de flujo radial en 2 fases y sello de gas dinámico (H_2). El material-

básico es acero inoxidable -tanques y tuberías- y algunas partes de aluminio, equipo sensible de detección y control de fugas y equipo de intercambio de calor.

Este proceso combina tecnología simple y un alto desarrollo potencial.

CONSIDERACIONES ECONOMICAS

Se calculan trabajos de compresión ideal específica - del orden de 2700 Kwh/UTS y un consumo específico de potencia de cerca de 4000 Kwh/UTS para una planta a escala industrial que enriquece uranio natural hasta 3% en U-235. - Esto lo coloca como competitivo respecto a difusión gaseosa.

PROCESOS AERODINAMICOS TIPO INTERACCION MOLECULAR

DIFUSION GASEOSA

HISTORIA

Fue descubierto experimentalmente por Graham; Maxwell demostró matemáticamente que este proceso se debía a la -- frecuencia relativa de colisión molecular.

En 1920, Aston, J. G., usó por primera vez este método con isótopos de neón; Hertz mejoró el método y con un proceso de 34 etapas construido después por Wooldrige, Jenkins y Smythe, se enriqueció $C^{13}H_4$ de 1 al 16%. Se desarrolló para uranio por H. C. Urey, J. R. Dunning, la Kellex Corporation y la Carbon Chemical Corporation durante los años cuarentas. Este método es el que actualmente se utiliza para enriquecer $U^{235}F_6$; sólo en EUA existen 3 plantas operando desde hace más de 20 años.

La industria de difusión gaseosa en EUA consiste de 7500 etapas de separación y una capacidad anual de --- 17.230,000 UTS y actualmente se incrementa en un 60% (33).

Otros países que tienen plantas de difusión son: --- URSS, Inglaterra, Francia y el consorcio Eurodif (34, 35).

FUNDAMENTO

Una mezcla isotópica es separada por acción de un flujo irreversible a través de una barrera o membrana, esto es, cuando la mezcla gaseosa se difunde a través de pequeños orificios de diámetro aproximadamente menores a la tra

yectoria libre media de las moléculas de gas.

Las moléculas con más bajo peso molecular, viajan -- más rápidamente y colisionan más frecuentemente con las -- paredes o la barrera, que las moléculas más pesadas.

Esto hace que la probabilidad de difusión de las mo-- léculas ligeras sea mayor a través de la barrera, creándo-- se una razón de flujo del componente ligero, mayor que la del componente pesado y se efectúa una separación parcial.

Como se ilustra en la figura 9, el flujo de UF_6 a -- través de una cascada de difusión, la alimentación de UF_6 con 0.72% en U-235 produce U-235 al 80% y desechos con -- 0.4% de U-235. Cada etapa incrementa la razón de U-235 a-- U-238 por solamente un 0.2%.

ASPECTOS TEORICOS

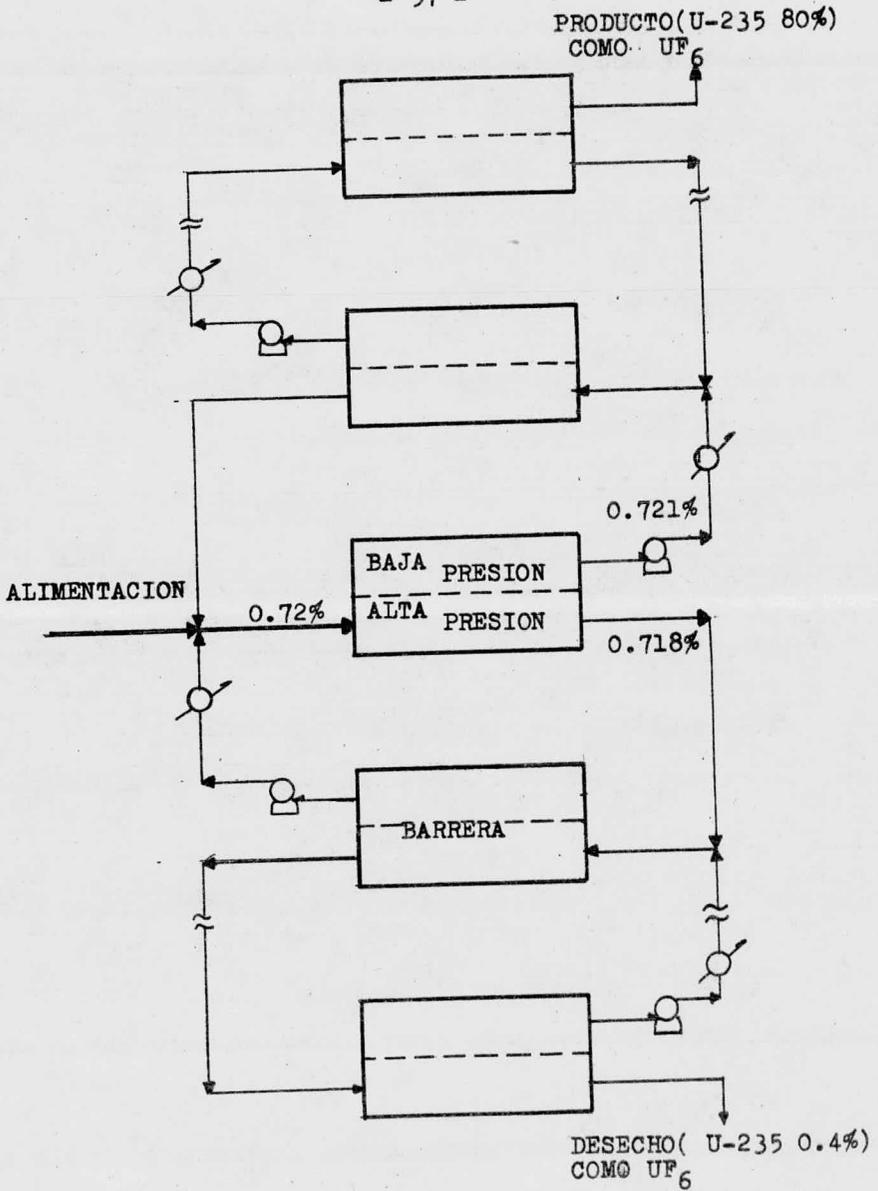
Si consideramos un flujo gaseoso a presión lo sufi-- cientemente baja para que las moléculas no colisionen en-- tre sí y se encuentran fluyendo a través de un capilar -- circular, este flujo será descrito por la ley de Knudsen:

$$N = 4/3 \sqrt{\frac{gc}{2TMRgT}} \frac{d}{l} (P'' - P')$$

donde:

N = Flujo molar del gas	d = Diámetro del capilar
M = Peso molecular	l = Longitud del capilar
T = °K	P'' = Presión de entrada
Rg = Constante universal de los gases	P' = Presión de salida

Si la presión del gas fuera aumentada, entonces el -



- FIGURA 9 -

número de colisiones entre moléculas será más probable y frecuente en el capilar; si la presión es lo suficientemente alta, las colisiones llegan a ser tan frecuentes -- que el flujo de gas tendrá un patrón laminar descrito -- por la ecuación de Poiseuille:

$$N = \frac{gcd^2(P''^2 - P'^2)}{32/\mu Rgt}$$

Como los poros de una barrera de difusión no son necesariamente de diámetro uniforme, se aproxima para:

Flujo molecular:

$$N = \frac{a(P'' - P')}{\sqrt{M}}$$

y para flujo laminar:

$$N = \frac{b(P''^2 - P'^2)}{\mu}$$

donde a y b son propiedades del medio.

En la región de transición, en la cual ambos flujos tienen lugar (36):

$$N = \frac{a(P'' - P')}{\sqrt{M}} + \frac{b(P''^2 - P'^2)}{\mu}$$

Para el caso de mezcla gaseosa con 2 componentes - (12); cuando P'' es baja P' tiende a cero y tiene lugar - flujo molecular, entonces P'/P'' → 0 y la velocidad molar - de cada uno de los componentes será:

$$N_1 = \frac{aP'' x''}{\sqrt{M_1}}$$

$$y \quad N_2 = \frac{aP^n(1-x'')}{\sqrt{M_2}}$$

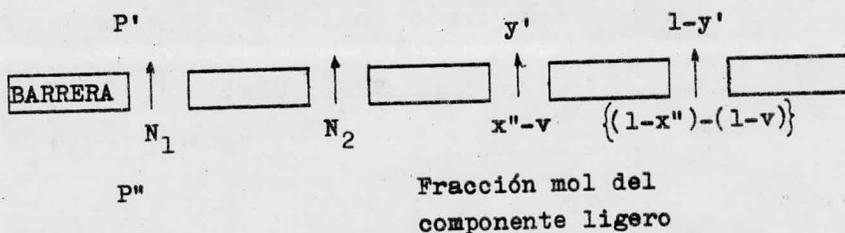
N_1 es el componente ligero.

La composición del flujo neto a través de la barrera en este caso es:

$$v = \frac{N_1}{N_1+N_2} = \frac{x''\sqrt{M_2/M_1}}{x''\sqrt{M_2/M_1}+(1-x'')}$$

$$\alpha_0 = \frac{v(1-x'')}{x''(1-v)} = \sqrt{\frac{M_2}{M_1}}$$

donde α_0 es el factor de separación ideal de la barrera.



La composición del gas a la entrada es $x_0 = \frac{v}{v+\alpha_0(1-v)}$; para el caso real P' no es despreciable y algo de flujo molecular tiene lugar de la corriente saliente hacia la entrante.

Parte del flujo a través de la barrera no es de separación dado la formación de flujo laminar. La resistencia a la transferencia de masa también reduce la separación.

Esta reducción en la separación está dada por:

$$Z = \frac{v - x''}{v - x_0}$$

$$Z = \frac{(v-x'') [v + \alpha_0(1-v)]}{(\alpha_0 - 1)v(1-v)}$$

que es similar a la eficiencia de Murphy en un punto.

Si se considera que P' y P'' son lo suficientemente bajas para que sólo exista flujo molecular, el flujo neto a través de la barrera será igual a la diferencia entre el flujo molecular del lado de entrada y el de salida.

$$N_1 = \frac{a}{\sqrt{M_1}} (P''x'' - P'y')$$

$$N_2 = \frac{a}{\sqrt{M_2}} (P''(1-x'') - P'(1-y'))$$

La composición del flujo neto será:

$$v = \frac{N_1}{N_1 + N_2} = \frac{\alpha_0(x'' - ry')}{\alpha_0 x'' + (1-x'') - r(\alpha_0 y' + (1-y'))}; \quad r = \frac{P'}{P''}$$

de donde:

$$x'' = \frac{v + r(\alpha_0 y' - \alpha_0 v y' - v + v y')}{v + \alpha_0(1-v)}$$

y la eficiencia de separación:

$$Z = \frac{1 - r \alpha_0 y'(1-v) - v(1-y')}{(\alpha_0 - 1)v(1-v)}$$

para el caso en que $y' = v$, entonces: $Z = 1 - r$.

Si se considera el efecto de no separación por formación de flujo laminar super-impuesto al flujo molecular, los flujos netos serán:

$$N_1 = \frac{a}{\sqrt{M_1}} (P''x'' - P'y') + \frac{b}{\mu} x''(P''^2 - P'^2)$$

$$N_2 = \frac{a}{\sqrt{M_2}} (P''(1-x'') - P'(1-y')) + \frac{b}{\mu} (1-x'')(P''^2 - P'^2)$$

La composición del flujo neto es:

$$v = \frac{\alpha_0(x'' - ry') + x''(P'' + P')(1-r)/P_c}{\alpha_0 x'' + (1-x'') - r(\alpha_0 y' + 1 - y') + (P'' + P')(1-r)/P_c}$$

$$r = P'/P''$$

$$P_c = \frac{\mu a}{b\sqrt{M_2}}$$

resolviendo para x''

$$x'' = \frac{v + v(P'' + P')(1-r)/P_c + r(\alpha_0 y' - \alpha_0 v - v + v y')}{v + \alpha_0(1-v) + (P'' + P')(1-r)/P_c}$$

y la eficiencia de separación:

$$Z = \left[1 - r \frac{\alpha_0 y'(1-v) - v(1-y')}{(\alpha_0 - 1)v(1-v)} \right] \left[\frac{v + \alpha_0(1-v)}{v + \alpha_0(1-v) + \frac{(P'' + P')(1-r)}{P_c}} \right]$$

Si

$$\alpha_0 - 1 \ll 1 \text{ y } y' = v: Z = \frac{1}{\frac{1}{1-r} + \frac{P'+P''}{P_c}}$$

Estas ecuaciones, sin embargo, no consideran colisiones ocasionales entre moléculas rápidas ligeras y moléculas lentas pesadas, que disminuyen el movimiento de éstas y la velocidad de las ligeras; el efecto de esto es P_c -- que es más pequeño que el dado por $P_c = \frac{\mu a}{b \sqrt{M_2}}$ y la eficiencia viene dada por:

$$Z = \frac{\int_0^{\pi''} \exp(1.430 \pi + 0.1142 \pi^2) d\pi}{\pi'' \exp(1.430 \pi'' + 0.1142 \pi''^2)}$$

donde

$$\pi = P/P_c$$

si $\pi' = 0$ y $\pi'' < 2$, se aproxima por:

$$Z = \frac{1}{1 + 0.662 \pi'^2 + 0.338 \pi''^2}$$

la cual es muy semejante a:

$$Z = \frac{1}{\frac{1}{1-r} + \frac{P'+P''}{P_c}}$$

que se reduce si, $P' = 0$ a: $Z = \frac{1}{1 + \pi''}$

Ambas ecuaciones son relativamente buenas para cálculos.

Generalmente, P_c es del orden de la presión a la cual la trayectoria libre media, λ , de la molécula de gas, es igual al diámetro de los poros de la barrera.

Considerando moléculas esféricas:

$$\lambda = \frac{16}{5P} \sqrt{\frac{RgT}{2\pi g_c M}}$$

Ahora, si consideramos que en una etapa la alimentación con una concentración x_f , es separada en una fracción ligera y , y en una pesada x , el factor de separación es:

$$\alpha = \frac{y(1-x)}{x(1-y)}$$

La eficiencia:

$$E = \frac{y-x}{y-x_0}$$

x_0 es la composición del lado de alta presión de la barrera en condiciones ideales.

$$y-x_0 = \frac{(\alpha_0-1)y(1-y)}{y+\alpha_0(1-y)}$$

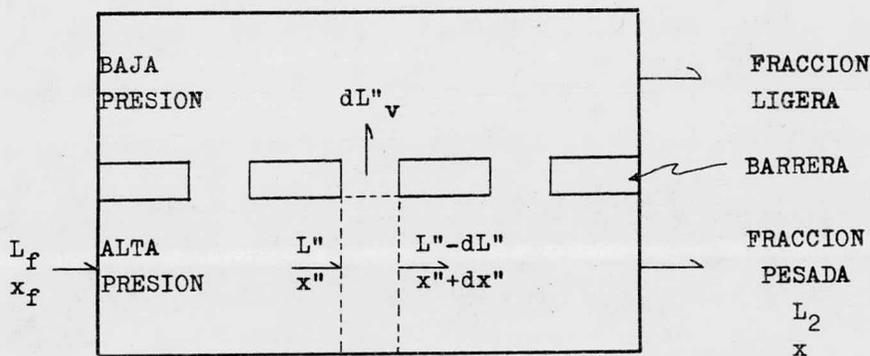
En caso de que $(\alpha_0-1) \ll 1$ y que y , x y x_0 sean sustancialmente iguales:

$$\alpha-1 = \frac{y-x}{x(1-x)} ;$$

$$E = \frac{y-x}{(\alpha_0-1)x(1-x)}$$

$$y \quad \alpha^{-1} = E (\alpha_0^{-1})$$

Cuando el gas de ambos lados de la barrera está bien mezclado, el gas del lado de alta presión tiene la misma composición que la fracción pesada $x'' = x$, al igual que - del lado de baja presión, la fracción ligera $v = y' = y$, - (Ver Fig. 10).



x_f , x'' , x , y , v : son la fracción molar del componente pesado.

Para estas condiciones: $Z = E$.

Cuando no existe mezcla en la dirección del flujo, - la fracción mol del componente ligero en el lado de alta presión x'' , decrece invariablemente de x_f en la entrada a x en la salida y su flujo L'' decrece de L_f a L .

Un balance de material del componente ligero en el - lado de alta presión se expresa como:

$$v dL'' = L'' dx'' - (L'' - dL'')(x'' + dx'')$$

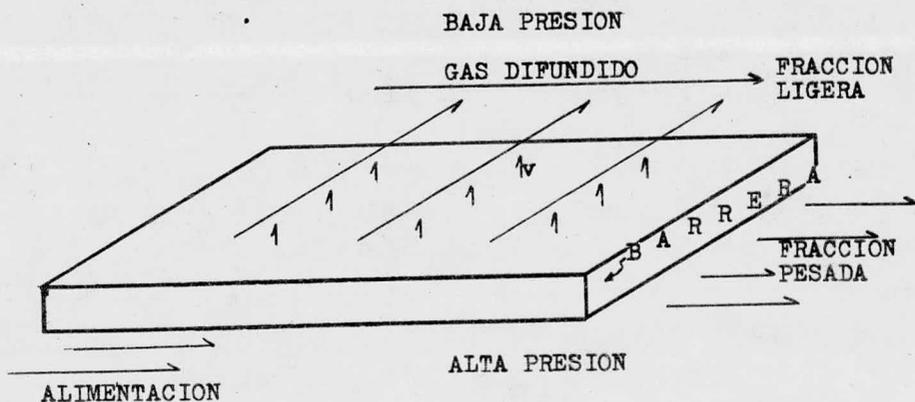
$$o, \quad L'' \frac{dx''}{dL''} = v - x''$$

si se considera separación cerrada:

$$v-x'' = Z(\alpha_0 - 1)x''(1-x'')$$

$$y, \quad L'' \frac{dx''}{dL''} = Z(\alpha_0 - 1)x''(1-x'') \quad (I)$$

en general Z dependerá de la composición del gas y' del lado de baja presión; pero si ($y' = v$) entonces Z es independiente de la composición; esto es posible cuando se tiene flujo cruzado con la dirección del flujo del lado de baja presión, en ángulo recto al flujo proveniente del lado de alta presión (Ver Fig. 11).



- FIGURA 11 -

Si integramos (I), para los límites $x''=x_f$ a $L''=L_f$ y $x'=x$ a $L'=L$, será:

$$x_f - x = Z(\alpha_0 - 1)x(1-x) \ln \frac{L_f}{L}$$

por balance total de la etapa con respecto al componente ligero:

$$\frac{y-x}{x_f-x} = \frac{L_f}{G}$$

por lo que

$$y-x = Z(\alpha_0 - 1)x(1-x) \frac{L_f}{G} \ln \frac{L_f}{L}$$

como consecuencia:

$$E = Z \frac{L_f}{G} \ln \frac{L_f}{L} = Z \frac{\ln |1-\theta|}{\theta}$$

donde $\theta = \frac{G}{L_f}$ = fracción difundida.

En una cascada de separación ideal por etapas, el flujo total del gas difundido J' es un medio del flujo total de interetapas, o

$$J' = \frac{4D}{E^2(\alpha_0 - 1)^2} = \frac{4}{(1.386)^2(\alpha_0 - 1)^2} \left[\frac{1}{1+P'/P''} + \frac{P'+P''}{P_c} \right]^2 D$$

D es el requerimiento de separación y $E=1.386Z$, si $\theta = 1/2$.

La capacidad total de compresión volumétrica C está dada por:

$$C = \frac{J' R_g T}{P'} = \frac{4 R_g T}{(1.386)^2 (\alpha_0 - 1)^2} \left(\frac{1}{1 + P'/P''} + \frac{P' + P''}{P_c} \right)^2 D \frac{1}{P'}$$

Las pérdidas de calor por flujo irreversible de gas a través de la barrera, de P'' a P' es:

$$Q = J' R_g T \left[T_0 \ln \frac{P'}{P''} \right] = \frac{4 R_g T_0}{(1.386)^2 (\alpha_0 - 1)^2} *$$

$$* \left[\left(\frac{1}{1 - P'/P''} + \frac{P' + P''}{P_c} \right)^2 \ln \frac{P''}{P'} \right] D$$

Todas estas ecuaciones son para el caso ideal, en el que:

$$\alpha_0 - 1 \doteq \frac{M_2 - M_1}{M_2 + M_1}$$

Las moles de gas fluyendo a través de una unidad de área de la barrera en la unidad de tiempo es:

$N = K(P'' - P')$, donde K es la permeabilidad de barrera.

El área total de barrera requerida para un flujo J', será:

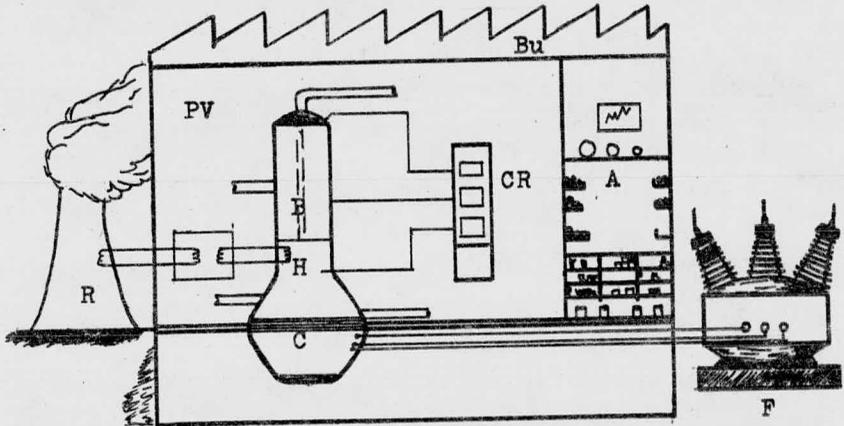
$$A = \frac{J'}{K(P'' - P')} = \frac{4D}{(1.386)^2 (\alpha_0 - 1)^2 K} \left[\frac{\left(\frac{1}{1 - P'/P''} + \frac{P' + P''}{P_c} \right)^2}{P'' - P'} \right]$$

CRITERIO	CAPACIDAD MINIMA DE COMPRESION	PERDIDAS MINIMAS	AREA MINIMA DE BARRERA
P'/P_c	0.500	0.000	0.000
P''/P_c	1.207	0.000	1.000
Factor de soporte para capacidad de compresión	$23.3/P_c$	∞	∞
Pérdidas	10.3	2.46	∞
Area	$16.5/P_c$	∞	$4/P_c$
Z Eficiencia de barrera	0.293	0.715	$4/P_c$

Existe una buena explicación teórica del proceso para cascadas en serie y paralelo (38).

IMPLEMENTACION

La unidad básica del proceso es una etapa. El principal componente de ésta es el difusor o convertidor, el cual contiene la membrana permeable o barrera, un compresor, una válvula de control, un enfriador de gas y un motor (Fig. 12).



- | | |
|-----------------------|--------------------------------|
| B: BARRERA | R: EYECTOR DE CALOR |
| D: DIFUSOR | PV: TUBERIA Y VALVULAS |
| C: COMPRESORA | CR: CONTROL-REGULACION |
| H: CAMBIADOR DE CALOR | F: DISTRIBUCION ELEC-
TRICA |
| Bu: EDIFICIOS | A: AUXILIARES |

Existen varios arreglos en serie (39) y se han implementado procesos de optimización (40, 41) para éstos.

Para minimizar los costos del trabajo separativo, se requieren etapas de gran escala en sus componentes.

Los tanques que contienen la barrera son de níquel--acero de 3.4 m de diámetro y 5.8 m de largo.

Compresor de tipo axial (peso de 16 toneladas) y movido por un motor de 1600 Kw.; ocho etapas deben formar una celda para optimizar costos, continuidad de operación y facilidad de mantenimiento.

Una celda es la parte más pequeña que puede ser aislada de la cascada. Todas las partes del proceso son aisladas dentro de cámaras para mantener la elevada temperatura del proceso. El tamaño y complejidad de la operación impone una demanda de alto grado de automatización, instrumentación y operación remota.

En 1946 en EUA, se requirieron 1100 empleados para operación y mantenimiento de sus plantas; ahora se requieren 1000 pero con alto grado de especialización y experiencia (33).

Es común en el proceso que se presenten casos de corrosión por efecto del agua y UF_6 .

El proceso tiene altos costos de bombeo, las membranas de difusión deben ser lo más granuladas posible y debe de hacerse la operación a presión subatmosférica; el consumo eléctrico por consiguiente es muy alto.

En México no se dispone de personal, ni equipo suficiente o compañías que implementen la planta; tampoco se dispone de la energía requerida por el proceso.

ASPECTOS ECONOMICOS

De acuerdo a datos disponibles (39):

COSTO DE COMPONENTES (EN EUA)

E L E M E N T O	% PRECIO UTS
Equipo de planta	43
Energía	35
Regalías e impuestos	15
Costos de operación, mantenimiento y gastos administrativos	6.5

Como se observa, el costo de enriquecimiento es fuertemente dependiente del capital de inversión y costo de energía.

Así tenemos (29) (1977), para difusión gaseosa, considerando una planta de 10^7 UTS/año, lo siguiente:

	TECNOLOGIA ACTUAL	TECNOLOGIA AVANZADA
I/UTS/año En francos	1050	1100
Kwh/UTS	2400	2100

El costo de separación es entonces de \$100/Kg UTS - para U-235 (42) (1977), y el costo de enriquecimiento para U-235 al 3% es de \$970.5/Kg (1977).

PROCESOS AERODINAMICOS TIPO INTERACCION MOLECULAR

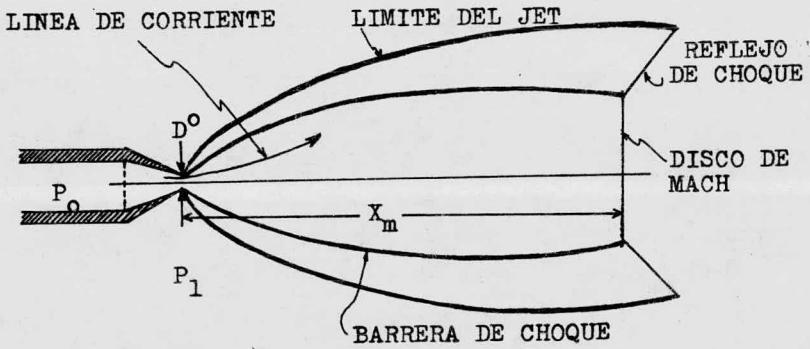
PROCESO MEMBRANA JET O PROCESO DE INVASION (29, 43, 21)

Sugerido por Dirac durante la segunda guerra y experimentalmente demostrado por Tahourdin y Oxford, de reciente-desarrollo (1969), la separación se logra por la penetra---ción isotópica diferencial dentro de la estructura de un --jet libre.

Cuando una mezcla de gas es introducida por una cámara de orificio y expulsada hacia afuera expandiéndose a través de la barrera de choque, el efecto de aspiración producido es particularmente marcado para la especie ligera; y una --mezcla enriquecida en especie ligera puede ser obtenida por recolección superficial en la barrera de choque del jet li-bre.

Este nuevo proceso es mucho más eficiente que el de di-fusión gaseosa. El sistema de onda de choque por subexpan--sión del jet libre, se logra cuando la presión de la cámara receptora es del orden de 10^{-2} a 1 torr (Ver Fig. 13). Se -puede decir que la economía de este método depende mayormen-te de la presión lateral baja.

Aunque aún se encuentra en etapa experimental, datos -preliminares revelan que el consumo de energía es ligeramen-te más alto que para difusión gaseosa. Se implementa para -uranio.

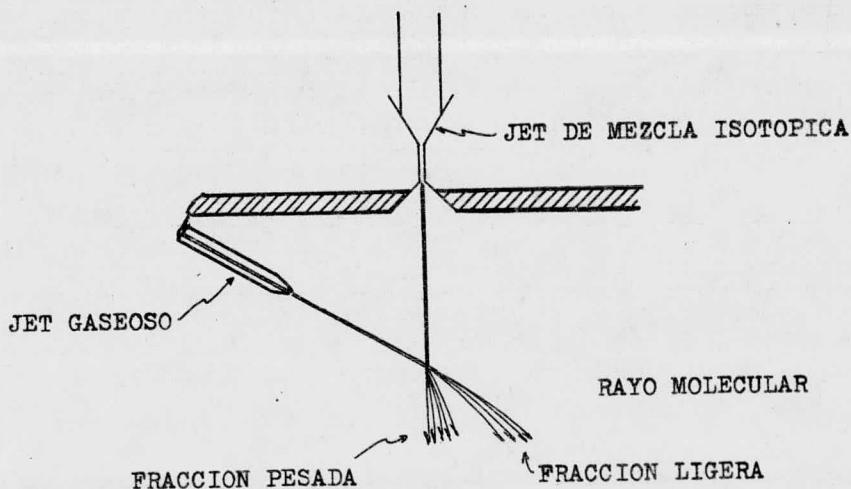


ESTRUCTURA DE SUBEXPANSION DE UN JET LIBRE

PROCESOS AERODINAMICOS TIPO INTERACCION MOLECULAR

RAYOS MOLECULARES CRUZADOS (28)

De reciente desarrollo, involucra colisiones de desarrollo inercial posterior: consiste en cruzar un rayo molecular con un gas jet de mezcla isotópica. El rayo molecular desvía la fracción ligera en un ángulo diferente de la fracción pesada. (Ver Fig. 14)



- FIGURA 14 -

PROCESOS QUIMICOS

INTERCAMBIO QUIMICO

HISTORIA

En 1943 en Estados Unidos se implementó por primera vez un proceso de intercambio químico a nivel industrial para obtención de agua pesada. El proceso es el de intercambio $H_2O - H_2S$. La compañía implementadora es la Girdler, por lo que después conoce el proceso como (G-S). Al mismo tiempo en Alemania la Geib desarrollaba este proceso.

En 1960, Barr F. y Drews W. (44) analizaron 98 procesos potenciales de tipo intercambio químico para obtención de deuterio. Aún cuando la mayor parte de la investigación de este método se centró en agua pesada, otros isótopos de elementos ligeros fueron separados por este medio (12, 15), por ejemplo N_2 , B, Li, O_2 . Este proceso parece no ser económico para elementos más pesados; sin embargo, recientemente se han hecho esfuerzos con uranio en sistemas de UIV -UVI en Francia, Australia y Japón (29, 45, 46). Ninguno parece ser aún económico aunque Kakihana, et al (47), del Japón han presentado costos estimados del orden de 1/10 del de difusión.

Actualmente el proceso (G-S) es de preponderancia, da da la importancia de requerimientos mundiales de D_2O . En México se han hecho algunos estudios para implementar un proceso de intercambio. En otros países se hacen estudios tendientes a mejorar el método (G-S) y aún Canadá, que representa el 90% de la producción mundial de D_2O , ha inicia

do estudios para otros procesos.

FUNDAMENTO

Cualquier reacción que involucre especies isotópicas del mismo elemento genera un intercambio entre pares de compuestos isotópicos del tipo:



donde A y D son isótopos del mismo elemento. por ejemplo:



El proceso de intercambio, por lo tanto, implica que la relación de isótopos al equilibrio en un par de compuestos isotópicos ($A_m B_n$, $A_r D_s B_t$ o H_2O , HDO para nuestro ejemplo), difiera de la relación en el otro par ($A_o D_p C_q$, $A_v C_u$ o HDS , H_2S).

Cuando estos dos pares son llevados a contra corriente (uno con respecto al otro), la separación de la especie D respecto a la A se logra.

De acuerdo con el estado físico de las parejas isotópicas el proceso se puede presentar en las siguientes modalidades:

- i) Intercambio Gas-Gas.
- ii) Intercambio Gas-Líquido
- iii) Intercambio Líquido-Líquido
- iv) Con resinas de intercambio iónico (Sólido-gas o sólido-líquido).

Además pueden ser de 2 tipos, de acuerdo a las condiciones de operación:

1.- De simple intercambio químico: transferencia de la especie D, a otro compuesto a temperatura constante.

2.- De intercambio bitérmico: un segundo intercambio se lleva a cabo a una temperatura diferente del primer intercambio, con una constante de equilibrio diferente.

Para este proceso el factor de separación:

$$\alpha = K \frac{(D/A) \text{ producto}}{(D/A) \text{ desechos}}$$

siendo K la constante de equilibrio; D el isótopo que se enriquece y A la otra especie isotópica del mismo elemento, siendo D/A la relación atómica.

En el proceso de intercambio simple un reflujo debe ser establecido, con el objeto de lograr la conversión química, tal como HDO a HD por electrolisis; sin embargo, para otro tipo de reacciones el reflujo es sumamente costoso, por ejemplo: en la reacción de intercambio $\text{NH}_3\text{-H}_2$, el reflujo tendría que ser disociando amoníaco enriquecido en hidrógeno. Para eliminar este costoso reflujo, Harteck, Suess y Spevack (12) sugirieron el proceso de intercambio bitérmico, en el cual el reflujo es producido por un segundo contactor de intercambio operando a diferente temperatura del primero, con un factor de separación diferente.

En el proceso bitérmico, la razón del factor de separación a baja temperatura al de alta temperatura: $\frac{\alpha \text{ baja } T}{\alpha \text{ alta } T}$ da una medida de la facilidad de la separación; cuando sea mucho mayor de la unidad, será menor el número de etapas requeridas.

REACTIVOS		PRODUCTOS		$\frac{\alpha}{K}$	FACTOR DE SEPARACION α					$\frac{\alpha_{25}}{\alpha_{100}}$
LIQ	GAS	LIQ	GAS		0°C	25°C	100°C	125°C	227°C	
H ₂ O	+ NH ₂ D	⇌ HDO	+ NH ₃	3/2	1.02	1.00	0.99	0.98	1.01
H ₂ O	+ HDS	⇌ HDO	+ H ₂ S	1	2.52	2.39	1.92	1.22
H ₂ O	+ DCl	⇌ HDO	+ HCl	1/2	2.87	2.51	1.98	1.87	1.59	1.27
NH ₃ (g)	+ HD	⇌ NH ₂ D(g)	+ H ₂	2/3	4.56	3.88	2.73	1.43
H ₂ O	+ HD	⇌ HDO	+ H ₂	1	4.69	3.87	2.69	2.47	1.94	1.44



El proceso (G-S) es un ejemplo de intercambio bitérmico; el agua pesada es concentrada (48) por contacto de H_2O y H_2S , el agua natural se alimenta a una sección fría de la torre (Ver Fig. 15) y es enriquecida en deuterio por un flujo contrario de H_2S (vapor); esta agua enriquecida fluye a través de la sección caliente de la torre donde su deuterio es transferido al gas circulante, esta agua sale con un contenido de deuterio menor en un 20% al de alimentación.

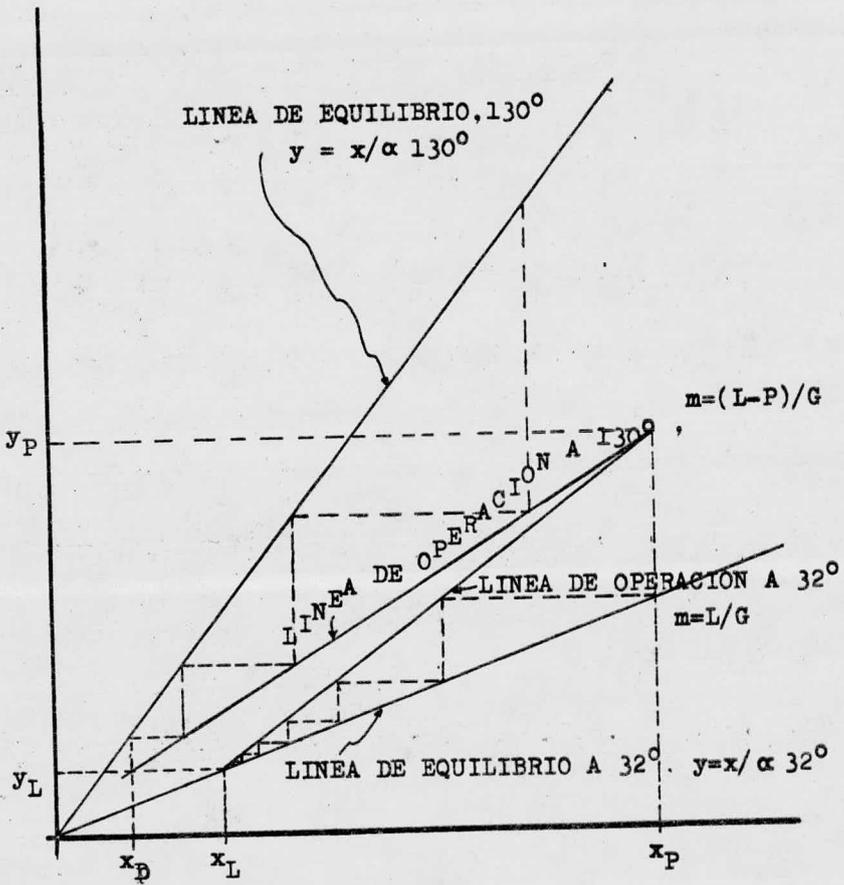
Los enriquecimientos máximos ocurren en la unión de la zona caliente y fría, donde una corriente enriquecida es alimentada a una etapa superior y convertida en una corriente empobrecida saliente de esa etapa.

La corriente de proceso conecta una etapa con la próxima etapa superior que puede ser gas, líquido o ambos. Este proceso se repite por varias etapas hasta que se logra un 20% de enriquecimiento. El enriquecimiento final se alcanza por destilación.

El principio de este proceso es ilustrado por el diagrama de McCabe Thiele (Fig. 16) el espacio de las líneas de equilibrio a $32^{\circ}C$ y a $130^{\circ}C$, hacen posible la separación.

La pendiente de la línea de operación en la zona fría de la torre es L/G , la razón del flujo de agua alimentada al flujo de H_2S gaseoso.

La pendiente de la línea de operación en la parte caliente de la torre es de $(L-P)/G$, donde P es la cantidad perdida por transferencia. Dado que el contenido de deute-



- FIGURA 16 -

rio en el agua y en la corriente de H_2S en la unión de las zonas fría y caliente es la misma $x_p = y_p$, ambas líneas de operación terminan en un punto común en la parte superior-derecha.

Como la cantidad de deuterio en el H_2S saliente de la parte fría de la torre (y_L), es la misma que el contenido de la corriente que entra a la parte caliente, la parte final de ambas líneas está en el mismo valor de y_L .

La determinación del número de platos, dimensiones, - número teórico de unidades de transferencia, altura de unidad de transferencia, eficiencia, diámetro y espesor, son procesos de cálculo bien conocidos y no requieren de desarrollo ulterior (49).

Otros procesos de intercambio que se investigan para obtención de D_2O son:

NH_3-H_2 ; Amina- H_2 ; H_2-H_2O ; H_2 /agua-hidrazina; fosfina-agua; $HI-H_2O$.

En México se han presentado algunas proposiciones con NH_3-H_2 , utilizando gas natural como fuente de hidrógeno -- (14).

Otros isótopos son separados según las siguientes reacciones.

	T, °K	FACTOR DE SEP α	
		exp	Teórica
$1/2CO_2^{16} + H_2O^{18}(l) \rightleftharpoons 1/2CO_2^{18} + H_2O^{16}(l)$	273.1	1.046	1.044
$N^{15}H_3 + N^{14}H_4^+ \rightleftharpoons N^{14}H_3 + N^{15}H_4^+$	298.1	1.034	1.035
$N^{15}H_3 + N^{14}H_3(aq) \rightleftharpoons N^{14}H_3 + N^{15}H_3(aq)$	298.1	1.006	
$HC^{12}N + C^{13}N^- \rightleftharpoons HC^{13}N + C^{12}N^-$	295	1.026	1.030
$HCN^{14} + CN^{15-} \rightleftharpoons HCN^{15} + CN^{14-}$	295	1.000	1.002
$C^{12}O_3^- + C^{13}O_2 \rightleftharpoons C^{13}O_3^- + C^{12}O_2$	273.1	1.017	1.016
$1/3CO_3^{16} + H_2O^{18} \rightleftharpoons 1/3CO_3^{18} + H_2O^{16}$	273.1	1.036	1.033
$HC^{12}O_3^- + C^{13}O_2 \rightleftharpoons HC^{13}O_3^- + C^{12}O_2$	298.1	1.014	
$S^{34}O_2 + HS^{32}O_3^- \rightleftharpoons S^{32}O_2 + HS^{34}O_2^-$	298.1	1.019	
$S^{36}O_2 + HS^{32}O_3^- \rightleftharpoons S^{32}O_2 + HS^{36}O_3^-$	298.1	1.043	

IMPLEMENTACION

Este método es de fácil implementación, la tecnología es conocida, tenemos fuentes de materia prima adecuadas, - el material de construcción primordial es acero inoxidable, aluminio y aún acero al carbón; necesita de una buena instrumentación y puede que se requiera un catalizador.

ASPECTOS ECONOMICOS

Para el proceso de intercambio químico se desarrolló un método de comparación económica en función de parámetros de recuperación: sección transversal húmeda y sección transversal seca, desarrollado por Barr y Drews (44).

Como el proceso de interés desde el punto de vista -- práctico es el G-S, haré referencia a él.

El costo de obtención de D_2O por proceso G-S es de --
= \$120/Kg (1978) y se piensa alcance costos de = \$200/Kg a fines de 1980 (48).

De este costo se estima que el 60% corresponde a variaciones del capital, 24% a energía y 15% a operación y mantenimiento.

Requiere de un factor de enriquecimiento global de --
 3×10^6 (considerando concentraciones de deuterio de --
0.015% en agua natural hasta un producto de 99.8%). El consumo de energía en plantas canadienses es de 9MWh/Kg D_2O .

La Gulf Research and Development, investigó proceso de obtención a partir de gas natural, pero el consumo de energía es 2 veces mayor que el de G-S.

Respecto a obtención de U-235 a un 3%, los cálculos de energía específica estimada son del orden de 1100 --
Kwh/swu. No parecen ser aún económicos.

PROCESOS DE DESTILACION

HISTORIA

Urey, Brickwedde y Murphy, separaron deuterio en 1932 por destilación fraccionada de hidrógeno. A pesar del temprano indicio de utilidad, no se empleó a escala industrial por las bajísimas temperaturas de operación (50). Aunque en 1943, este proceso era económico no se llevó a cabo por problemas de ingeniería, sino hasta 1960 en que se implementó como planta parásita experimental en una de NH_3 , pero con un proceso anterior de intercambio químico (51). -- En Alemania, también en 1943, Clusius y Starke así como la Compañía Linde demostraron su factibilidad.

En México se hicieron algunas vistas teóricas para su posterior implementación (52, 53, 54).

Para evitar la problemática de la destilación de H_2 , se utilizó H_2O para obtener el agua pesada requerida como moderador; durante la segunda guerra fue el método utilizado por el proyecto Manhattan.

También por destilación se han obtenido C-13, N-15, O-18, B-10, He-3, y algunos más. Sin embargo, los consumos de energía son muy elevados.

Actualmente la destilación se utiliza para completar la separación de agua pesada de la ligera, después de su enriquecimiento por intercambio químico hasta el 20% (Proceso G-S).

FUNDAMENTO

Bien conocido es el método de destilación, como la separación de los componentes de una solución mediante la di

ferente distribución de estos componentes en la fase gas y la fase líquida, de acuerdo a sus volatilidades relativas. Así, el más volátil se concentra en la fase gas y el menos volátil en la fase líquida.

Existen varios métodos de cálculo para torres de destilación, así como de rehervidor y condensador, pero son rutinas de cálculo bien conocidas (49).

DESTILACION DE HIDROGENO

Para el caso especial de destilación de hidrógeno, se propuso una técnica llamada de flujo extendido, desarrollada por Clusius y Starke (12, 50). El hidrógeno natural conteniendo 0.028% de HD se lleva a presión ligeramente mayor que la atmosférica y es enfriado a su punto de rocío - - - (22.05°K) y alimentado a la torre de destilación primaria; en esta torre, el destilado es H_2 casi libre y fondos conteniendo de 5 a 10% de HD. Los fondos se alimentan a la -- parte superior media de una torre secundaria, donde los -- fondos obtenidos son HD casi puros.

El HD es calentado y pasado a través de un reactor de intercambio catalítico, donde se desproporciona en una mezcla de equilibrio de H_2 , HD y D_2 catalizada.

El producto de la reacción de intercambio es enfriado a temperatura de hidrógeno líquido en un cambiador de ca--lor y alimentado a la región media de fondos de la torre --secundaria, donde es fraccionado con el producto destilado (arriba) de HD + H_2 y en los fondos el producto es D_2 puro, que después se calienta a temperatura ambiente y constituye el producto de planta.

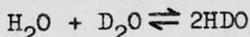
El HD y H₂ recobrado de los fondos de la torre secundaria, se retroalimentan a la parte superior de la misma.

El calor requerido por el rehervidor de las torres es proveído por una corriente de HD-H₂ comprimido, el cual se condensa en el rehervidor de serpentín. El HD-H₂ condensado es usado como reflujo abierto en lo alto de la torre -- primaria. Un arreglo de doble columna, tipo Linde, es usado para proveer el reflujo de los fondos de la torre secundaria y el vapor del rehervidor para la parte superior de la misma torre. (Ver Fig. 17).

Para destilación de hidrógeno como planta parásita de una de amoniaco (14, 55), se utiliza básicamente el mismo-equipos, más una planta criogénica y equipos de purificación.

DESTILACION DE AGUA

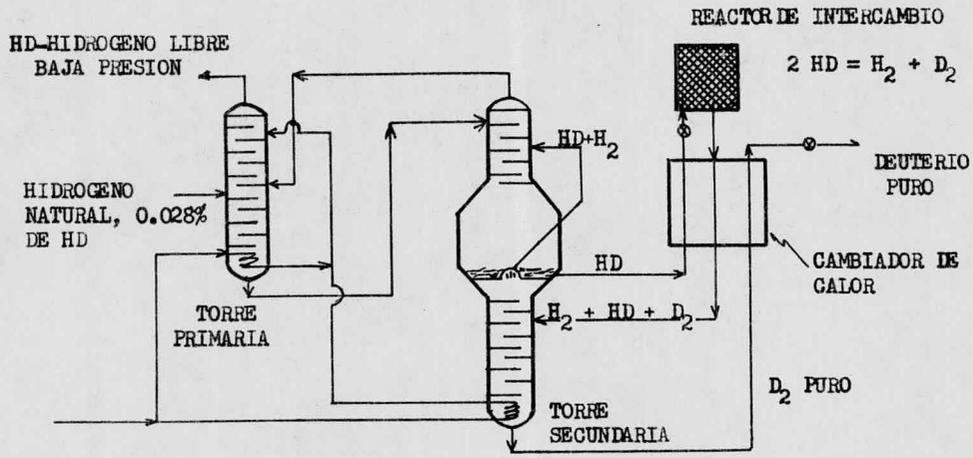
Es de gran importancia, pues constituye la parte final del proceso (G-S). El agua contiene las tres especies-moleculares en equilibrio:



El factor de separación viene dado como la razón de las relaciones atómicas de deuterio a hidrógeno en el líquido por su correspondiente relación en el vapor (56).

$$\alpha^* = \left[\frac{x_{\text{HDO}} + 2x_{\text{D}_2\text{O}}}{2x_{\text{H}_2\text{O}} + x_{\text{HDO}}} \right] \left[\frac{2y_{\text{H}_2\text{O}} + y_{\text{HDO}}}{y_{\text{HDO}} + 2y_{\text{D}_2\text{O}}} \right] \dots \quad (\text{I})$$

- FIGURA 17 -



Si se hacen los siguientes acercamientos:

1.- El líquido y el vapor forman una solución ideal:

$$y = \frac{\Pi x}{P}; P = \text{Presión total. } \Pi = \text{Presión de vapor.}$$

2.- La presión de vapor del HDO es la media geométrica de la presión de vapor de H_2O y D_2O .

3.- La constante de equilibrio K , para la reacción $H_2O + D_2O \rightleftharpoons 2HDO$, en la fase líquida tiene un valor de 4.0:

$$x_{HDO} = 2\sqrt{x_{H_2O} x_{D_2O}}$$

desarrollando estas premisas en (I)

$$\alpha^* = \sqrt{\frac{x_{D_2O}}{x_{H_2O}}} \sqrt{\frac{\Pi_{H_2O} x_{H_2O}}{\Pi_{D_2O} x_{D_2O}}} = \sqrt{\frac{\Pi_{H_2O}}{\Pi_{D_2O}}}$$

Esto significa que α^* es independiente de la composición.

La diferencia de temperatura de ebullición en sus componentes claves es de $1.3^\circ F$ entre H_2O y HDO. Por consi---guiente, la razón de vapor en el rehervidor es extremadamente alta, al igual que el consumo de energía.

Esta gran cantidad de energía fluye en forma de calor entre diferencias de temperatura muy pequeñas, causadas mas que nada por caídas de presión y a la diferencia de temperatura del rehervidor y el condensador.

Una operación económica requiere suplementación de calor en forma eficiente (termodinámicamente hablando cer

cana a la reversibilidad) y minimizar caídas de presión.--

El número de platos teóricos requeridos (n_{\min}) para enriquecer deuterio de $x_f = 0.000149$ en fracción átomo a un producto de $x_p = 0.998$ (12), es:

$$n_{\min} = \frac{\ln \frac{x_p(1-x_f)}{x_f(1-x_p)}}{\ln \alpha^*} = 308$$

El número óptimo será de 700 platos.

La razón mínima de flujo molar de vapor (V) a producto (P) es:

$$\left(\frac{V}{P}\right)_{\min} = \frac{x_p - x_f}{x_f} \cdot \frac{\alpha^*}{\alpha^* - 1} = 141,000$$

La recuperación de deuterio por alimentación, r , a este flujo de vapor es:

$$r = \frac{Px_p}{(V+P)x_f} = \frac{\alpha^* - 1}{\alpha^*} = 0.0475$$

Para una planta en operación, con el número óptimo de etapas, se emplean alrededor de 200,000 moles de vapor que deben ser suministradas por mol de agua pesada producida.

Actualmente se hacen enriquecimientos del 20% al --- 99.8% en plantas canadienses por este método, como parte-final del proceso G-S.

Los costos de operación están unidos por consiguiente al de intercambio químico.

PROCESOS ELECTROMAGNETICOS

ELECTROMAGNETICO - CALUTRON

HISTORIA

Método usado por Thomson en 1911, al descubrir la existencia de isótopos estables de algunos elementos. En 1940 - Nier usó un espectrómetro de masa para obtener pequeñas cantidades de U-235, las cuales sirvieron para demostrar que es fisionable.

En 1944 E.O. Lawrence, desarrolló el calutrón, en la planta electromagnética de Oak Ridge, EUA., para producir el primer Kg de U-235.

Se han logrado enriquecer casi todos los isótopos estables conocidos mediante este método, aún cuando se presentan dificultades para isótopos de elementos pesados, por ejemplo: para Pu-239 y Pu-240, cuya diferencia en masa es sólo 42 partes en 10,000 o 0.42%; que comparada con la diferencia de 1.26% entre U-235 y U-238, resulta muy pequeña.

De 1945 a la fecha, han sido construidos gran número de aparatos electromagnéticos, dada su facilidad de manejo y utilidad a nivel experimental y aún a mediana escala industrial (15, 57) y merced al gran desarrollo de nuevos ma-

teriales super-conductores y magnéticos, se preve un gran futuro en este aspecto.

FUNDAMENTO

Un compuesto volátil del elemento que será separado es vaporizado y pasado a una cámara de ionización, donde las moléculas son disociadas e ionizadas por acción de -- una corriente de electrones proveniente de un filamento caliente o ánodo; la presión de operación debe ser baja -- del orden de 10^{-2} mm de Hg (Ver Fig. 18).

Los iones positivos son acelerados a través de una -- diferencia de potencial negativa de V (Volts) generada -- entre 2 pantallas S_1 y S_2 , surgiendo de la última como un rayo iónico a una velocidad v. La energía cinética de un ion es igual a la energía potencial perdida. por lo tanto:

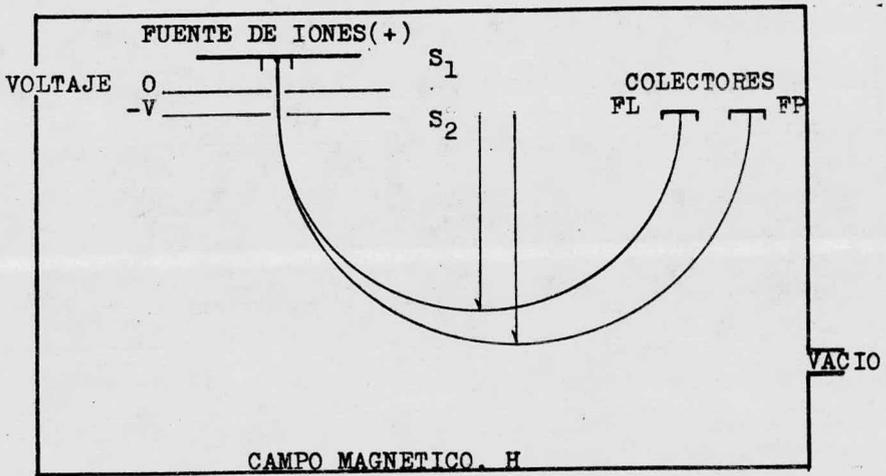
$$\frac{mv^2}{2} = 10^7 VZe$$

Donde: m = masa del ion

e = $1.6186 \cdot 10^{-9}$ Cb

Z = Número de carga electrónica
llevada por el ion.

Los iones pasan a través de un campo magnético uni-- forme, H_1 perpendicular al plano (considera el papel), en el cual cada ion está actuando con una fuerza de 0.1 HZev (dinas) en el plano del papel y perpendicular a su dirección de movimiento (58). Esto obliga a cada ion a moverse en una órbita circular de radio r debido a la fuerza centrífuga $(mv^2)/r$, haciendo un balance con la fuerza magnética:



FL: FRACCION LIGERA

FP: FRACCION PESADA

- FIGURA 18 -

$$\frac{mv^2}{r} = 0.1 \text{ HZev};$$

$$r = \frac{mv}{0.1\text{HZe}} = \frac{2 \times 10^9 m \text{ V/Ze}}{H}$$

donde:

$$m = M/N$$

y $e = F/N$

$$F = 96519.4 \text{ Cb/g}_{\text{eq}}, \text{ cte de Faraday}$$

$$M = \text{Masa, UMA}$$

$$N = \text{Número de avogadro}$$

así:

$$r = \frac{\sqrt{2 \times 10^9 \text{ MV/ZF}}}{H}$$

Después de sufrir una deflexión en un ángulo de 180° , los iones de diferente masa alcanzan la máxima separación, mediante la adecuada colocación de colectores en la posición dada por la anterior ecuación.

Para obtener la separación entre colectores de isótopos de masa M_1 y M_2 , deflectados a 180° , se usa:

$$2(r_2 - r_1) = \frac{\sqrt{8 \times 10^9 \text{ V/ZF}}}{H} (\sqrt{M_2} - \sqrt{M_1})$$

Existe un problema cuando se trabaja con corrientes altas: la concentración de iones en el rayo es grande y -- tienden a repelerse entre sí, entonces se desafoca el rayo y la separación de isótopos no se logra adecuadamente.

COMENTARIO

La implementación es sencilla y para laboratorio resulta ser el método más cómodo, pero a escala industrial -- sus costos son prohibitivos.

PROCESOS ELECTROMAGNETICOS

SEPARACION CON PLASMAS CENTRIFUGOS

HISTORIA

Después de la segunda guerra mundial, J. Slepian (59), intentó separar uranio con este método, pero fue hasta la década de los sesentas que Watson-Munro, Bonnevier y Boeschoten, James, Simpson, Heller y Simon lograron obtener enriquecimientos de varios isótopos (60-64). Actualmente USA, URSS y Alemania consideran las posibilidades de este método.

FUNDAMENTO

La centrífuga de plasma utiliza la dependencia de la masa en la fuerza centrífuga para lograr la separación. La rotación del plasma es producida por la denominada fuerza Lorentz; esta fuerza actúa cuando una corriente eléctrica fluye perpendicularmente a un campo magnético: $(\vec{J} \times \vec{B})$, donde \vec{J} =flujo electrónico y \vec{B} =campo magnético.

Se induce un arco de gas ionizado o plasma entre 2 electrodos de diferentes dimensiones radiales. La corriente eléctrica así formada tiene componentes axiales y radiales. La interacción del componente radial con un campo magnético axial homogéneo causa una rapidísima rotación del plasma; el contenedor, sin embargo, no rota y ninguna parte mecánica lo hace.

Experimentalmente se han obtenido velocidades de rotación de 10^7 cm/seg. Una mezcla isotópica en estado plásmico,

tenderá entonces a separarse en zonas concéntricas, siendo la exterior la que contenga el isótopo más pesado.

La descripción teórica y su implementación matemática, están actualmente en desarrollo paralelamente a la experimentación.

Se deben generar plasmas de densidad $\geq 10^4 (\text{cm}^{-3})(n +)$ $(v +)F \geq 3 \times 10^{18} \text{F}(\text{S}^{-1})$, donde $n+$ = densidad del ion; $v+$ = velocidad térmica del ion, F = área de la sección transversal del plasma.

Se miden parámetros de inercia, fricción, fuerza eléctrica y fuerza térmica; todos estos dependientes del grado de ionización del plasma α' cuya descripción viene dada por la ecuación de Saha-Langmuir:

$$\alpha' = \frac{J_+}{J} = \frac{g_+ + \sum_i g_+^e \exp\left(-\frac{E_+^e}{KT}\right)}{g_0 + \sum_i g_0^e \exp\left(-\frac{E_0^e}{KT}\right)} \exp\left[\frac{-e(I - \Phi_i)}{KT}\right]$$

g_0 y g_+ son los factores de peso en la mecánica cuántica de los estados basales del átomo absorbido y el ion, E_+ y E_0 son las energías del primer estado cuántico del ion y el átomo, K es la constante de Boltzman y e carga electrónica, J_+ flujo de iones y J_0 flujo de átomos ($\text{cm}^{-2} \text{S}^{-1}$).

La colección se hace una vez que la separación en capas se ha verificado, esto es en una sola etapa dando hasta 100% de separación en algunos casos.

El aparato generador de plasma y campo magnético, así como el colector son conocidos como el Q-Device (65); este aparato es de empleo común para estudios de comportamiento de plasma.

Los cálculos de velocidad de rotación del plasma muestran que se comporta esencialmente como un cilindro rígido rotando; que tiene un máximo de 1/2 a 3/4 del radio del ánodo.

La región exterior del cilindro con radio igual al del ánodo, no rota del todo (66).

La distribución de densidad en un plasma rotante, es función de la fuerza centrífuga y electrostática entre electrones y iones del plasma, lo que hace un efecto de compactación para la distribución de densidad:

$$n = n_0 \exp \left(\frac{mv^2}{2(1+z)kT} \right)$$

donde: n = Densidad de partícula
 n_0 = Densidad de partícula para el radio r_0
 Z = Estado de ionización.

Este comportamiento del perfil es ventajoso para la colección.

El factor de separación ha sido definido por algunos autores para este caso, como:

$$\alpha = \alpha_0 \exp \left(\frac{\Delta mv^2}{2kT} \right)$$

donde α_0 : factor de separación para un radio más interno
De acuerdo a esto T altas y v bajas no son recomendables.

Hasta la fecha se han utilizado 4 técnicas: dos dependientes fuertemente del grado de ionización:

- a) Plasma con ionización parcial y
- b) Plasma a ionización completa.

En el proceso de ionización parcial, los electrones e iones son usados para mover las partículas neutrales o parcialmente neutrales. Se estima que una ionización del 10% puede hacer posible este proceso. La separación isotópica ocurre en el gas neutro rotante donde la sección-transversal de colisión es pequeña; esta separación es rápida.

El proceso de ionización completa, es un caso de movilización total generada en un 100% por la fuerza Lorentz. Las pérdidas de partículas cargadas aumentan por efectos de difusión ambipolar y recombinaciones.

Los otros dos métodos son de reciente implementación (65): el proceso Dawson y el de ionización química.

En el primero, el plasma dentro del campo magnético es expuesto a una onda de baja energía, a una radiofrecuencia resonante con la frecuencia de ciclotrón de los iones de $^{235}\text{UF}_6$. La rotación de este modo impartida preferentemente a los iones de $^{235}\text{UF}_6$ hace posible la separación de U-235 del U-238, mediante el adecuado empleo de platos colectores.

El proceso de ionización química para la obtención del plasma hace uso de moléculas de UF_6 , que son aceleradas por expansión con un gas inerte de arrastre a través de un jet supersónico. Un rayo cruzado de moléculas de metal alcalino dan como resultado la formación de Na^+ o Cs^+ y UF_6^- . Un filtro de masa a radio frecuencia de cuadrupolo deflecta el $^{238}\text{UF}_6$ fuera del rayo de plasma, permitiendo la separación de los isótopos de los 2 rayos en baffles separados enfriados por nitrógeno líquido.

Sobre estos últimos métodos no se conocen muchos detalles, pero parecen ser económicos.

IMPLEMENTACION

La tecnología del Q-Device, así como el separador radial tridimensional (66, 69) son simples y bien conocidos: los electrodos varían de material según sea el elemento a separar, para uranio se han utilizado de W-Re y para gases nobles W.

La naturaleza del electrodo depende del valor de la función trabajo en la superficie de ionización, pues éste afecta al grado de ionización del plasma.

El manejo de este aparato es sencillo, los solenoides para generar el campo magnético no representan ningún problema. El material de la cámara de vacío es acero inoxidable, no magnético, seccionado y unido por juntas selladoras de algún metal noble.

Se requiere además de una chaqueta de enfriamiento alrededor de la cámara. En algunos casos se ha empleado agua como medio de enfriamiento.

En resumen, su implementación es sencilla y su mantenimiento es mínimo puesto que no existen piezas mecánicas móviles.

CONSIDERACIONES ECONOMICAS

El costo de energía, inversión y personal son mucho más bajos que los requeridos en una planta de difusión. -

Su economía es casi independiente del tamaño de la planta. La tecnología es conocida y disponible.

Para uranio los consumos de energía han sido del orden siguiente (68):

1.- Calentamiento de plato de electrodo de 10 cm ² a 2500°K	1400 Watts
2.- Horno atómico 2500°K	1400 Watts
3.- Separador	100 Watts
4.- Resto de la unidad	<u>1100 Watts</u>
Total	4000 Watts

Pueden utilizarse magnetos permanentes para generar el campo magnético; consumo anual de energía: 3.4×10^4 - Kwh; 1 Kwh = 0.05 Marcos Alemanes (D.M.), costo de energía anual 1700 DM. (1975).

Se pueden separar 250 Kg. de uranio natural por año produciendo 1.83 Kg. de U²³⁵/año (se considera plato de - 10 cm²); esto es, 1 Kg. U-235 = 933 DM. Esto da costos de energía menores en un factor de 7 respecto a difusión gaseosa y tres veces más bajo que centrífuga. El costo de inversión para la planta y el personal son mucho menores; se considera que este método sería un 50% más barato cuando menos que los de difusión y centrifugación.

Otros investigadores (70) consideran 11.1 Kwh a completa ionización y 113.5 Kwh a ionización parcial dando un consumo de energía específica por Kg. de trabajo separativo, considerando pérdidas de energía de 10 al 20%.

Esto hace:

120 - 230 Kw/kg SW (ionización completa)

230 - 340 Kw/kg SW (ionización parcial)

No considera tampoco costos de generación del campo magnético bajo principio de posible utilización de espiras superconductoras que hacen un consumo energético bajo.

PROCESOS ELECTROLITICOS

PROCESO ELECTROLITICO

HISTORIA

Hasta 1943, toda el agua pesada se obtenía por este método. La mayor planta en esa época era la de Rjukan, No ruega; el objeto principal de esta planta era la de producir H_2 como parte del proceso de obtención de NH_3 ; como subproducto se obtenía en una planta parásita de 9 celdas el agua pesada.

Este proceso fue el utilizado por el proyecto Manhattan. Actualmente es muy costoso y no se utiliza, aún cuando en 1960 se presentaron como posibles alternativas los procesos de electrolisis reversible del agua y electrolisis directa del deuterio (44). Benedict da una ligera explicación de este proceso (12).

PROCESOS LASER

SEPARACION CON LASER

HISTORIA

El método fue concebido en 1920 por R. Morton y H. - Hartley (77). En 1952, McDonald y Cuning (71), reportaron la separación de los isótopos del mercurio con una lámpara de vapor de este elemento, pero fue hasta 1972 -- que Farrar y Smith (72) vieron las grandes posibilidades de la utilización de luz laser para realizar este proceso de separación a escala industrial. A la fecha, el número de isótopos separados abarca desde hidrógeno hasta uranio mediante el uso de este método.

FUNDAMENTO

La separación de isótopos por luz laser difiere fundamentalmente de otros métodos (72), distinguiendo entre átomos de diferentes isótopos, no sobre la diferencia en sus masas, sino a través de sutiles diferencias de sus es estructuras electrónicas.

El espectro característico de un átomo o molécula se encuentra influenciado por la estructura nuclear. Los -- electrones tienen sus movimientos determinados, principalmente por el número de protones en el núcleo. Los neutrones no tienen gran influencia sobre la nube electrónica, pero un cambio en el número de ellos altera sutilmente -- las trayectorias electrónicas, debido a la variación en -- masa, volumen, forma del núcleo y variación del spin nuclear.

En una molécula, la diferencia en masa puede producir efectos más grandes, como alterar la frecuencia de estados de vibración molecular.

Estos pequeños efectos son los que determinan pequeñas variaciones en los niveles de energía atómica y molecular, lo que significa variaciones en el espectro de absorción y emisión.

Bajo este principio un isótopo o molécula con un isótopo determinado, sólo absorbe y emite energía de acuerdo a un patrón energético y de una longitud de onda bien definidos.

La luz laser tiene la característica de trabajar a -- longitudes de onda y frecuencias determinadas. Esto hace posible encontrar una región de longitud de onda donde una especie isotópica es altamente absorbente y donde las otras especies isotópicas son transparentes. La especie absorbente es entonces cargada con una determinada cantidad de energía, según convenga, volviéndose susceptible de ser manipulada la especie absorbente y separable de las no absorbentes.

Varios métodos de manipulación se han implantado para lograr la separación de los mas importantes, son:

Fotoionización de átomos con deflexión.

Los átomos, una mezcla de 2 isótopos, emitidos de un horno formando a un rayo atómico, son irradiados por el laser, excitando una sola especie isotópica desde su estado basal energético al de ionización; en estas condiciones es separado por la acción de un campo magnético o eléctrico -- no homogéneo.

Desventajas: Es difícil la colección por la corta duración de excitación.

Fotodisociación de moléculas

Las moléculas que están hechas de un elemento que -- tiene 2 isótopos y otro u otros elementos, tienen bandas de absorción que dependen de la composición isotópica.

El laser excita y disocia solamente las moléculas que incluyen un isótopo en especial.

Parte de la energía de ruptura del enlace químico empuja los fragmentos separándolos: el fragmento ligero es desviado en un gran ángulo y puede ser colectado.

Una variación es que la ruptura produzca compuestos estables que puedan ser colectados directamente cada uno conteniendo un isótopo específico.

Desventaja: Posible presencia de radicales libres en productos; es necesario utilizar moléculas con más de 3 - átomos para aumentar la densidad de estados energéticos.

Fotoquímico.

Las moléculas son excitadas selectivamente a altos - niveles de vibración molecular. Estas moléculas son químicamente más activas que las moléculas "frías" no excitadas, y en presencia de algún reactivo B dan reacciones -- del tipo $A^* + B \rightarrow C$ y se procede a colectar C.

Desventaja: La reacción debe ser rápida (sin incluir a frías). Además pueden producirse procesos de reacción - inversa.

Deflexión por presión de radiación

La absorción de luz está acompañada de una transferencia de momentum en la dirección de propagación de la -

luz laser, $P = h\nu/c$, la emisión es por fluorescencia: si se estimula repetidamente con varios laser el momentum es incrementado y por consiguiente la deflexión respecto al rayo atómico; los átomos no absorbentes no deflectan.

Desventajas: Gran número de fotones requeridos, el rayo atómico también diverge, posibilidad de estados metaestables de excitación.

A continuación la tabla resume algunos experimentos siguiendo las diferentes modalidades:

METODO	EXPERIMENTADOR	LUGAR	ELEMENTO	α	ALGUNOS DETALLES	REF
Fotoionización con deflexión	Tuccio y Snavelly	USA (1975)		4	Excitación $\lambda=5915.4 \text{ \AA}$	76
	Brinkman et al	RFA	Ca		Metaestables en $4S4P3P_2$ Excitado por laser a $4S5S^3S$ Laser de argon a $3d5P^3P$ El cual es autoionizable	74
Fotodisociación	Young y Moore	USA (1972)	H	9	D_2CO Selectivamente excitado de una mezcla con H_2CO	73,74
	Marling	USA (1975)	H	14	A partir de formaldehido	
	Rock Wood	USA	B		Laser CO_2 excita niveles vibraciones de BCl_3 UV a $213^{\circ}A$ disocia	
	Ambar Tsumian y Letokhov	URSS	N			NH_3 Excitado con laser CO_2 y disociado con UV
URSS		Cl			Laser de Nd, excita HCl se dobla frecuencia y disocia	77
URSS		S		3000	SF_6 con laser CO_2 en infrarrojo excita, UV disocia al 34SF_6	77

METODO	EXPERIMENTADOR	LUGAR	ELEMENTO	α	ALGUNOS DETALLES	REF
Fotodisociación	Clark, Haas y Houston	USA	C	81	A partir de formaldehído ^{12}CO y H_2^{13}CO sin descomponer	
	Karl e Innes	USA	H, N, C	3-4	Tetrazina	
	Hochstrasser y King	USA	H, N, C	1000	Tetrazina cristalina (1.6°K) Enriquece cristales en ^{13}N y ^{13}C	73
	Los Alamos Scientific Lab.	USA			$^{235}\text{UF}_6$ Excitado por infrarrojo. UV disocia productos U^{235}F_5 que precipita y F	
Fotoquímico		Francia	Hg		Fue con lámpara de mercurio	
	Brennek y Katta	USA	Cl	6	$\text{ICl} + \text{C}_6\text{H}_5\text{Br}$ Productos selectivos $\text{C}_6\text{H}_5\text{Cl}^{31}$, I y Br	73
	Jetter, Gürs y Dibbert	RFA	U			

METODO	EXPERIMENTADOR	LUGAR	ELEMENTO	α	ALGUNOS DETALLES	REF
Deflexión por presión de radiación	Brenhardt et al	USA (1974)	Ba	2-3	$\lambda=5535.7 \text{ \AA}$ frecuencia de resonancia, 25 fotones/átomo Rayo deflectado por varios miliradiales	
Fotoquímico	Miller, M.	USA (1976)	D		Vibracional catalizado por reacción fotoquímica $\text{NH}_2\text{D}^* + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{NH}_3 + \text{HDO}$	78
			D		$\text{HCl} + \text{CH}_3 - \overset{\text{CH}_2}{\parallel} \text{C} \rightleftharpoons \text{CH}_3 - \overset{\text{CH}_3}{\parallel} \text{C} - \text{Cl}$ $\text{DCI}^* + \text{CH}_3 - \overset{\text{CCl}_2}{\parallel} \text{C} \rightarrow \text{CCl}_3 - \overset{\text{CCl}_2\text{D}}{\parallel} \text{C} - \text{Cl}$ <p>La descomposición de DCI puro</p>	

IMPLEMENTACION INDUSTRIAL

De acuerdo a esquema de fotoionización, los requerimientos tecnológicos son relativamente fáciles de implementar; el esquema de evaporación de rayo atómico es factible bajo ciertas condiciones; la Exxon Corporation y -- Avco Everett construyen una planta piloto en Richland, -- Wash.

CONSIDERACIONES ECONOMICAS

Aún está en etapa experimental (73), pero se considera que es favorable con respecto a difusión gaseosa por un factor de 1000 a 100 veces, considerando la etapa industrial para ^{235}U ; para otros isótopos es aún mas favorable y factible.

Los requerimientos de energía para ^{235}U por átomo, son del orden de 500 y 5000 eV/átomo ^{235}U contra 5×10^6 eV/átomo ^{235}U empleada en difusión gaseosa.

Esto es, considerando que la eficiencia del laser para transformar energía eléctrica en luz laser es del orden de 10^{-3} . Si se mejora la eficiencia, el método será mucho más barato. Otra estimación (74), es mas conservadora y la coloca en posición favorable respecto a centrifuga por un factor 2 veces más económico.

Una fuente norteamericana (75) predice capital y costos de operación del orden de $\$10^{11}$ dólares durante los próximos 25 años; no da datos de cómo se estima.

La construcción de la primera planta industrial será dentro de los próximos 10 años.

Para agua pesada (78), el proceso gasta 10^4 fotones-

con laser de CO_2 y eficiencia del 10%; la eficiencia cuántica $\frac{\text{fotones}}{\text{Atomo de D separado}} = 1\%$ y requerimiento de energía de 3Kwh, con equivalente a un costo de 7.5 c/mol D o -- \$7.5/Kg D_2O . Esto es asumiendo costo de electricidad de 25 Mils/Kwh. El importe del capital del laser, asumiendo --- \$20/Watt CO_2 y un tiempo de vida útil del laser de 2 años; el costo de separación es del orden de \$35/Kg D_2O .

CAPITULO IV

EL REPROCESAMIENTO DE COMBUSTIBLE COMO METODO DE SEPARACION ISOTOPICA

Tradicionalmente el reprocesamiento de combustible se ha entendido como el proceso mediante el cual se separa el material combustible: U-235 no consumido y el plutonio producido; después de "quemarse" en un reactor de fisión. Este proceso es una parte muy importante dentro del ciclo del combustible y ayuda a alcanzar un mayor grado de utilización del material fisiónable.

Los métodos para separar químicamente plutonio del uranio y a éstos de sus subproductos de fisión fue desarrollado durante la segunda guerra, para proporcionar plutonio altamente purificado para bombas atómicas, antes -- que como una parte del ciclo de combustible.

Aún cuando la composición de los productos de fisión depende del combustible alimentado, la energía de los neutrones, el tiempo de irradiación, el tiempo de enfriamiento después de irradiación y el flujo al cual el combustible fue irradiado, se puede decir que el combustible sa--liente o "quemado" en un reactor contiene aproximadamente 450 núclidos producidos sintéticamente, incluyendo P_{u-239} y neptunio 237; los productos de fisión son isótopos de elementos que se encuentran en el rango de número atómico de 30 a 66, por ejemplo: K_p-85 ; Te-129; I-129, 131; Pm-147; Ce-141, 144; Cs-137; $U-235, 236, 238$; Pu-239, 240, -241.

Algunos de estos productos de fisión absorben neutrones, tal es el caso de: Tc-99; Rh-103; Xe-131, 133, 135; Nd-143, 145; Sa-149, 151; Eu-105; Gd-155 y son los responsables directos de que deba pararse un reactor, aún cuando no se ha consumido todo el combustible, pues detienen la reacción en cadena (12, 79)

Solamente una docena de estos productos de fisión -- tienen radiación intensa y un promedio de vida largo, con propiedades físicas y químicas que son altamente peligrosas o producen problemas en un tratamiento posterior.

De acuerdo a lo anteriormente expuesto, es notorio -- que el material quemado en un reactor es el más rico en -- especies isotópicas, algunas de ellas con gran capacidad de utilización posterior (trazadores, marcadores, fuentes de radiación, etc.). A pesar de esto, solo se extraen el plutonio y el uranio y los demás productos son almacenados hasta que decaiga su actividad. Esto parece ser un -- desperdicio de posibles materiales activos, pero se explica por el alto riesgo y costo que significa manejar estos residuos radiactivos.

Esta política de guardar los productos de fisión resulta cada vez más cuestionable; es decir, el acumular in definitamente material radiactivo implica graves riesgos a largo plazo, pues todo material se deteriora o se transforma mediante la acción de la radiactividad. Aún cuando se toman todas las providencias necesarias para evitar casos peligrosos, que por lo general es difícil que se produzcan, dadas las medidas de seguridad y control que se toman, resulta evidente que anteriormente no se disponían

de métodos de separación isotópica adecuados para obtener y aprovechar estos isótopos y se tomó esta política de almacenamiento.

Esto debe de reconsiderarse para ver que es más redituable; seguir almacenando o usar estos isótopos potencialmente útiles.

La forma en que actualmente se maneja la industria de reprocesamiento, no tiene nada de proceso de separación isotópica; salvo si se considera que se separa uranio y plutonio químicamente puros, pero no son isotópicamente puros, sino que se presentan en su gama de posibilidades; esto hace que deban pasar a la industria de separación isotópica después del reprocesado.

Así, la industria de reprocesado es una retro-alimentación al ciclo de combustible, que ayuda a optimizar costos, pero podría ser más productiva si se planteara su operación como un proceso de aprovechamiento integral o más completo de los isótopos disponibles.

Esto implica procesos de separación isotópica y se presentan algunas posibilidades. A raíz de las modalidades vistas en el capítulo anterior, es posible imaginar una serie de secuencias que podrían dar resultado aprovechando el calor emanado por los productos de fisión: cuando recién han sido extraídos del reactor, se podría formar más fácilmente un rayo atómico o bien un plasma con considerable ahorro de energía; con el laser también podría existir la posibilidad de "marcar" a los núcleos absorbentes de neutrones y extraerlos directamente del reactor sin necesidad de pararlo y extraer el material irra-

diado; o bien, pueden implementarse algunos procesos separativos que funcionen paralelamente al actual de reprocesado.

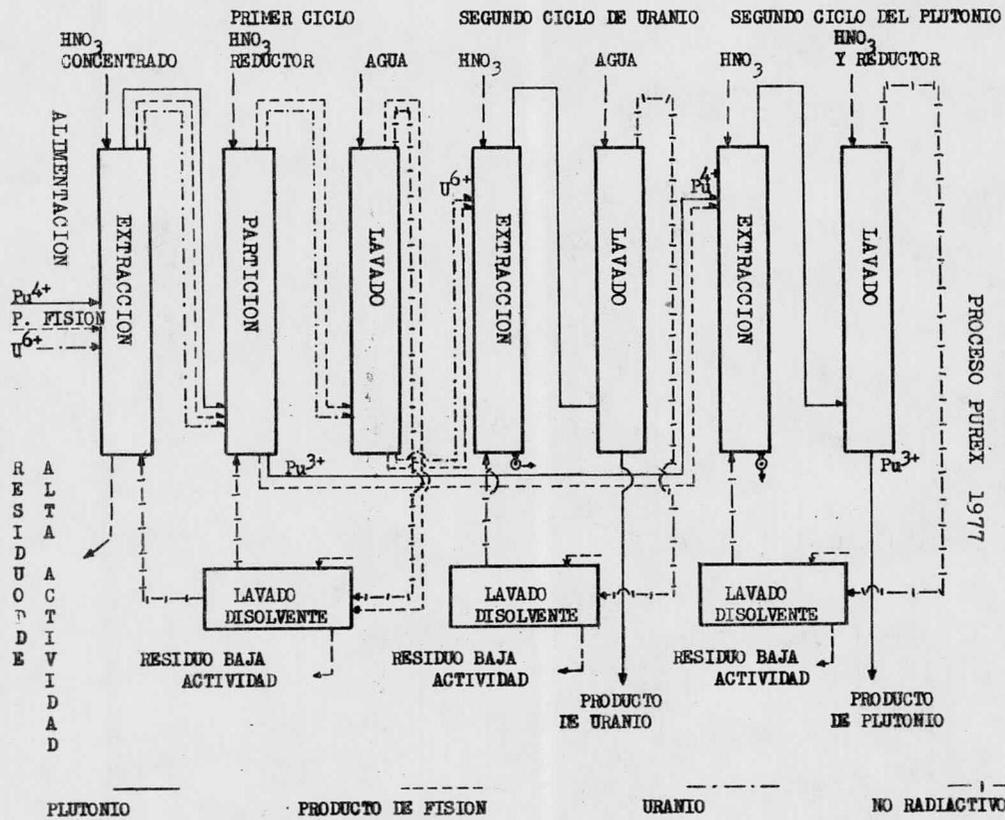
Existen varios métodos de reprocesado, todos fueron concebidos como instrumentos de obtención de plutonio y uranio con propósitos militares, a saber (81): extracción por solventes, precipitación, intercambio iónico, destilación fraccionada y volatibilidad de fluoruros. De éstos - el más utilizado es el de extracción por solventes; los requerimientos de seguridad de este proceso son muy altos, la operación y mantenimiento remoto son necesidades ineludibles.

El primer proceso por extracción fue el Redox (12) - con hexona como disolvente orgánico; se utilizó ácido nítrico, pero éste descompone la hexona; el ácido nítrico - se sustituyó por nitrato de aluminio, pero el volumen de residuos radiactivos aumentó enormemente.

Gran Bretaña utilizó en Windscale el Butex que es -- químicamente estable en presencia de ácido nítrico. En -- EUA se utiliza el proceso Purex, mismo que también se usa ahora en otros países (80).

El proceso Purex para recuperar uranio y plutonio de los combustibles gastados en los reactores nucleares, emplea PTB (fosfato de tributilo) disuelto en un hidrocarburo tipo queroseno en calidad de agente de separación. --- Cuando los iones de uranio y plutonio se hallan en un estado de gran deficiencia de electrones, esto es, altamente oxidados, son más solubles en la solución hidrocarburo PTB que en la solución acuosa. Bajo las mismas condicio--

nes, los centenares de subproductos radiactivos, producidos al fisionarse el uranio 235 en el reactor, son más solubles en la mezcla acuosa fuertemente ácida que en la solución orgánica. Este diagrama (Fig. 19) simplificado -- muestra siete columnas verticales por las que se hace circular en contracorriente, y con un elevado contacto, las soluciones acuosa y orgánica, de modo que puedan separarse eficazmente las sustancias que son más solubles en una solución que en otra. La mezcla alimento que entra en la primera columna de extracción es el combustible gastado -- en solución acuosa; además de los subproductos altamente radiactivos contiene cerca de 1% de uranio 235 no fisionado, más del 90% del isótopo uranio 238, no fisionable y -- entre 0.5 y 1% de una mezcla de isótopos del plutonio, -- principalmente plutonio 239 y 240, el primero producido -- cuando el uranio 238 ha capturado un neutrón y el segundo a partir del plutonio 239 por captura de otro neutrón. -- Los iones de uranio están en un estado de gran oxidación, pues carecen de seis electrones (U^{6+}); los iones de plutoonio carecen de cuatro electrones (Pu^{4+}). El alimento acuoso entra hacia la mitad de la primera columna de extracción y la solución de PTB entra por el fondo. El uranio y el plutonio son extraídos por el disolvente que fluye hacia arriba; los productos de fisión son "lavados" del disolvente por la corriente acuosa de ácido nítrico que desciende y salen por el fondo de la columna. La mezcla uranio-plutonio pasa a la segunda columna o particionador, -- donde se "lava" el plutonio del disolvente por contacto, -- en contracorriente, con ácido nítrico que contiene un ---



PROCESO PUREX 1977

- FIGURA 19 -

agente reductor que transforma el plutonio al estado $3+(\text{Pu}^{3+})$, insolubilizándolo en el disolvente orgánico. Si multáneamente, el disolvente que asciende extrae las últimas trazas de uranio de la solución acuosa de plutonio, - que fluye de la parte inferior de la columna de partición. En la tercera columna, el uranio de la solución orgánica-se elimina con ácido nítrico diluído. En el segundo ciclo, la extracción y lavado del uranio y plutonio se repiten - por separado. A través del sistema, (ciclo primero) el disolvente es atacado por la radiación intensa y por ataque químico. Los productos degradados y los de fisión, pueden ser eliminados, es decir almacenados.

El bajo grado de aprovechamiento de combustible en - los reactores nucleares actuales y la creciente inversión en el inventario de combustible gastado, aumentan sustancialmente el costo de la energía eléctrica generada por - una central nuclear, incluso en un 20%.

Gran Bretaña, Francia, RFA, EUA y otros países del - bloque comunista tienen plantas de reprocesado.

México debe de tratar de optimizar desde un princi-- pío sus programas de utilización de recursos nucleares y- evitar aquellos procesos que se implementaron como parte- de un programa armamentista, antes que de uno energético- racional, ya que existe una mejor tecnología que debe ser aprovechada.

CAPITULO V

ANALISIS COMPARATIVO

Las dificultades y costos que se presentan al construir y manejar algún tipo específico de planta de separación isotópica, hacen del proceso de selección, entre varios tipos de planta disponibles, un tema de grave delicadeza y posible controversia.

Este proceso es complicado por los objetivos y la situación específica en que se encuentra nuestro país, su industria y su modelo de desarrollo. Este último factor no ha sido bien definido y debe incluir principalmente un plan energético racional. Tomar una decisión considerando únicamente factores de comparación económicos y técnicos, pueden hacerla altamente ineficaz y ocasionar resultados negativos a corto o largo plazo. Por ejemplo, la decisión depende principalmente de que el ciclo de combustible simplemente para reactores de uranio enriquecido o de uranio natural (Candu); además se debe considerar la posibilidad de utilizar ambos, bajo la perspectiva de emplear el combustible gastado por un LWR, como combustible para un HWR sin necesidad de reprocesarlo (82).

Esto sería solo tomando en cuenta los reactores de primera generación; después la utilización de reactores de crianza podrían cambiar la perspectiva. Estos factores se deben de analizar conforme a un plan energético racional como indico en los capítulos siguientes.

Si consideramos únicamente una evaluación involucrando factores tecnológicos-económicos se deben de considerar básicamente los siguientes aspectos: el tiempo disponible para desarrollar tecnología, los recursos naturales, los recursos técnicos y económicos y los factores competitivos a los que hay que dar un peso especial, de acuerdo a la situación del país en un contexto mundial.

Ante esto, la evaluación del proceso tiene como principales parámetros:

- a) Factor de separación por unidad o etapa
- b) Alimentación por unidad
- c) Inventario en proceso
- d) Capital de inversión
- e) Costos de operación
- f) Costo de la unidad de trabajo separativo (\$/UTS)

Los costos de operación lógicamente incluyen el consumo de energía; pero en estos tiempos de hipersensibilidad energética es mejor considerarlos por separado (Ver - tabla)

Varios otros factores deben de considerarse: el tiempo y desarrollo de tecnología; pasar de escala de laboratorio a escala comercial; la potencialidad del proceso para ser rehabilitado, modificado y/o aumentado en su capacidad. Estos son factores importantes cuya sutileza está fuera del alcance de este trabajo.

La evaluación del trabajo separativo es determinada por los costos estimados; éstos están por lo general referidos al costo de la unidad de trabajo separativo y al precio del producto como último parámetro. Hay factores -

que difieren de un proceso a otro y el juicio de éstos debe ser individual, por ejemplo, recuperación del capital de inversión, factores de carga de la planta, costos esperados de energía a futuro, niveles de inventario, estructura y financiamiento de la empresa separativa.

Si se hacen las adecuadas consideraciones y se asume una capacidad de producción igual para las plantas que se están comparando, el costo de la unidad de trabajo separativo es el mejor parámetro para la evaluación y comparación de procesos. Por supuesto, se quiere que el costo de la unidad sea lo más bajo posible; incluir la estimación del costo de capital de inversión específica, los costos de consumo de energía y los costos de operación que no incluyan usos de energía, ayuda en la evaluación. El siguiente cuadro muestra la comparación tomando estos parámetros en relación al proceso de difusión gaseosa.

COMPARACION DE ECONOMIA DE PROCESOS PARA URANIO (65)

<u>PROCESO</u>	<u>CAPITAL DE INVERSION ESPECIFICA</u>	<u>COSTOS DE ENERGIA</u>	<u>COSTOS DE OPERACION (DIFERENTES DE ENERGIA)</u>	<u>COSTO DE UTS</u>
Centrífuga	>	<	>	< en un factor de 2
Nozzle	<	>	=	≪
Laser	<	<	>	< en un factor de 4 a 1000
Intercambio Químico ($U^{IV}(aq) - U^{VI}(aq)$)	=	<	>	≪
Otros procesos aerodinámicos	>	>	=	=
Plasma Ionización química	>	<	>	< en un factor de 4

>, < en relación al proceso de difusión.

La comparación fue hecha por los siguientes datos para difusión gaseosa en 1977:

Costo de UTS = \$100/Kg UTS para U-235

Costo de enriquecimiento de U-235 al 3% = \$970.5/Kg.

Capacidad = 10^7 UTS/año

Consumo de energía = 2400 Kwh/UTS

De la anterior tabla sólo se pueden considerar confiables los datos para centrífuga y nozzle. En el resto, la incertidumbre es grande dado que se encuentran en etapa preindustrial o experimental.

Para agua pesada tenemos los siguientes datos:

<u>PROCESO</u>	<u>COSTO DE OBTENCION DE AGUA PESADA 1978</u>	<u>CONSUMO DE ENERGIA</u>
GS	\$120/Kg D ₂ O	9 MWh/Kg D ₂ O
Laser	\$ 35/Kg D ₂ O	2.5-3.0 MWh/Kg D ₂ O
Intercambio Químico-Gas Natural		17-18 MWh/Kg D ₂ O

De éste solo son confiables el GS y el de gas natural. El laser aún no supera etapas de planta piloto.

De acuerdo a lo anterior son susceptibles de ser implementados:

- a) Para Uranio
 - 1) Centrífuga
 - 2) Nozzle

De éstos ya existen industrias a nivel comercial.

Se consideran como susceptibles de implementar a futuro, de acuerdo a los cálculos estimados de costos más favorables respecto a centrifuga en el siguiente orden.

- 3) Laser
 - 4) Plasma
 - 5) Intercambio químico ($U_{aq}^{IV} - U_{aq}^{VI}$)
 - 6) Otros procesos aerodinámicos
- b) Para agua pesada
- 1) G-S
 - 2) Intercambio gas natural
 - 3) Laser (mejor prospecto a futuro, costos menores en un factor de 4 respecto a G-S).

De éstos solo se conocen el G-S y gas natural; el laser se encuentra en etapa experimental, pero resulta probable su factibilidad.

c) Para otros isótopos

Existen 3 procesos que son lo suficientemente versátiles para abarcar la separación de elementos ligeros hasta pesados y son:

- 1) Laser
- 2) Electromagnético
- 3) Plasma

El proceso electromagnético es el único comprobado; los otros ya han dado resultados alentadores.

CAPITULO VI

FACTIBILIDAD

Bajo las condiciones tecnológicas e industriales actuales, sólo existe un proceso de separación isotópica a escala industrial que seguramente se puede implementar, desarrollar y administrar. Se trata del intercambio químico para obtención de agua pesada. La modalidad de operación puede ser el G-S o bien un $\text{NH}_3\text{-H}_2$, aprovechando el gas natural de que se dispone, siguiendo la alternativa propuesta para México (14). La modalidad de operación depende básicamente de un cuidadoso estudio económico de las posibilidades viables y encontrar la óptima.

Esto parece inclinar a México a un ciclo con reactores tipo Candu (HWR); esto representaría ciertas ventajas en el desarrollo futuro de la fusión, pues se contaría con una de las industrias de suministro de combustible para este sistema. Sin embargo, esta no es condición suficiente para concluir que deba efectuarse el plan nuclear eléctrico nacional de esta manera, ya que éste debe ser estructurado mediante un análisis más completo (91).

Excluir la posibilidad de los LWR es actualmente imposible, ya que se contará con dos unidades en los próximos años, en la planta de Laguna Verde, Veracruz.

Además, los reactores de segunda generación (FBR y HTR) si requieren servicios de separación isotópica en forma de enriquecimiento y reprocesamiento de combustible.

Tomando en cuenta estos dos últimos factores, debemos considerar otros procesos: indudablemente los principales obstáculos para utilizar un proceso de tipo aerodinámico como la difusión gaseosa, la ultracentrifugación, el nozzle, etc. o de otro tipo como el plasma y el laser, etc., son la no disponibilidad completa de información -- tecnológica es decir, se encuentra aún bajo clasificación

Los recursos humanos requeridos por estos procesos son de difícil disponibilidad en el país.

El aspecto económico plantea inversiones muy fuertes y los consumos de energía con sumamente altos, con excepción del laser. Todo ésto representa un esfuerzo enorme, pero que debe hacerse.

El proceso nozzle tiene la ventaja de combinar una tecnología simple que puede ser implementada en el país y un alto desarrollo potencial; esto lo coloca como prospecto potencial.

Los procesos de difusión gaseosa y centrifugación, por las características de su operación y tecnología, sólo pueden intentarse si formamos parte de un consorcio tipo Eurodif o Urenco, o el que surja de la asociación con otros países latinoamericanos, si consideramos un aprovechamiento regional. Por ejemplo, se podría utilizar la energía eléctrica barata que se producirá en la zona colindante de Brasil, Argentina y Paraguay. Los técnicos y especialistas podrían proveerlos los países participantes con más facilidad y la implementación podría ser más rápida y segura.

Este aprovechamiento regional es factible, pero la inestabilidad política de algunos de estos países, hacen difícil la realización del proyecto.

El resto de los procesos aerodinámicos están en etapa de experimentación y se desconocen sus complicaciones y potencial a nivel industrial. Tal vez deban considerarse en un futuro.

Los procesos de plasma centrífuga y laser son de un especial interés: por un lado sus costos son especialmente bajos y atractivos para procesar uranio o agua pesada; por otro su versatilidad de separación de isótopos ligeros hasta pesados, los hacen de interés no sólo a nivel industrial, sino al de investigación.

Otros factores determinan con más fuerza la necesidad de implementarlos e investigarlos: su potencialidad de ser utilizados para todo isótopo conocido colocan estos procesos como los únicos viables para realizar el procesamiento de combustible de una manera óptima y aún realizar el enriquecimiento requerido por los reactores de segunda generación o cría.

Además estos sistemas, el plasma y laser, son los utilizados para lograr más tarde la fusión. Una implementación y estudio temprano nos proveería de los técnicos y científicos que se requerirán en un futuro para las plantas de fusión.

Las recomendaciones sobre el laser son particularmente buenas y sería adecuado implementar una industria nacional de lasers. Su aplicación a la química es especialmente valiosa (77), podría muy bien estructurarse a la industria nuclear.

En este aspecto, sugiero se tracen planes de estudio de viabilidad y se active un intercambio de información o se trate de formar un consorcio con países como USA, URSS, RFA o Canada, que hacen estudios intensivos de laser para obtener agua pesada y uranio. El resto de los procesos no alcanza el nivel industrial y su potencial es reducido, - por lo que habrá que esperar más datos.

CAPITULO VII

PARTICIPACION EN LA INDUSTRIA NUCLEAR IMPORTANCIA ESTRATEGICA

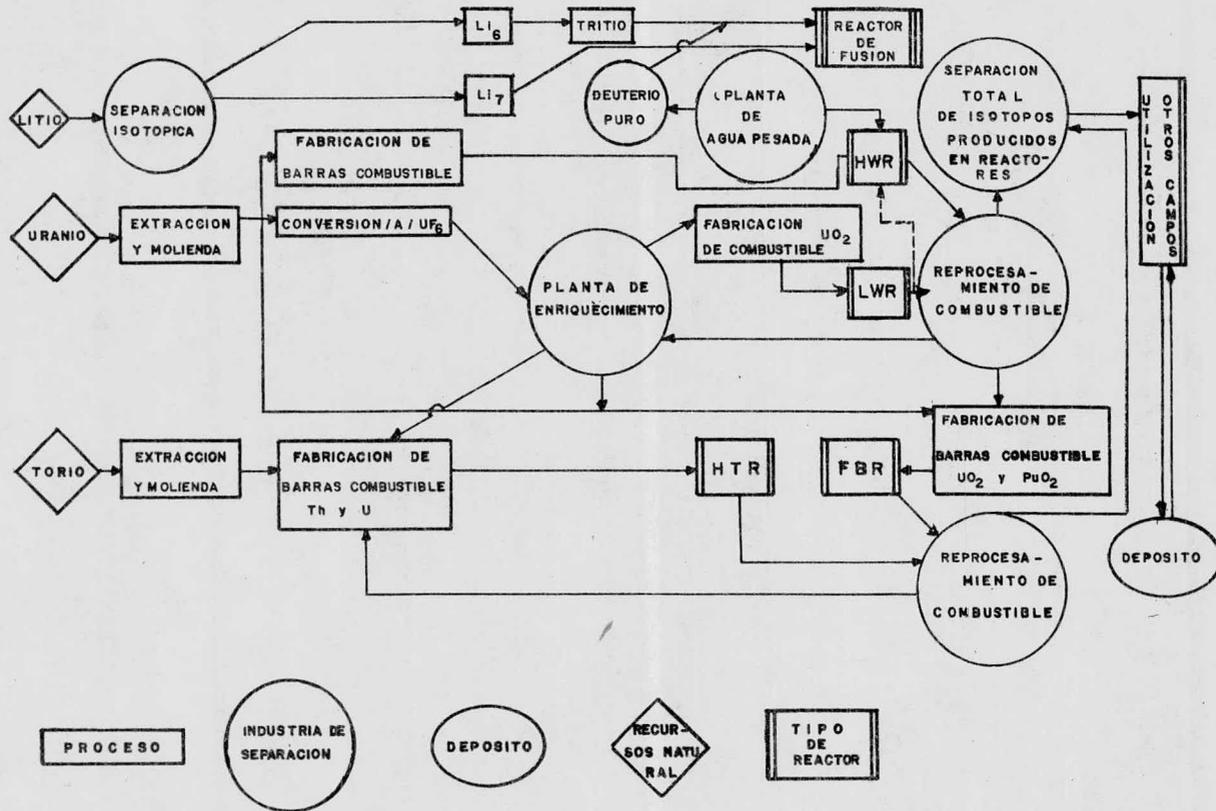
Desarrollar una industria nuclear es básicamente la implementación de una serie de procesos estrechamente vinculados entre sí por requerimientos de una secuencia de extracción-preparación-utilización y reutilización del combustible.

La separación de isótopos es uno de los procesos involucrados en el ciclo y por consiguiente una de las industrias accesorias.

La participación que tiene este proceso en cualquiera de los posibles ciclos, es como sigue:

Si el ciclo es de uranio natural y con reactores HWR, básicamente Candu (83, 82); no se requiere enriquecimiento de uranio, pero sí grandes cantidades de agua pesada (D_2O).

Si el ciclo es de uranio (Ver Fig. 20), pero con reactores LWR, se requiere enriquecer el uranio hasta un 3% en U-235 (84). Ambos reactores, HWR y LWR, no "quemán" totalmente su combustible y además producen plutonio; lo que hace necesario el reprocesado respectivo; éste puede considerarse como hemos visto, una separación isotópica con la ventaja de que se utilizarían la mayoría de los 450 núclidos producidos por la fisión. Si queda algún remanente no útil, deberá llevarse a depósitos adecuados --



- FIGURA 20 -

hasta el término de su actividad radiactiva.

El plutonio recobrado de estos reactores, que son los de primera generación, será posteriormente utilizado en los de segunda generación, denominados de crianza o regeneradores.

Existen dos tipos de reactores de crianza o regeneradores (85): el FBR (Fast Breeder Reactor) (86), que utiliza el plutonio como material autofisionable.

Entonces el Pu-239 debe ser separado antes del Pu-240 que no es fisionable: el Pu-239 alimenta al reactor en una proporción del 17%, completando con U-238 como material engendrador; esta mezcla producirá más Pu-239 que debe ser nuevamente reprocesado junto con otros núclidos activos formados durante la actividad del reactor; la separación de isótopos en este caso es mucho más importante.

El otro tipo de reactor de crianza es el HTR (High Temperature Reactor), cuya dependencia del enriquecimiento isotópico es notable (87, 88). En este reactor se utilizará uranio con un enriquecimiento del 93% en U-235 más una cantidad igual de torio-232 como material engendrador de U-233; es decir, el torio-232 por captura neutrónica, da origen a U-233 que es autofisionable. Evidentemente el reprocesado del combustible implica nuevos problemas de separación isotópica.

El U-236 que se genera en este reactor plantea un problema especial: el U-236 es un absorbedor de neutrones y su separación debe ser efectuada del modo más económico posible. Lógicamente se debe pasar por los reactores de primera generación para poder utilizar los FBR. Es un paso ne

cesario y se estima (89) que para el año 2000 no existirán reservas de uranio que sean económicamente explotables para alimentar a LWR. Esto significa que si el uranio no es utilizado en una forma más eficiente, es decir, en reactores regeneradores, llegará a ser un recurso no disponible económicamente.

Solamente los reactores regeneradores producen más combustible del que consumen y se obtiene 50 veces más energía de ellos con la misma cantidad de uranio que utiliza un LWR.

México debe, por consiguiente, reconocer que antes de 30 años deberá tener al menos un reactor regenerador; ya que la industria de reprocesado en este punto es básica. Si se toma el camino de los reactores de crianza lenta o sea los HTR, se deben considerar más seriamente las necesidades de separación isotópica, dado los fuertes enriquecimientos requeridos, así como el reprocesado específico del combustible.

La independencia de estructuración de esta industria (la de separación isotópica) es en este punto de particular importancia estratégica. Si se tiende a adquirir y pagar los servicios de reprocesado y enriquecimiento de combustible, se dependerá de la política seguida por el país que efectúe el trabajo. Actualmente existen fuertes restricciones en el desarrollo de los FBR, básicamente producidas, por el temor de utilizar el plutonio que se requiere con fines bélicos, lo que hace pensar en una negativa de los servicios de reprocesado y aún de enriquecimiento del combustible de parte de los países que pueden darlos (90)

y en un retraso del programa de desarrollo nuclear que no considere este aspecto.

Cualquiera que sea el modelo seguido por México en la utilización de sus recursos nucleares, debe de ir estructurado a un modelo nacional energético, junto con --- otros recursos disponibles (91).

Las condiciones actuales nos dan un cierto margen de seguridad en el suministro de petróleo, pero los 75 años de disponibilidad de este recurso (92), no permiten tomar lo para quemarlo, en vez de utilizarlo en la industria petroquímica.

La energía eléctrica que se obtiene de nuestros recursos hidráulicos no aumentará mucho con respecto a lo que ahora se obtiene y debemos pensar en otros medios.

Tenemos recursos potenciales que podrían utilizarse a corto plazo; como carbón, geotérmica y eólica (93).

En carbón se cuenta con una reserva comprobada de 0.82×10^9 ton., y en 1985 empezará a funcionar una planta carboeléctrica que utilizará 5.6 millones de toneladas de carbón anualmente.

En geotermia se han reconocido 120 zonas de uso potencial y se planea obtener entre 1000 y 7000 MWe de estos campos. Además existe la posibilidad de obtener litio de estos mismos, a razón de 5000 ton. de carbonato de litio por año (91).

La eólica no ha sido evaluada, pero su potencial es bajo.

Los recursos a largo plazo son: solar, cría y fusión

La energía solar es factible de ser utilizada. México se encuentra en una zona geográfica de alta recepción-

de luz solar y presenta ventajas para algunas zonas específicas del país; el problema de su utilización radica en encontrar los medios adecuados para captarla, almacenarla y transformarla en una forma utilizable (93).

Los reactores de cría ya fueron analizados anteriormente dentro del esquema de ciclos de combustible.

La fusión requiere de una fuerte industria separativa para obtener el combustible requerido, cualquiera que sea la modalidad de operación: implosión laser o confinamiento magnético (Tokamak) (8, 9, 10, 94).

El combustible puede ser deuterio-tritio, deuterio-deuterio o boro 11 + hidrógeno.

La forma de colección de la energía producida durante la reacción de fisión se debe hacer mediante pantallas colectoras y transmisoras de calor muy efectivas y para esto se requerirá de litio-6 y litio-7; lo que es un trabajo separativo más, aparte del requerido en la preparación de las mezclas combustibles.

Pensando en el futuro plan energético nacional, la industria nuclear y sus recursos uranio y torio deben estructurarse de tal manera que podamos ir adquiriendo la industria y tecnología esencial para el aprovechamiento de los recursos a largo plazo.

Por consiguiente se debe buscar la adquisición de tecnología mediante contratos de transferencia, lo más amplio posibles y buscar una integración rápida y efectiva con partes provenientes de una industria nacional de bienes de capital que requiera este sector energético (94).

La adquisición de tecnología también debe generar un

plan de investigación sobre desarrollo posterior de ella y evitar gastos de adquisición subsecuentes. Sin esta tendencia, la dependencia y descapitalización del sector energético será irreversible a largo plazo.

Un posible modelo energético de carácter cualitativo, podría ser el que aparece en el esquema siguiente (Fig. - 21). Este modelo es prácticamente el propuesto por Lartigue, J. (Ver referencia 91), con algunas modificaciones. Las consideraciones y factores que fueron tomados en cuenta siguen siendo válidos en su carácter cualitativo; en el cuantitativo se han producido algunos cambios, pero todos ellos favorables al modelo.

En el esquema se analizan tres componentes: recursos, procesos y usos.

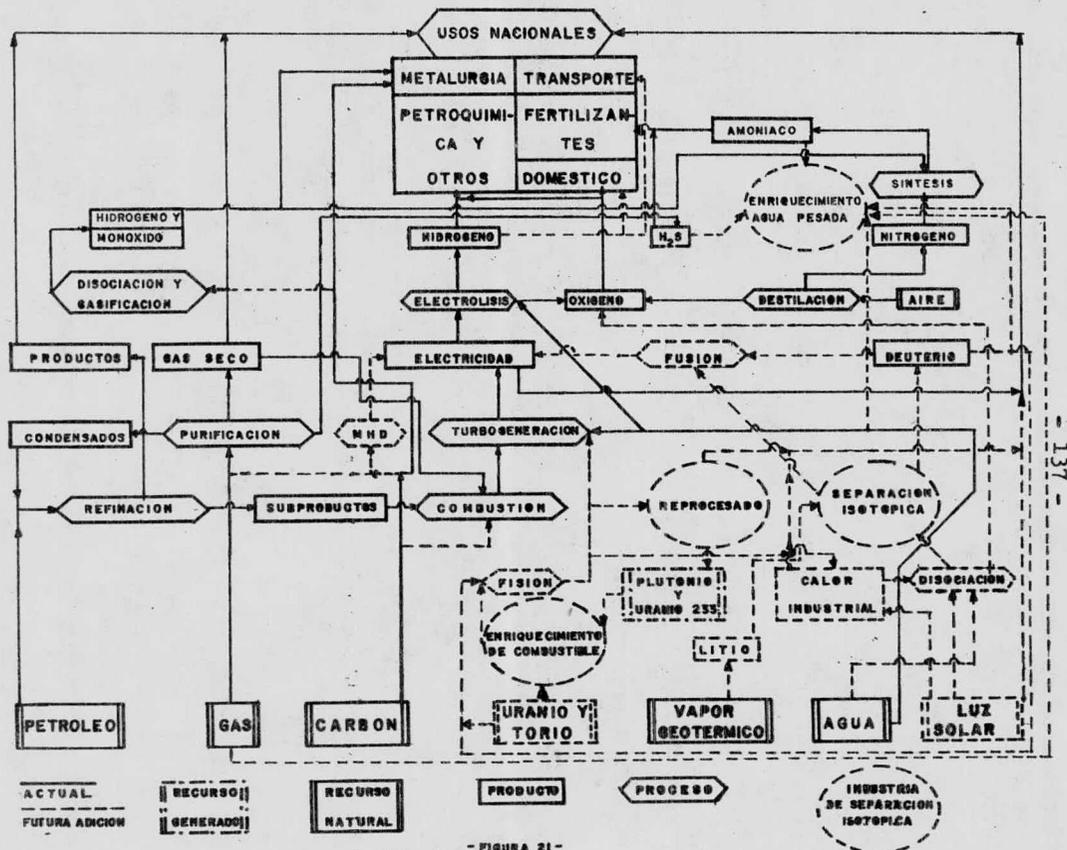
Se considera que los recursos son físicamente inviables, pero económicamente sí lo son.

Los procesos deben ser considerados en función del costo y disponibilidad de tecnología.

El uso depende básicamente de la futura estructura industrial, lo que significa una gran variedad de modalidades posibles y propone su consideración a la estructura futura de energía mediante la codificación de las alternativas óptimas desde el punto de vista económico en función del tiempo para poder cuantificar las posibilidades de este esquema.

El esquema tiene los siguientes postulados de construcción:

- 1.- La energía hidráulica y geotérmica será ocupada únicamente en generar electricidad; las reservas de uranio para electricidad, calor industrial y desalación.



- FIGURA 21 -

- 2.- Carbón e hidrocarburos serán la fuente principal de energía, usando una pequeña fracción para electricidad.
- 3.- La crisis energética lleva a la búsqueda de nuevos métodos de conversión de energía. Uno de estos esfuerzos debe de ir encaminado a producir un combustible sintético secundario que pueda ser barato y fácil de obtener. Dentro de una economía que tiende a ser fundamentalmente eléctrica, en su transformación de energía se requerirá de un combustible químico como complemento y el más viable es el hidrógeno (96).
La búsqueda de transductores de energía también será encauzada a la obtención de modelos más eficientes como el MHD y las celdas de potencia.
- 4.- El incremento en el consumo de energía eléctrica de un 20% hasta 2000, registrará un cambio hasta el 40% y será cuando la fusión llegue a ser comercial.
- 5.- Los materiales extraídos de la corteza terrestre (hidrocarburos, carbón, uranio y vapor geotérmico) son considerados como fuentes de energía.
Las modificaciones de este esquema consideran también la energía solar; la eólica, dado su bajo potencial no se toma en cuenta; el plutonio y U-233 se consideran como recursos generadores.
- 6.- Se asume que el amoníaco seguirá siendo el principal elemento de fertilización del suelo.

7.- La importancia de la industria de separación iso
tópica en este plan nacional está señalada por -
círculos en el esquema.

CONCLUSIONES

ASPECTOS TECNICOS

- 1.- El proceso de intercambio químico para obtención de agua pesada es el más factible de implementar en México.
La modalidad que deba utilizarse debe ser objeto de un amplio estudio.
La decisión de construir una o varias plantas, depende primariamente de la utilización de reactores tipo Candu, en el plan núcleo-eléctrico nacional.
- 2.- Utilizar reactores que no requieran servicios de enriquecimiento de uranio en la fase inicial, no excluye de ninguna manera la necesidad de la industria de enriquecimiento de uranio en el futuro. Los reactores de segunda generación FBR y HTR, especialmente el segundo tipo, tienen fuertes requerimientos de separación isotópica (Ver Capítulo VII) y no sólo se usarán para uranio. Además se han adquirido ya dos reactores LWR que requieren el servicio de enriquecimiento de uranio.
- 3.- Intentar la construcción de una planta de enriquecimiento de uranio con los procesos de difusión gaseosa o centrífuga, es sumamente difícil en las condiciones actuales ya que se carece de personal, financiamiento, técnica y energía. La única posibilidad que tenemos con estos procesos estaría encaminada a-

- buscar una asociación con países de capacidad técnica reconocida y formar parte activa de esta asociación - con goce del servicio. Se podría intentar un aprovechamiento regional con otros países latinoamericanos.
- 4.- El proceso nozzle tiene una tecnología simple y las posibilidades de implementación son favorables. Sería importante ampliar estudios de viabilidad de este proceso.
 - 5.- En las posibilidades de otros procesos de tipo aerodinámico como son: el Fenn, Vortex, Proceso de Invasión, Rayos Moleculares Cruzados, la recomendación sería en el sentido de observar su desarrollo hasta que adquieran cierta madurez y poder asignarles un potencial de utilización. Esta misma apreciación es adecuada para el intercambio químico en sistemas (U-IV - U-VI).
 - 6.- El proceso de plasma centrífuga puede llegar a ser económico; su implementación y tecnología son relativamente fáciles de lograr y su amplitud de operación, tanto para isótopos ligeros como pesados, así como su utilidad didáctica para capacitación de personal en plasma y su futura utilización en la fusión, lo hacen de gran interés.
 - 7.- El proceso laser presenta las mismas posibilidades e importancia que el plasma para la fusión. Su mayor versatilidad lo coloca como el prospecto más importante de todos los actuales. Su implementación es factible en México y su importancia en otras industrias es creciente y será muy requerido en el futuro.

- 8.- La industria de reprocesado será mejor empleada si la utilización de los isótopos producidos en cualquier reactor es completa. Esto es posible si se trabaja como una industria de separación isotópica, el instrumento que abre esta posibilidad es el laser, además el plasma centrífugo puede también ser aplicado. Es altamente recomendable empezar a investigar este aspecto.
- 9.- Los procesos electromagnéticos; calutrón y plasma centrífugo, así como proceso laser son los más versátiles y útiles para cualquier separación isotópica. El laser es el de mayor potencial económico y tecnológico.

ASPECTOS ECONOMICOS

- 1.- Los mejores parámetros de evaluación económica para un proceso de separación isotópica son:
- a) El costo de UTS
 - b) El costo del producto
- 2.- Los procesos más económicos analizados en este trabajo son de acuerdo a los parámetros anteriores:
- a) El laser y plasma, ambos en desarrollo hacia nivel industrial.
 - b) El nozzle y centrífuga, ambos ya trabajando a nivel industrial.
 - c) Para nivel de investigación siguen siendo importantes los de difusión térmica y el electromagnético-calutrón; pero el laser tiende a desplazarlos por la gran versatilidad que tiene.

- 3.- El reprocesado de combustible puede llegar a ser una de las fuentes principales de ingresos monetarios a la industria nuclear, si se utiliza el sistema laser de separación isotópica y se amplía la aplicación de isótopos radioactivos a otros campos.

ASPECTOS GENERALES

- 1.- La industria de separación isotópica tendrá una importancia estratégica en el desarrollo y utilización de nuestros recursos energéticos, debido a los requerimientos de esta industria en fisión (reactores de segunda generación) y fusión principalmente.
- 2.- La disponibilidad de algunos isótopos catalizará avances en otros campos como en la electrónica, mediante el desarrollo de nuevos materiales superconductores. En otros campos también se preve gran desarrollo de investigación y aplicación.
- 3.- Se debe empezar a desarrollar un congruente plan energético nacional. Planear la formación de personal técnico y científico para satisfacer las demandas respectivas. Programar las industrias que se irán requiriendo y crear un adecuado sistema de investigación accesoria de estas industrias.
- 4.- La industria mundial de separación isotópica tendrá dificultades para aportar sus servicios por saturación de sus plantas en la década de los ochentas; por ello, es conveniente planear nuestras necesidades y la implementación de la industria en caso de requerirla.

- 5.- Las condiciones de dificultad tecnológica de implementar estas industrias, hacen necesario estudiar la posibilidad de hacerlo como miembro de algún consorcio de carácter internacional y se necesita estudiar las más convenientes. Si se hace el ciclo con reactores tipo Candu, el socio adecuado será Canadá, pues mantiene investigaciones en laser para agua pesada y uranio.
- 6.- El recurso que escasea es el que se encarece: el uranio es el recurso limitante en el desarrollo de la industria nuclear. El deuterio es un recurso de gran abundancia y disponibilidad, por lo que la construcción de una industria nucleoelectrica con reactores Candu parece ser la más adecuada, más aún si consideramos que el deuterio es un combustible de uso futuro para las plantas de fusión termonuclear controlada.

B I B L I O G R A F I A

- 1.- Wash 1139 (74).- "Nuclear Power Growth 1974-2000".- 1974.
- 2.- Nuclear Power, Uranium Enrichment and Ore Projections Throught Year 2000.- Lawrence Livermore Laboratory, -- U.S. ERDA.- 1975.
- 3.- J.C. Vanderleeden.- Laser Focus.- 1977.
- 4.- Congreso Nacional de la Academia de Ciencia y Tecnología Nucleares.- Panorama del Suministro de Uranio Enriquecido.- Antonio Ponce M.- INEN.- Segundo Congreso AMECYTEN.
- 5.- KOA-2707 "Remarks on Wold-Wide Uranium Enrichment Capacity Plants Out Side of the USA".- Levin, Abril 30, 1977.
- 6.- IAEA-CN-36/183.- "Canadian Heavy Water Production".
- 7.- A. Baruffa & M. Davies.- "Satisfying the Enrichment - Uranium Needs of the European Community".- Paper 25 - Bnes.- Proceedings on ...
- 8.- John L. Emmett, Nuckolls.- "Fusion Power By Laser Implosion".- Scientific American, Junio 1974.
- 9.- IAEA-CN-35/FS.- "Thermonuclear Fusion Plasma by La--- sers Coupling and Implosion".- Yamanaka M. Yokoyama.
- 10.- Fusion Power.- Is It All Coming Together?.- Popular - Science, Agosto 1974.
- 11.- N. David Mermin y David M. Lee.- "Helio 3 Superfluido" Investigación y Ciencia.- Febrero 1977.
- 12.- Benedict & Pigford.- "Nuclear Chemical Eng.". - McGraw Hill, 1957.

- 13.- Kaplan, I.- "Nuclear Physics".- Segunda Edición.- -- Addison-Wesley Publishing Co. Inc., Massachusetts, - 1969.
- 14.- Montes Delgado, Nora Lina.- "Integración de una Industria de Agua Pesada a la Industria Nacional del NH_3 " Facultad de Química, UNAM.- Tesis 1976.
- 15.- Proc. Of The Symposium On Isotope Separation.- Amsterdam 1957.- Parte VI, Pag. 419-506.
- 16.- Fucugauchi de Santiago, Luz Alicia.- "Separación de - Isótopos del Boro por Difusión Térmica".- Tesis 1959. UNAM.
- 17.- Morales Cruz, Concepción.- "Enriquecimiento de Uranio por Difusión Térmica".- Tesis 1969.- UNAM.
- 18.- Separación de Xenon 124 por Difusión Térmica.- Tesis, 1966.
- 19.- R. Clark Jones & W. H. Furry.- "The Separation of --- Isotopes by Thermal Difusion".- Rev. of Modern Physics Vol 18, No. 2, Abril 1946.
- 20.- L.N. Chamberlain, Jab Gresley, Mellog, Steede y Stocks chlaeder.- "Operational Experience on Centrifuge Enrichment Plants".- Paper 15.- Proceedings of Int. Conf. on Uranium Isotope Separation.- Bnes, London 1976, 99-107.
- 21.- C. Frejacques, M. Gelee, Massignon, Perrault y P. Plurien.- "Frenchstudies on Uranium Isotope Separation - Apart from Gaseous Diffusion".- Paper 13.- Proc. of - Int. Conf. On Uranium Isotope Separation.- Bnes, London, 1976, 83-88.

- 22.- C. Allday y R.B. Kehoe, Urenco Ltd.- "Urenco-Centec Progress and Plants".- Paper 18.- Proc. of Int. --- Conf. on Uranium Isotope Separation.- Bnes, London-1976, 125-130.
- 23.- Groth W. Et Al.- "Uber Das Trempotential Thermisch-Gesteurtes Ge Genstrum-Gaszentrifugen".- Z. Physik Chem., 1959, 19 de enero.
- 24.- Olander, D.R.- "Technical Basis of the Gas Centrifuge".- Advances in Nuclear Science and Technology.- Vol 6, Academic Press, New York, 1972.
- 25.- N. Ozaki e I. Harada.- "Optimization of the Cascade with Gas Centrifuges for Uranium Enrichment".- Paper 22, Proc. of Int. Conf. on Uranium Isotope Separation, Bnes, London 1976, 165-172.
- 26.- P.F. Schutt y M.H. Chaffin.- "A Regional Approach - to Enrichment".- Paper 19.- Uranium Isotope Separation, Bnes, London 1976, 131-137.
- 27.- Sand-77-0021.- "Seven Schemes for Aerodynamics Separation of Isotopes".- K.J. Touryan 1977.
- 28.- K/OA-2872.- "Aerodynamics Isotope Separation Processes for Uranium Enrichment, Process Requirements".- Malling, Halle.- Agosto 1976.
- 29.- IAEA-CN-36/257.- "Evolution Des Procedes De Separation Des Isotopes De L'Uranium".- C. Frejaques, Ge Lee.- Mayo 1977.
- 30.- Becker Et Al.- "The Nozzle Process for Enrichment - of U-235".- International Conference on the Peaceful of Atomic Energy.- Geneve 1971.

- 31.- Becker Et Al.- "Physics and Development Potential of the Separation Nozzle Process".- Paper 1, 3-10.- "Current Status of Separation Nozzle Technology".- - Paper 2, 11-16.
Geppert H. Et Al.- "The Industrial Implementation of the Separating Nozzle Process".- Paper 3, 18-26.- En Proc. of Int. Conf. on Uranium Isotope Separation, - London, 1976.
- 32.- IAEA-CH-36/100.- "The Separation Nozzle Process for Uranium Isotope Enrichment".- Becker
- 33.- C.C. Hopkins.- "Operating Experience with US Gaseous Diffusion Plants".- Paper 14.- Proc. of Int. Conf. - on Uranium Isotope Separation.- Bnes, London 1976, - Pag. 91-98.
- 34.- B. Besse.- "The Eurodif Program-Present Status of the Project".- Paper 17,- Proc. of Int. Conf. on Uranium Isotope Separation.- Bnes, London, 1976, 115-123.
- 35.- G.B. Scuricini.- "Research and Development Activities in the Field of Uranium Enrichment".- Paper 31.- Proc. of Int. Conf. on Uranium Isotope Separation.- Bnes,- London, 1976.- 241-242.
- 36.- Present y Polland.- Physics Rev., 73: 7262.- 1948.
- 37.- Proc. Int. Conf. Symposium on Isotope Separation.- - 1957, Amsterdam.- Reporte VII.- Pag. 511-560.
- 39.- IAEA-CN-36/325.- "Technical and Economic Aspects of New Gaseous Diffusion Uranium Enrichment Capacity".- Langley y O'Donnel, Mayo 1977.

- 40.- J.H. Coates, J.C. Guais y G. Lamorlette.- "Some Theoretical Aspects of Capacity Increment in Gaseous Diffusion".- Paper 20.- Proc. of Int. Conf. on Uranium-Isotope Separation.- BNES. London, 1976, 143-149.
- 41.- J.C. Guais.- "Hierarchical Optimization in Isotope Separation-Gaseous Diffusion Plant-Cascade-Stage- -- Principle and Applications".- Paper 21.- Proc. of -- Int. Conf. on Uranium Isotope Separation.- BNES, London, 1976, 151-164.
- 42.- COO-2878-2.- "Study of the Prospects for Heavy Water Production Via Laser Isotope Separation".
- 43.- Campargue, R.- "Aerodynamics Separation Effect on -- Gas and Isotope Mixtures Induced by Invasion of the Free Jet Shock Wave Structure".- J. Chem. Phys. - -- 1970, 52, 4, 1975.
- 44.- Barr F. y Drews W.- "The Future for Cheap Heavy Water".- Chem. Eng. Progrs. 56, 49, Marzo 1960.
- 45.- C.H. Hardy.- "Recent Experimental and Assessment --- Studies of Uranium Enrichment by Ion Exchange".- --- Paper 12.- Proc. of Int. Conf. on Uranium Isotope -- Separation.- BNES, London, 1976, 77-81.
- J. Chatelet, M. Luce, P. Plurien y P. Rigny.- "Chemical Exchange Between UF_6 and UF_6 Ion in Anhydrous -- Hydrofluoric Acid".- Paper 30.- Proc. of ..., 1976,- 235-240.
- 46.- Kakihana Et. Al.- Proc. Third Conf. Peaceful Uses of Atomic Energy, ONU, New York, 1965, 12, 342.
- 47.- Nucleonics Week, 1971, Feb. 4, 4.

- 48.- IAEA-CN-36/183.- "Canadian Heavy Water Production".- Dahlinger, A. Lockerey y Raea, Mayo 1977.
- 49.- Robert E. Treybal.- "Mass Transfer Operation".- Ed.- McGraw Hill.
- 50.- Phys. Rev. 40: 1, 1932.
- 51.- T. M. Flynn.- "Pilot Plant Data for Hidrogen Isotope Destillation".- Chem. Eng. Progs. Marzo 1960.
- 52.- Treviño Arispe, Roberto.- "Estudio del Equilibrio en tre el Hidrógeno y sus Isótopos". Tesis, UNAM, 1953.
- 53.- García Colin, L.- "Estudio de la Cte de Equilibrio y de la Velocidad de la Reacción entre H_2 , HD y D_2 ".- Tesis, UNAM, 1953.
- 54.- García Colin Scherer, Leopoldo.- "Sobre las Propieda des Termodinámicas del D_2 y del HD".- Tesis, UNAM, - 1953.
- 55.- Benedict M.- "Review of Heavy Water Production - -- Process".- Proc. of Int. Conf. on the Peaceful Uses- of Atomic Energy.- Vol 8, P. 377. 1956, New York.
- 56.- Urey H. C. (J. Chem. Soc. 1947: 562).
- 57.- Electromagnetic Isotope Separators and Related Acele rators.- Proc. of Int. Conf. on Electromagnetic Iso- tope Separators and Related Ion Accelerators 9th.- - Mayo 10-13, 1976.
- 58.- Alonso Finn.- Física, Vol II Campos y Ondas.- Fondo- Ed. Interamericano.
- 59.- J. Slepian.- Proceedings International Symposium on- Isotope Separation.- 1958.
- 60.- Millar, D. D. y C. N. Watson-Munro.- Proceedings VII Int. Conf. on the Phenomena in Ionized Gases 2, 783- Bradevinska, Belgrado, 1966.

- 61.- Boeschoten, F.- Pl. Physics. 9, 745.- 1967.
- 62.- Bonnevier, B.- Pl. Physics. 13, 763.- 1971.
- 63.- James, B. N. y S. N. Simpsons.- Phys. Letters. 469, -
357.- 1974.
- 64.- Heller H. y M. Simon.- Phys. Letters.- 1975.
- 65.- IAEA-CN-36/12.- "New Process for Uranium Isotope Separation".- Vanstrum y Levin.- Mayo 1977.
- 66.- Rynn N. y D'Angelo N.- Rev. Sci. Instruments 1960, -
31, 1326.
- 67.- Nathrath, N.- P245 in Proceedings of the 11th Int. -
Conf. on the Physics of Ionized Gases.- Praga, 1973.
- 68.- Hashmi y Houven.- "One Step Separation of Isotopes -
Using a Uranium Plasma Proceedings".- BNES. Uranium-
Isotope Separation, London, 1976.- Paper 7.
- 69.- Smith L. P., Perkins W. E. y Forester A. T.- Phys.--
Rev. 1947, 72. 789.
- 70.- Nathrath, Mc Clure, Much y Simon.- "Isotope Separation
in Rotating Plasmas".- Paper 8.- Proc. Uranium-
Isotope Separation.- BNES, London.- 1976.
- 71.- Mc Donald G. C. y Cumming, H. E., J. Chem. Phys. 20,
1817, 1952.
- 72.- K-L-305L Oak Ridge, Report, Rev. 1, 1972.- Farrar, -
R. L. y Smith, D. F.
- 73.- Richard N. Zare.- "Laser Separation of Isotopes". --
Scientific American, Feb. 1977.
- 74.- Jetter Et. Al.- "Uranium Isotope Separation Using Ir
Lasers".- Paper 4.
Nebezahl.- "Some Technical Aspects of the Laser Iso-
tope Separation Method".- Paper 5.

- Allen y Tait.- "Laser Isotope Separation".- Paper 6.
In Proc. on Uranium Isotope Separation.- BNES, Lon--
don, 1976.
- 75.- Laser Focus, Agosto 1974.
- 76.- UCRL Report 75696, Tuccio, S.A., Dubrin, J.W. Peter-
son, O.G. y Snavely.- Junio 1974.
- 77.- Moore, Charles Bradley, Date.- "Chemical and Biochemi-
cal Applications of Lasers".- Vol. III. Academic ---
Press 1977.
- 78.- COO-2878-2 "Study of the Prospects for Heavy Water -
Production Via Laser Isotope Separation".- Agosto --
1976.
- 79.- Justin T. Lang Gordon.- "Engineering for Nuclear - -
Fuel Reprocessing".- Sc. Publishing.
- 80.- Bebbington, W.P.- "The Reprocessing of Nuclear Fuels"
Sc. American, Diciembre 1976.- Investigación y Cien-
cia, Enero 1977.
- 81.- Aguilar Gómez, M. y Guerrero Aguirre, A.- "Reprocesa-
miento Químico de Combustible Nuclear".- Tesis, UNAM,
1976.
- 82.- McIntyre, Hugh C.- "Natural-Uranium Heavy-Water Reac-
tors".- Scientific American, Octubre 1975. Vol 233 -
No. 4.
- 83.- Proceedings of the Joint CNA-AECL Symposium on Nuclear
Energy.- Atomic Energy of Canada Limited.- Ottawa, -
1974.
- 84.- Triplett B., Mark.- "Simulation of the Nuclear Power
Economy".- Nuclear Technology, Vol 35, Mid-August --
1977.

- 85.- Weinberg, Alvin M.- "Breeder Reactors".- Scientific American.
- 86.- Vendryes, Georges A.- "Superphenix: A Full-Scale -- Breeder Reactor".- Scientific American, Vol 236, -- No. 3, Marzo 1977.
- 87.- Beese, James G.- "Slow Breeder-Makes Its Own Nuclear Fuel".- Popular Science, Abril 1978.
- 88.- R. C. Dahlberg.- "Effects of U-236 and other Uranium Isotopes on HTGR Fuel Cycle".- Paper 23.- Proc. of - Uranium Isotope Separation. Bnes, London 1976, 173--181.
- 89.- The Breeder: When and Why.- EPRT Journal, Vol 1, No. 2, marzo 1976.
- 90.- Rose, David J. y Lester, Richard K.- "Nuclear Power, Nuclear Weapons and International Stability".- Scientific American, Vol 238, No. 4, Abril 1978.
- 91.- Lartigue G., Juan.- "México: A National Energy Model" Hydrocarbon Processing.- Septiembre 1976.
- 92.- Puente L., Jesús.- "Petróleo y Gas".- Bases para una Política Nacional de Energético CNEAC-22, Febrero -- 1978.
- 93.- Vázquez R., Mario.- "Fuentes Alternativas a Largo -- Plazo: Solar, Cría y Fusión".- Bases para una Política Nacional de Energéticos.- Colegio Nacional de Economistas, A.C.- 22 de Febrero, 1978.
- 94.- Nuckolls, Lowell Wood y Zimmerman.- "Laser Compression of Matter to Superhigh Densities: Thermonuclear Application".- Nature, Vol 239, Septiembre 15, 1972.

- 95.- Eibenschutz, Juan.- "Los Energéticos y la Industria Nacional de Bienes de Capital".- Revista IMIQ.
- 96.- Gregory y Derek P.- "The Hydrogen Economy".- Scientific American, Enero 1973. Vol 228 # 1.
- 97.- Morales, Arnulfo.- "Uranio".- Bases para una Política Nacional de Energéticos.- Colegio Nacional de -- Economistas, A.C.- 22 Febrero, 1978.