

00576  
1ej. 7.



Universidad Nacional Autónoma de México

FACULTAD DE QUIMICA  
DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO

FACTIBILIDAD DE UNA INDUSTRIA  
DEL LITIO EN MEXICO

T E S I S  
QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:  
MAESTRIA EN CIENCIAS NUCLEARES  
P R E S E N T A:  
MARTIN JESUS SOBERON MOBARAK

México, D. F.

1986

TESIS CON  
FALSA DE ORIGEN



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 está 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.

## FACTIBILIDAD DE UNA INDUSTRIA DEL LITIO EN MEXICO

**RESUMEN.**- La evolución social exige fuentes de energía barata y limpia que no agoten los recursos naturales no renovables; la fusión termonuclear controlada se presenta como la respuesta más viable. La primera generación de reactores de fusión consumirá deuterio y litio; los cálculos indican que se necesitarán unos 190KgLi/MWt que para los reactores en construcción significan 20,000 tons. de Li. Los usos energéticos y convencionales del Li demandan que la producción crezca al 10% anual; México importa Li a pesar de contar con recursos del metal, de los que la salmuera geotérmica de Cerro Prieto B.C. es una fuente inmediata. Se propone un método de evaporación solar y precipitación alcalina para la obtención de 7,300 ton  $\text{Li}_2\text{CO}_3$ /año y subproductos con valor de 54 millones de dls., cuya evaluación financiera lo hacen atractivo.

## FEASIBILITY OF A LITHIUM INDUSTRY IN MEXICO

**ABSTRACT.**- Social evolution demands clean and unexpensive sources of energy which do not deplete non-renewable natural resources; controlled thermonuclear fusion presents itself as the more likely answer. The first generation of fusion reactors will consume deuterium and lithium; calculations show that 190 KgLi/MWt are required, which means that 20,000 tons. of lithium will be needed for the reactors under construction nowadays. Energetic and conventional uses of Li demand a 10% yearly production increase; Mexico imports Li notwithstanding counts with metal reserves; brines from the geothermal wells in Cerro Prieto, B.C. are an immediate source. A proposal is made to recover 7,300 tons/year of  $\text{Li}_2\text{CO}_3$  and some other by-products with a total value of 54 million dls. per year by solar evaporation of the brine and alkaline precipitation. The economics of the project make it highly attractive.

# I N D I C E

<b>CAPITULO I.</b>	<b>ANTECEDENTES</b>	<b>1</b>
	<b>I.1. HOMBRE, ENERGIA Y SOCIEDAD</b>	<b>1</b>
	<b>I.2. CONDICIONES DE LA FUSION</b>	<b>7</b>
<b>REFERENCIAS</b>		<b>22</b>
<b>CAPITULO II.</b>	<b>CARACTERIZACION DEL LITIO</b>	<b>23</b>
	<b>II.1. QUIMICA</b>	<b>23</b>
	<b>II.2. METALOGENESIS, OCURRENCIA Y RECURSOS</b>	<b>29</b>
<b>REFERENCIAS</b>		<b>56</b>
<b>CAPITULO III.</b>	<b>APLICACIONES DEL LITIO</b>	<b>37</b>
	<b>III.1. GENERALES</b>	<b>37</b>
	<b>III.2. NUCLEARES</b>	<b>51</b>
<b>REFERENCIAS</b>		<b>61</b>
<b>CAPITULO IV.</b>	<b>DISEÑO DEL MANTO DE UN REACTOR DE FUSION</b>	<b>62</b>
	<b>IV.1. FLUJO Y BALANCE ENERGETICO</b>	<b>62</b>
	<b>IV.2. CALCULO DEL MANTO</b>	<b>67</b>
<b>REFERENCIAS</b>		<b>83</b>
<b>CAPITULO V.</b>	<b>MERCADO DEL LITIO</b>	<b>84</b>
	<b>V.1. DEMANDA Y PRECIOS HISTORICOS</b>	<b>84</b>
	<b>V.2. CAPACIDAD INSTALADA</b>	<b>89</b>
	<b>V.3. MERCADO DEL LITIO PARA LA FUSION</b>	<b>92</b>
	<b>V.4. PROYECCION DE LA DEMANDA</b>	<b>94</b>
<b>REFERENCIAS</b>		<b>100</b>
<b>CAPITULO VI.</b>	<b>OBTENCION DE LITIO EN MEXICO</b>	<b>101</b>
	<b>VI.1. CUANTIFICACION DE RECURSOS</b>	<b>101</b>
	<b>VI.2. METODOS DE OBTENCION</b>	<b>102</b>
	<b>VI.3. SELECCION Y PROPUESTA</b>	<b>104</b>
<b>REFERENCIAS</b>		<b>111</b>
<b>CAPITULO VII.</b>	<b>ANTEPROYECTO</b>	<b>112</b>
	<b>VII.1. OPERACION DE LA PLANTA DE <math>Li_2CO_3</math></b>	<b>112</b>
	<b>VII.2. COSTEO Y EVALUACION FINANCIERA</b>	<b>113</b>
<b>CONCLUSIONES</b>		<b>118</b>
<b>BIBLIOGRAFIA</b>		<b>120</b>

## CAPITULO I ANTECEDENTES

### I.1. HOMBRE, ENERGIA Y SOCIEDAD

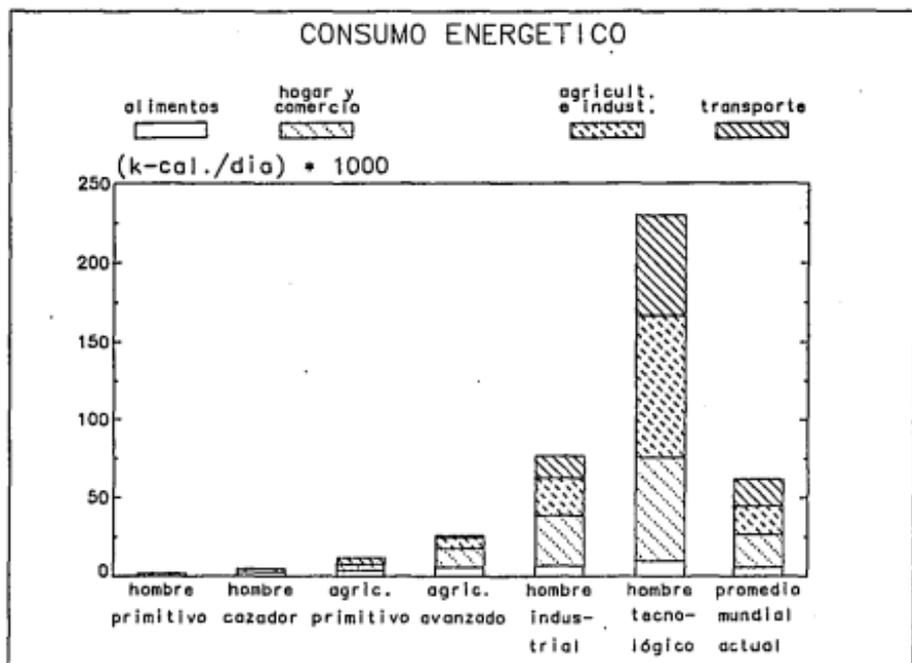
La sociedad contemporánea ha crecido sin comprender completamente la naturaleza de su dependencia de la energía. La civilización moderna, que puede ser llamada civilización tecnológica, con su enorme y complejo catálogo de logros y conquistas del mundo físico ha impresionado y aturcido al público en general, y al proverbial "hombre de la calle" en particular, de tal manera que ha oscurecido la fragilidad de sus propios cimientos.

La dependencia energética de la sociedad es absoluta. La energía es calor, luz, electricidad y capacidad para producir trabajo; constituyendo una preocupación práctica de primer orden. La energía hace crecer los alimentos manteniendo a la gente viva, transportándola, haciendo funcionar sus máquinas, sosteniendo sus diversos sistemas económicos y aún proporcionándole comodidades, diversiones y bienestar. Cuando se cuestiona el suministro de energía, se cuestiona todo lo que de ella depende, no sólo la forma de vida, si no la vida misma.

Los combustibles fósiles (carbón, petróleo y gas natural) conforman el frágil y vulnerable sustento de la sociedad actual. Comida y calor, transporte y empleo, nivel de vida, salud y posibilidades futuras; todo depende de la capacidad de la sociedad para mantener e incrementar el ritmo de los suministros energéticos necesarios. Este suministro debe efectuarse sin alterar los sistemas energéticos naturales del planeta, de los que dependen el equilibrio térmico y el clima, y sin destruir la delgadísima capa

de tejido vivo de la biósfera, de la que forma parte el hombre. Al mismo tiempo, debe prestarse atención, más allá de éstas preocupaciones inmediatas, al inevitable agotamiento de las fuentes de combustibles fósiles y a la necesidad de encontrar sustitutos si se pretende que la civilización moderna sobreviva y evolucione.

El consumo global de energía se ha incrementado de acuerdo al desarrollo de la civilización. De hecho podría pensarse que las civilizaciones son efecto y no causa, de la disponibilidad y capacidad de aprovechamiento de la energía. La demanda energética se ha incrementado bruscamente desde principios del siglo XX cuando varias naciones ingresaron en la edad de la tecnología moderna. Esta demanda es función de dos factores: el incremento de la población y el incremento en el nivel de vida de dicha población. Aunque no existe una forma exacta de definir "nivel de vida", es ilustrativo señalar que los ciudadanos de los países del llamado primer mundo consumen<sup>(1)</sup> un promedio diario de  $230 \times 10^3$  k cal; siendo el promedio mundial de  $62 \times 10^3$  k cal. Lo que explica que el 72% de la población mundial esté debajo del promedio mundial como se muestran en la gráfica siguiente:



Para el año 2000 se estima (Conferencia de Población ONU 1980) una población mundial de unos  $6 \times 10^9$  individuos, los que aún con el consumo promedio diario de energía de 51 kW-h, hacen prever una demanda de 12 TW, contra 9 TW en 1985. Si se espera elevar el nivel de vida promedio a unos 120 kW-h, la demanda sería de 24 TW. Para lograr satisfacer esta demanda, e incluso iniciar hoy la solución de las necesidades que tendrá el mundo para fechas no tan remotas como el 2025; se tendrá que disponer indudablemente de un gran suministro de energía nuclear, ya que seguir quemando combustibles fósiles con el consecuente impacto ambiental causado por la exploración, explotación, acarreo y combustión de petróleo, carbón y gas natural, inclu-

yendo sus peligros (curiosamente ningún grupo "verde" protestó por la explosión de San Juanico que causó varios cientos de víctimas, y casi todos protestaron por el accidente de la isla de Tres Millas que no produjo ni un catarro) -- conducirá a su inevitable (y no tan lejano) agotamiento; -- además de ser una de las más lamentables aplicaciones dadas a los recursos naturales. Por otra parte, las fuentes "renovables" de energía como son: solar, hidráulica, mareomotriz y de olas; eólica, geotérmica, madera y biomasa; aún -- con las más optimistas predicciones, e incluyendo el ahorro y conservación energéticas, no cubrirían más del 10% de la demanda estimada, a menos que sucediera un cambio tecnológico extraordinario en el uso de la energía solar. La alternativa es un decremento en la calidad de vida.

Esto ha sido tan bien comprendido, que en diciembre<sup>(2)</sup> de 1985 se efectuó una reunión del C.A.M.E. que es la agrupación de países socialistas, para planear las acciones conjuntas necesarias para conseguir que en el año 2000, toda la energía eléctrica que se produzca y consuma en esos países sea de origen nuclear. En Europa Occidental se espera que la energía eléctrica para esas fechas sea cuando menos el 50% nucleoelectrónica. Otra noticia significativa la constituye la colocación de 30 órdenes de nuevas plantas nucleoelectrificadas durante 1984. También vale la pena mencionar que se canalizan cantidades astronómicas de dinero a la investigación en energía nuclear, particularmente a fusión termonuclear controlada, destinando a este rubro casi las mismas cantidades aplicadas a las investigaciones militares y del espacio.

La transformación de la energía nuclear en energía útil a género humano, se fundamenta en los Reactores -

Nucleares. Estos son los dispositivos ideados, diseñados, -  
construidos y operados para efectuar reacciones nucleares -  
bajo control, rindiendo un excedente energético adecuado pa  
ra su aprovechamiento. Los reactores nucleares se dividen  
en 2 grandes grupos, de acuerdo al tipo de reacción que se  
lleva a cabo en ellos:

- 1) Reactores de Fisión.- Basados en la fisión de núcleos -  
pesados.
- 2) Reactores de Fusión.- Basados en la fusión de núcleos -  
ligeros.

Del primer grupo existen varias clases y subcla  
sificaciones, de acuerdo al tipo de refrigerante, moderador  
y combustible. Incluso se han descubierto reactores natura  
les en algunas formaciones geológicas. Este grupo está --  
bién desarrollado y operando con éxito comercial desde hace  
unos 30 años; sin que esto signifique que hayan alcanzado -  
la madurez tecnológica, ya que se siguen experimentando, di  
ñando y construyendo nuevos conceptos de reactor de fi--  
sión que son más seguros, rentables y satisfactorios.

Del segundo grupo existen también varias clases,  
basadas en el tipo de confinamiento de los reactivos y el --  
sistema operativo. Aunque todavía no se logra un reactor -  
de fusión que opere en forma continua y comercial; se espe  
ra alcanzar esta meta para la última década del siglo. A -  
este propósito se destinan enormes esfuerzos y recursos, ya  
que su logro significa energía abundante, barata y limpia.

Una visión global de la evolución tecnológica -  
del Reactor Nuclear la dá su clasificación generacional:

- Reactores de 1a. Generación.- En ésta se encuentran los

reactores de fisión quemadores, así llamados -- por que sus productos de desecho no pueden ser usados por ellos mismos, aunque contengan potenciales energéticos importantes.

- **Reactores de 2a. Generación.**- Aquí caen los reactores de fisión reproductores, que son aquellos cuyos -- productos de desecho son más combustible para su propio consumo y para alimentar otros reactores. Incluso convierten las colas de los reactores de 1a. generación en combustible.
  
- **Reactores de 3a. Generación.**- Esta la forman los reactores de fusión TOKAMAK, cuyo confinamiento es -- una cámara magnética tóridal. Sus combusti---bles son D y Li cuya disponibilidad es prácticamente infinita.

La segunda y tercera de las generaciones nombradas son el mejor ejemplo del uso racional y aprovechamiento de los recursos naturales en beneficio del hombre, siendo -- por ésto una gran respuesta a un gran reto.

## I.2. CONDICIONES DE LA FUSION

La fusión nuclear, en su definición más elemental, consiste en unir núcleos ligeros para formar núcleos más pesados, acompañados generalmente de otros núcleos ligeros y partículas. La diferencia másica entre reactivos y productos, llamada "defecto de masa" constituye —de acuerdo al principio de equivalencia de masa y energía— lo que vendría a ser el "calor de reacción", el cual puede ser aprovechado para transformarlo en electricidad.

De hecho, la fusión nuclear es la energía básica de la naturaleza, ya que las estrellas (entre ellas el sol) no son más que reactores de fusión a escala cósmica, de los que deriva la nucleogénesis del universo hasta donde alcanza nuestro conocimiento. La primera experiencia humana en fusión a gran escala, fué la detonación de la bomba de hidrógeno o bomba H en 1952; y desde entonces se han canalizado grandes esfuerzos y recursos para la consecución de la fusión controlada como fuente de energía.

El problema fundamental de la fusión, consiste en que para lograrla, se debe vencer la repulsión eléctrica entre los núcleos, ambos de carga positiva, que se pretende fusionar. La energía potencial de esta repulsión -Coulombiana o barrera de Coulomb se define como:

$$U_{\text{rep.}}^{\text{máx.}} = \frac{Z_1 Z_2 e^2}{4 \pi \epsilon_0 (R_1 + R_2)}$$

Z = N° atómico

e = carga elemental =  $1.602 \times 10^{-19} \text{C}$

$\epsilon_0$  = permisividad del vacío =  $\frac{\text{C}^2 \text{S}^2}{8.854 \times 10^{-12} \text{Kgm}^3}$

con:  $R_i = 1.5 \times 10^{-15} A^{1/3} \text{ m.}$

R = Radio Nuclear      A = Masa Atómica

en donde se observa que a menor número atómico, menor repulsión a vencer, lo que favorece el uso de núcleos ligeros para fusión.

En la tabla I-1 se presentan algunas de las reacciones de fusión estudiadas como candidatas para la fusión termonuclear controlada, con sus respectivas energías de reacción y barreras Coulombianas:

**TABLA I-1**  
**REACCIONES DE FUSION Y SU ENERGETICA**

REACCION	Q (MeV)	$U_{rep}^{max}$ (KeV)
$D + D \longrightarrow He^3 + n$	+ 3.27	380
$D + D \longrightarrow T + H$	+ 4.05	380
$D + T \longrightarrow He^4 + n$	+17.58	355
$D + He^3 \longrightarrow He^4 + H$	+18.34	710
$H + Li^6 \longrightarrow He^4 + He^3$	+ 4.00	1,022
$H + Li^7 \longrightarrow He^4 + He^4$	+17.28	988

A primera vista, la segunda y las tres últimas reacciones parecen muy atractivas por rendir como productos de fusión partículas cargadas, con lo que podría visualizarse un esquema de conversión directa en electricidad. Con la segunda reacción esta ventaja se pierde, ya que ocurre con la misma frecuencia que la primera. La primera y la tercera rinden neutrones con elevada energía cinética, la cual ceden en forma de calor, que a su vez se transforma en electricidad a través de un ciclo térmico; con el correspondiente descenso en la eficiencia -

de conversión.

Por otra parte, se encuentra el problema de vencer la barrera de repulsión. Un acelerador de partículas puede acelerar núcleos a más de 3 MeV, con lo que se rebasarían fácilmente las barreras coulombianas mostradas en la tabla I-1, pero la probabilidad de dispersión de un haz de partículas aceleradas es de  $10^4$  a  $10^6$  veces mayor que la probabilidad de colisión fusionante, lo cual hace que se requiera invertir mucho más energía en lograr la fusión, que el rendimiento energético obtenido de éste modo; además de que la densidad energética lograda sería muy baja para propósitos prácticos. Así que la técnica más viable consiste en confinar los núcleos a fusionar y calentarlos a altas temperaturas dado que la energía térmica promedio de la partícula está dada por:

$$\bar{E} = \frac{3}{2} k T \quad T = \text{temperatura en } ^\circ\text{K}$$
$$k = \text{constante en Boltzmann} = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J } ^\circ\text{K}^{-1}$$

Existen dos esquemas de confinamiento a los que se les ha canalizado una enorme cantidad de recursos: el "confinamiento magnético" que aprovecha que una partícula de carga  $q$  moviéndose a velocidad  $v$  en campos magnéticos perpendiculares, describirá órbitas helicoidales en torno a las líneas de fuerza del campo; y el "confinamiento inercial" que aprovecha la conservación del momento (mv) en la evaporación instantánea del material que rodea al material fusionable para comprimirlo; ésto se expone más ampliamente en la sección III.2.

El calentamiento del material para superar las

barreras coulombianas a través del movimiento térmico aleatorio se muestra en la tabla I-2:

**TABLA I-2**  
**TEMPERATURAS DE FUSION**

<u>REACCION</u>	<u><math>U_{rep}^{m\acute{a}x}</math>. (KeV)</u>	<u>T (<math>^{\circ}</math>K)</u>
D - D	380	$4.4 \times 10^9$
D - T	355	$4.1 \times 10^9$
D - He <sup>3</sup>	710	$8.2 \times 10^9$
H - Li <sup>6</sup>	1,022	$1.2 \times 10^{10}$
H - Li <sup>7</sup>	988	$1.1 \times 10^{10}$

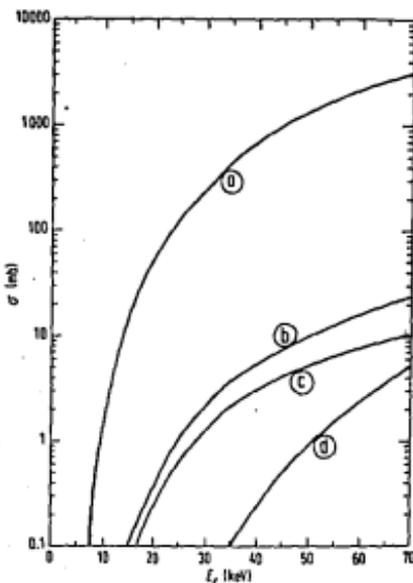
Afortunadamente no es necesario calentar a la temperatura de la energía térmica promedio, ya que por obedecer ésta una distribución de tipo Maxwelliano, aún a menores temperaturas, existirán suficientes partículas con la energía necesaria para fusionarse; rindiendo adecuadas cantidades energéticas.

Otra consideración a tomar en cuenta, son las secciones eficaces para la fusión mostradas en la figura I.1.

Por otra parte, a las temperaturas a las que se calienta el combustible para fusionarlo, éste está en estado de plasma, cuyas inestabilidades magnetohidrodinámicas (MHD) así como las colisiones inducen pérdidas de partículas.

Además las fuerzas ejercidas en las partículas

FIG. I-1  
SECCION EFICAZ DE FUSION



- |    |                     |   |                     |
|----|---------------------|---|---------------------|
| a: | D - T               | → | He <sup>4</sup> + n |
| b: | D - D               | → | T + H               |
| c: | D - D               | → | He <sup>3</sup> + n |
| d: | D + He <sup>3</sup> | → | He <sup>4</sup> + H |

cargadas al encontrarse con otras producen aceleración; - una partícula cargada al acelerar emite radiación conocida como bremsstrahlung cuya potencia volumétrica radiada está dada por:

$$P_{br} = 1.5 \times 10^{-38} Z^2 n_i n_e T_e^{1/2} \text{ MW m}^{-3}$$

Z = N° atómico de los iones

$n_i$  = densidad iónica

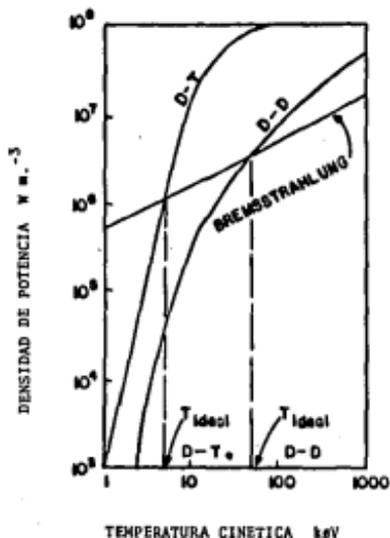
$n_e$  = densidad electrónica

$T_e$  = temperatura electrónica en eV

donde se observa que las pérdidas van en razón directa a  $Z^2$  lo que favorece a los elementos de bajo Z como combustibles.

Otro factor a evaluar para efectuar la selección de las reacciones de fusión, es la densidad de potencia obtenida. Los reactores de potencia de fusión tienen densidades de potencia de 20-60  $\text{MWm}^{-3}$  siendo la densidad de potencia típica  $40 \text{ MWm}^{-3}$ ; valor dictado por consideraciones económicas y metalúrgicas. Usando éste valor como criterio de diseño del reactor de fusión y tomando en cuenta las pérdidas; se define la "temperatura de ignición" como temperatura a la cual la tasa de producción de energía supera la tasa de pérdidas. Las temperaturas de ignición ideales para isótopos del H ( $Z=1$ ) se muestran en la figura I-2, donde se observa que la reacción D-D tiene una temperatura de ignición cerca de un orden de magnitud mayor que la de la reacción D-T.

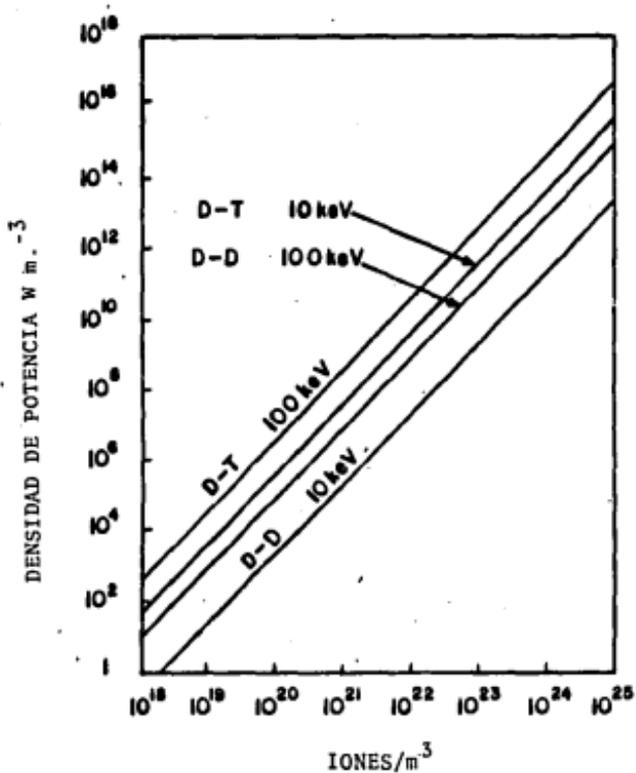
FIG. I-2  
TEMPERATURA DE IGNICION:  $Z = 1$



Finalmente, desde el punto de vista dimensional del diseño del reactor, mientras más compacto sea éste, asumiendo el criterio de densidad de potencia de  $40 \text{ MW m}^{-3}$ , más viabilidad económica tendrá. Este planteamiento se analiza en la figura 1-3, donde se representa la densidad de potencia en función de la densidad iónica de los combustibles de fusión. La densidad de potencia de referencia ( $40 \text{ MW m}^{-3}$ ) a una temperatura cinética de 10  $\text{keV}$  se consigue con una densidad iónica  $n_i = 10^{21} \text{ m}^{-3}$  que es aproximadamente  $10^{-5}$  de la densidad de un gas en condiciones normales. Esto signi-

nifica que la densidad del combustible de fusión es prácticamente equivalente a un vacío de laboratorio.

FIG. I-3  
DENSIDAD IONICA



Las principales consideraciones expuestas para el logro de la fusión termonuclear controlada se resumen en la tabla I-3.

TABLA I-3  
REQUERIMIENTOS DE LA FUSION

<u>REACCION</u>	<u>Tig (kev)</u>	<u><math>\sigma_{fus}</math> (mb)</u>	<u>ni (m<sup>-3</sup>)</u>
D - T	10	≈ 2	10 <sup>21</sup> a 10 <sup>22</sup>
D - D	100	.02	10 <sup>21</sup> a 10 <sup>22</sup>
D - He <sup>3</sup>	>> 100	.001	---

Evidentemente la reacción D - T es la que presenta las condiciones más alcanzables para el logro de la fusión termonuclear controlada, debido a lo cual los enormes esfuerzos y recursos destinados a la construcción y arranque de reactores de fusión se han centrado en el uso de D y T como combustibles.

### COMBUSTIBLES

#### FUSION TERMONUCLEAR CONTROLADA

Deuterio (D) : Isótopo estable del H, m.a. 2.0147; abundancia natural .016%.

Se obtiene por electrólisis de D<sub>2</sub>O o por destilación fraccionada del H líquido

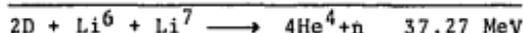
Tritio (T) : Isótopo inestable del H, m.a. 3.016; t<sub>1/2</sub> = 12.33 años; desintegración  ${}_1\text{H}^3 \rightarrow {}_2\text{He}^3 + \beta^-$

Se obtiene a través de las reacciones de cría:



Li natural:  $\text{Li}^6$  7.42%,  $\text{Li}^7$  92.58%

El deuterio es un material abundante y relativamente fácil de obtener, libera unos  $3.9 \text{ MW-dg}^{-1}$ , por lo que el D contenido en 1 litro de agua rinde aproximadamente la misma energía que 80 litros de gasolina de alto octanaje. - En cambio el tritio tiene que ser manufacturado por reacciones de cría con el Li, por lo que las reacciones involucradas pueden representarse como sigue:



con lo que en realidad el T viene a funcionar finalmente como combustible catalítico de la fusión D-Li.

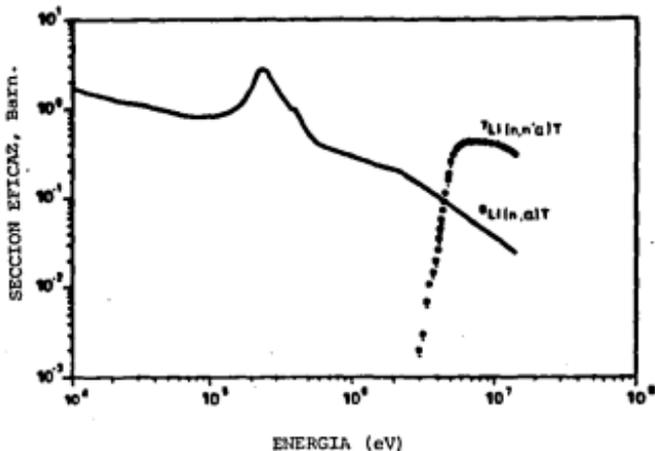
El litio forma parte del ciclo del combustible de fusión en forma indirecta, a través del uso de una envolvente de Li llamada "manto" en torno a la cámara de fusión, cuya función primordial será criar T; aunque por las magníficas características del Li, también puede ser usado como fluido de trabajo térmico para la extracción de la energía del reactor.

La reacción exotérmica de cría del  $\text{Li}^6$  se efectúa a partir de un proceso de captúra con una sección eficaz  $1/v$  superior a los 100 KeV y con una resonancia a 250 - KeV; mientras que la reacción endotérmica de cría del  $\text{Li}^7$  -

se debe a la dispersión inelástica de neutrones rápidos con una energía umbral de 2.5 MeV. Esta última rin de un neutrón térmico que puede ser aprovechado para otra reacción de cría con  $\text{Li}^6$ ; por lo que el Li natural se presenta como un material ideal de cría. La figura I-4 muestra la sección eficaz de reacción de los isótopos de Li en función de la energía del neutrón incidente.

FIG. I-4

SECCION EFICAZ DE REACCION  $^6,^7\text{Li-n}$





por la tasa de cría dada por:

$$(b) B_T = \sum_{Li^{6,7}} Ni \int dv \int_0^{\infty} \sigma(E) \phi(r,E) dE$$

- $Ni$  = densidad isotópica del  $Li^6$  y  $Li^7$   
 $V$  = volúmen del manto  
 $\sigma(E)$  = sección eficaz en función de la energía  
 $\phi(r,E)$  = flujo neutrónico en función de la energía y la posición.

Se han efectuado varios modelos de cálculo que parten de la solución de la ecuación estacionaria de Boltzmann para resolver  $\phi(r,E)$ , y usando el método de Monte Carlo, considerando geometrías cilíndricas, se ha estimado que un neutrón de la fusión D - T penetrando en un medio infinito de Li natural genera 1.9 átomos de T con una contribución similar para ambos isótopos de Li.

En un diseño realista, se debe considerar la primera pared y los reflectores o multiplicadores de neutrones, así como el inventario de T necesario durante el arranque; y el inventario de T en proceso, llamando así al T que estará circulando en el manto refrigerante y el que estará siendo separado del Li para su posterior reinyección.

La relación entre la tasa de cría, el consumo por unidad de tiempo y el decaimiento radiactivo del T está dada por:

$$(c) \quad \frac{dx}{dt} = (B_t - 1) \frac{R}{Q} f - \lambda x$$

si  $t = 0 \quad x = x_0$

- x = inventario de T en el tiempo t
- x<sub>o</sub> = inventario inicial, necesario hasta que el manto alimente T.
- B<sub>t</sub> = tasa de cría
- P<sub>t</sub> = potencia térmica del reactor
- Q = energía liberada por fusión (cámara y manto)
- f = factor de carga del reactor
- λ = cte. de decaimiento del T

resolviendo para x (t) con las condiciones de t = 0 x = x<sub>o</sub>  
 t = t x = x(t)

$$(d) \quad x(t) = \frac{1}{\lambda} (B_t - 1) \frac{P}{Q} f (1 - e^{-\lambda t}) + x_o e^{-\lambda t}$$

aprovechando que B<sub>t</sub> puede hacerse fácilmente mayor a uno se puede estimar el tiempo de doblado t<sub>2</sub>, que es el tiempo necesario para que un reactor produzca el inventario inicial (x) para otro reactor similar, éste es:

$$si \quad x(t_2) = 2x_o$$

$$2 x_o = \frac{1}{\lambda} (B_t - 1) \frac{P}{Q} f (1 - e^{-\lambda t_2}) + x_o e^{-\lambda t_2}$$

resolviendo para el factor B<sub>t</sub>-1 llamado "ganancia" G:

$$(e) \quad G = \frac{x_o Q \lambda}{P_t f} \left( 1 + \frac{1}{1 - e^{-\lambda t_2}} \right)$$

la ecuación (e) permite calcular el t<sub>2</sub> para una ganancia dada o la ganancia necesaria para duplicar al reactor en un tiempo t<sub>2</sub> dado.

Para dar una idea de la importancia energética del Li, se calcula que unas 300 ton de Li natural producirían 10<sup>3</sup> TWh eléctricos en reactores con eficiencia η = 33%, -

la cual es la energía eléctrica producida por el mercomún europeo en 1980.

En el capítulo IV se aplican éstos y otros conceptos al diseño del manto de un reactor de fusión.

## REFERENCIAS

- (1) W.Häfele; Energy options open to mankind beyond the turn of the century.  
Proc. Int. Conf. on Nuclear Power and its Fuel Cycle, Salzburg, 1977, Vol. 1, p. 59, IAEA, -- Viena 1977.
- (2) Excelsior 1a. ed. 18 de diciembre 1985.
- (3) Mining Journal, septiembre 1985.
- (4) G. Friedlander, J. Kenedy, E. Macias, J. Miller; Nuclear and Radiochemistry, 3a. ed. 1981.  
John Wiley and Sons Inc.
- (5) J. Darvas; the Fuel Cycle of Fusion Reactors -  
Commision of the European Communities  
Fusion Programme.

## CAPITULO II

### CARACTERIZACION DEL LITIO

#### II.1. QUIMICA

El descubrimiento del Li se le atribuye a John August Arfredson en 1817, cuando encontró que los sulfatos obtenidos de la descomposición de la petalita contenían un sulfato alcalino que no correspondía a las típicas reacciones del sulfato de Na, K o Mg. J.J. Berzelius lo llamó Litio, palabra derivada del griego "litos", que significa piedra. C.G. Gimelin observó en 1818 el típico color rojo del Li a la flama y Berzelius detectó su presencia en aguas minerales. R. Bunsen y A. Matthiessen en 1855 prepararon por primera vez algunos gramos del metal por electrólisis de sal fundida de LiCl. El uso del Li y sus compuestos empezó a crecer espectacularmente de la década de los 40 en adelante, y las nuevas aplicaciones en metalurgia, baterías y energía nuclear le han abierto notables perspectivas.

El litio;  $Z = 3$ ,  $A = 6.939$  es un metal blanco de lustre plateado formado por 2 isótopos:  ${}^6\text{Li}$  7.42% y  ${}^7\text{Li}$  92.58%. Pertenecce al grupo Ia (metales alcalinos) de la tabla periódica y sus principales propiedades se muestran en la tabla II-1:

Es el más duro de los metales alcalinos (6 Mohs), cristaliza en el sistema cúbico centrado en el cuerpo (c.c.) siendo estable de  $-133^\circ\text{C}$  a  $180^\circ\text{C}$ . Sufrre dos transformaciones alotrópicas: de cúbico centrado en el cuerpo (c.c.) a cúbico centrado en las caras (c.c.c.) a

-135°C; y de c.c.c. a hexagonal compacto a -199°C. Su ducti-  
lidad es similar a la del plomo y capas delgadas de Li metá-  
lico son opacas a la luz visible, pero transparentes al ul-  
travioleta.

Los elementos del grupo Ia (Li, Na, K, Rb, Cs, -  
Fr) son los que están más íntimamente relacionados que los -  
de cualquier otro grupo entre sí; y las variaciones en pro-  
piedades químicas y físicas son las más regulares. Los ele-  
mentos de este grupo tienen un sólo electrón "s" en la capa  
exterior (Li:  $1s^2 2s^1$ ); la atracción del núcleo sobre el --  
electrón exterior está debilitada por el efecto de pantalla  
ejercido por el nivel completo. Esto se refleja en la baja  
energía de ionización del Li (5.39eV), ya que el átomo fácil-  
mente pierde el electrón s adquiriendo la configuración elec-  
trónica del gas noble anterior (en éste caso He:  $1s^2$ ) como --  
ión positivo. Por la dificultad que representa la pérdida -  
de otro electrón, el Li al igual que los demás metales alcal-  
linos, es univalente. La estabilidad del ión genera la pre-  
dominancia del enlace iónico en los compuestos de este grupo,  
así como su energía de ionización y el potencial de electro-  
do (3.02V). La movilidad del electrón exterior en la red --  
iónica del estado metálico se refleja en buena conductividad  
eléctrica y térmica, así como su maleabilidad y suavidad.

La química de los compuestos del grupo Ia refle-  
ja la estabilidad del ión unipositivo: los óxidos son fuer-  
tamente básicos y reaccionan violentamente con  $H_2O$  y áci-  
dos para formar sales; los hidróxidos son fuertemente --  
iónicos, muy solubles en  $H_2O$  liberando iones hidróxilo, -  
dando por ésto soluciones fuertemente alcalinas; los cloru-  
ros y oxisales son también iónicos con elevada energía de -  
red, siendo entonces solubles en  $H_2O$ , térmicamente esta--

bles y de alto punto de fusión.

El Li difiere más de los otros elementos del grupo, que lo que ellos difieren entre sí: es el más débil de los metales alcalinos, sus compuestos contienen relativamente más enlaces parcialmente covalentes y sus características iónicas fuertes son menos marcadas; las sales son menos solubles; el cloruro es hidratado, se hidroliza ligeramente en solución y es disuelto en solventes orgánicos; el carbonato se descompone al calentar, etc. En éste sentido el Li se parece más al Mg que a los otros metales alcalinos, siendo un ejemplo de similaridad diagonal encontrada frecuentemente en la tabla periódica como en los casos del Be (IIa) con el Al(IIIb) y del B(IIIb) con el Si (IVb).

La química del Li metálico depende casi por entero de la estabilidad del ión comparada con la del átomo; ésto se refleja en la dificultad de obtener el metal de sus compuestos, y la facilidad con la que el metal entra en combinación química (reactividad). El bajo potencial de ionización del Li indica que la formación del ión  $\text{Li}^+$  es un proceso relativamente fácil. Este ión existe como tal en sales cristalinas, mientras que en solución se encuentra altamente solvatado, pudiéndosele representar como  $\text{Li}^+(\text{aq})$ . El Li puede formar uniones covalentes Li-X; el vapor del metal es predominantemente monoatómico, pero a temperaturas cercanas al punto de ebullición contiene alrededor del 1% de  $\text{Li}_2$ . Esto ha sido detectado a través de su espectro de bandas. La unión Li-Li puede ser considerada en primera aproximación como resultado del traslape S-S; sin embargo, se ha detectado experimentalmente cierto grado de hibridización S-P, contabilizando hasta un 14% de

carácter p. La energía de unión Li-Li es relativamente baja: 27 kcal mol<sup>-1</sup> con una distancia de 2.67 Å. Algunos compuestos del litio se comportan como típicamente covalentes, siendo volátiles y solubles en solventes no polares. No existe evidencia sobre estados de oxidación diferentes a +1, ni se espera que suceda tomando en cuenta el valor extraordinariamente alto del segundo potencial de ionización: 75.2 eV. La tabla II-2 muestra las principales reacciones del Li metálico.

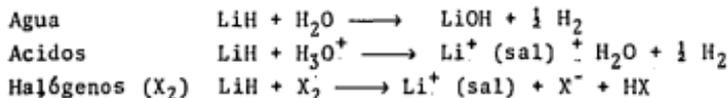
**TABLA II-1**  
**PROPIEDADES FISICAS DEL Li**

Punto de fusión	p.f.	= 180.5 °C
Punto de ebullición	p.e.	= 1336 °C
Densidad a 20°C	P <sub>20</sub>	= .531 g cm <sup>-3</sup>
Calor específico a 25°C	C <sub>25</sub>	= .849 cal g <sup>-1</sup>
Calor específico a 180.5°C	C <sub>180.5</sub>	= 1.05 cal g <sup>-1</sup>
Calor de fusión	C <sub>f</sub>	= 103.2 cal g <sup>-1</sup>
Calor de vaporización	C <sub>vap</sub>	= 5100 cal g <sup>-1</sup>
Resistividad eléctrica a 20°C	R <sub>e1</sub>	= 9.446 μΩ-cm.
Líneas espectrales características		
Rojo		= 6708Å
Naranja		= 6103Å

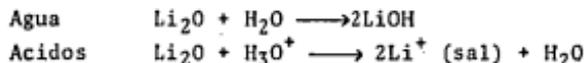
TABLA II-2  
REACCIONES DEL Li METALICO

Halógeno (X <sub>2</sub> )	$\text{Li} + \frac{1}{2} \text{X}_2 \longrightarrow \text{LiX}$	Haluro de litio
Oxígeno	$2\text{Li} + \frac{1}{2} \text{O}_2 \longrightarrow \text{Li}_2\text{O}$	Monóxido de litio, p.f. 1700 °C
Azufre	$2\text{Li} + \text{S} \longrightarrow \text{Li}_2\text{S}$	Sulfuro de litio
Nitrógeno	$3\text{Li} + \frac{1}{2} \text{N}_2 \longrightarrow \text{Li}_3\text{N}$	Nitruro de litio
Fósforo, Arsénico y Antimonio (X)	$3\text{Li} + \text{X} \longrightarrow \text{Li}_3\text{X}$	X-úro de litio
Hidrógeno	$\text{Li} + \frac{1}{2} \text{H}_2 \longrightarrow \text{LiH}$	Hidrúro de litio
Acidos	$\text{Li} + \text{H}_3\text{O}^+ \longrightarrow \text{Li}^+ + \text{H}_2\text{O} + \frac{1}{2} \text{H}_2$	Sales iónicas
Agua	$\text{Li} + \text{H}_2\text{O} \longrightarrow \text{LiOH} + \frac{1}{2} \text{H}_2$	Hidróxido de litio, p.f. 450°C
Alcoholes (ROH)	$\text{Li} + \text{ROH} \longrightarrow \text{LiOR} + \frac{1}{2} \text{H}_2$	Alcohóxido de litio
Amoniaco	$\text{Li} + \text{NH}_3 \longrightarrow \text{LiNH}_2 + \frac{1}{2} \text{H}_2$	Amida de litio

El hidrúro de litio LiH es térmicamente más estable que los hidrúros de los demás metales alcalinos, con un mayor calor de formación; pareciéndose más a los hidrúros del grupo IIa. Sus principales reacciones son:



Las propiedades del óxido de litio son las esperadas para los óxidos de los metales fuertes. Se conocen óxidos superiores de litio pero son muy inestables. Las reacciones del óxido de litio son:



El hidróxido de litio tiene un comportamiento excepcional; es menos soluble que otros hidróxidos alcalinos, es una base más débil y es mucho más parecido al hidróxido de magnesio. Las reacciones más importantes son:

Agua disolución  $\text{LiOH} \longrightarrow \text{Li}^+\text{OH}^-$  grado de disolución aparente = .918

Acidos  $\text{LiOH} + \text{HX} \longrightarrow \text{LiX} + \text{H}_2\text{O}$

El típico comportamiento anómalo del litio y su semejanza al Mg son notables en sus halúros: El fluoruro  $\text{LiF}$  es insoluble en agua, el cloruro sólido  $\text{LiCl}$  está hidratado  $\text{LiCl} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , es delicuescente y se hidroliza parcialmente en agua caliente. Los halúros de litio se disuelven en el oxígeno contenido en líquidos orgánicos como alcoholes y aldehídos, y son muy volátiles. La reacción principal es:

Acidos  $2 \text{LiX} + \text{H}_3\text{O}^+ \longrightarrow \text{Li}_2(\text{sal}) + 2\text{HX}$

El compuesto más importante de litio, es el carbonato  $\text{Li}_2\text{CO}_3$ , ya que es la materia prima para la fabricación de otras sales de litio, y es la base de comercialización del metal. Sus principales características y reacciones se muestran a continuación:

Preparación:  $2\text{Li}^+ + \text{CO}_3^{2-} \longrightarrow \text{Li}_2\text{CO}_3$

Sólido blanco cristalino, p.f.  $618^\circ\text{C}$

Descomposición térmica:  $\text{Li}_2\text{CO}_3 \xrightarrow{\Delta} \text{Li}_2\text{O} + \text{CO}_2$

Uno de los usos industriales más importantes del litio está relacionado con la preparación de sus derivados organometálicos. Un método de preparación conveniente emplea un cloruro de alquilo o arilo en benceno o petróleo.

$\text{C}_2\text{H}_5\text{Cl} + 2\text{Li} \longrightarrow \text{C}_2\text{H}_5\text{Li} + \text{LiCl}$

Alternativamente pueden emplearse las reacciones de intercambio de hidrógeno, de intercambio metal-halógeno o intercambio metal-metal:

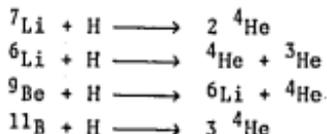


Los compuestos organolíticos reaccionan rápidamente con  $\text{O}_2$ , inflamándose en muchos casos espontáneamente en contacto con el aire, con agua y vapor. Estos compuestos se encuentran entre los pocos que poseen propiedades covalentes, tales como bajo punto de fusión, solubilidad en hidrocarburos y otros líquidos no polares y alta volatilidad. El metil litio es insoluble en solventes orgánicos y posee una volatilidad muy baja. El etil litio y los derivados de alquilo superiores son polímeros tanto en solución como en fase de vapor, aunque el grado de polimerización no se conoce con certeza. Los alquil-litios actúan como catalizadores estereoespecíficos de la polimerización de las olefinas. En el caso particular del isopreno se obtiene hasta 90% de 1,4-cis-polibutadieno.

## II.2. METALOGENESIS, OCURRENCIA Y RECURSOS

De los metales alcalinos, el Na y el K son de los componentes principales de la litósfera superior; el Rb es de los oligoelementos que más abunda en ella pero el Li y el Cs son raros. El litio escasea también en la materia cósmica al igual que sus vecinos de la tabla periódica Be y B. Esto se explica geoquímicamente considerando a las transmutaciones nucleares naturales más importantes, como las causantes de la escasez de Li, Be y B y la gran abundancia cósmica de He. La escasez de Li en la litósfera superior no puede ser debida a ningún principio químico de selección, ya que es fuertemente litófilo y concentrado en las soluciones magmáticas de baja densidad. Estos elementos ligeros son de fácil desintegración al bombardear--

los con protones rápidos acelerados térmicamente en los núcleos estelares; las reacciones correspondientes son las siguientes:



este ciclo explicaría también la abundancia isotópica del  ${}^7\text{Li}$  (92.58%) en comparación al  ${}^6\text{Li}$  (7.42%) debido a la menor frecuencia de reacción del  ${}^9\text{Be}$  (creación) y mayor sección eficaz del  ${}^6\text{Li}$  (aniquilación).

De cualquier forma el Li no es escaso, ya que su abundancia lítica es de 65 g ton<sup>-1</sup>, la misma que el Cu; y superior a varios elementos de uso común, ej: Co (23 g ton<sup>-1</sup>), As (5 g ton<sup>-1</sup>), Ag (.1 g ton<sup>-1</sup>), Cd (.15 g ton<sup>-1</sup>), Sn (40 g ton<sup>-1</sup>), Sb (1 g ton<sup>-1</sup>), I (.3 g ton<sup>-1</sup>), Au (.005 g ton<sup>-1</sup>), Hg (.5 g ton<sup>-1</sup>), Pb (16 g ton<sup>-1</sup>).

Por lo que respecta a su carácter geoquímico general, el Li es muy litófilo; falta casi por completo en las capas geoquímicas internas del planeta. En la litósfera está concentrado en la corteza silíca, y es óxifilo en grado sumo. Su abundancia en la capa de Sima es mucho menor que en la corteza de Sial, como lo han mostrado los análisis de meteoritos silicatados.

Los análisis efectuados en rocas ígneas demuestran que el Li tiende a concentrarse en los últimos productos de la cristalización del magma, en particular en las rocas graníticas. Sin embargo el grado de enriquecimiento

no aumenta con regularidad como sucede con el Na. Los granitos contienen unas 100 veces más Li que los primeros -- cristalizados. También se concentra Li en las sienitas ordinarias y en las nefelinicas, aunque en menor grado que -- en los granitos. Los sulfuros magmáticos carecen por completo de litio.

El litio difiere notablemente en un aspecto de los otros metales alcalinos: en su reluctancia a entrar en las estructuras de los feldespatos. Los feldespatos potásicos y las plagioclasas que se forman durante las primeras etapas de cristalización suelen carecer de Li, y a pesar que éste metal forma a veces minerales independientes en las pegnátitas, no se ha encontrado nunca que forme un feldespato en ellas. Aunque la composición química de una solución o un fundido que contenga Li permita la formación de un feldespato de litio por cristalización, no ocurre esto; cristaliza en su lugar el piroxeno de litio espodumena  $\text{LiAl}(\text{Si}_2\text{O}_6)$  o la petalita  $(\text{Li}, \text{Na})[\text{AlSi}_4\text{O}_{10}]$ . La composición del primero es parecida a la de los feldespatos, pero el último es un tectosilicato que difiere de los feldespatos por su estructura.

El Li se comporta como el Mg en los procesos -- de sedimentación y meteorización, encontrándose que se -- vierten alrededor de  $39 \text{ g ton}^{-1}$  al agua de mar, quedando -- disueltos en ella solo  $.1 \text{ g ton}^{-1}$ ; lo que demuestra que el Li se incorpora a los sedimentos marinos de hidrolizados. En los sedimentos de evaporados se encuentra algo de Li en la halita ( $\text{NaCl}$ ), en la que sustituye al Na en pequeñas -- cantidades. Las aguas termales contienen notables cantidades de litio extraído en forma de  $\text{LiCl}$  de las rocas que atraviesan dichas aguas; siendo el mismo origen el del Li

encontrado en aguas minerales.

Aunque se conocen muchos minerales líticos, la ocurrencia del litio se limita a ciertas pegmatitas (rocas ígneas de grano grueso), y greisen que es una roca ígnea - de alteración zonal. También se le encuentra en algunas - arcillas y pizarras donde se ha asentado por meteorización, siendo este mecanismo el generador de la ocurrencia del Li en los lagos de los desiertos, salmueras subterráneas y sa linas de lagos desertificados. Los minerales líticos co-mercialmente explotables se muestran en la tabla II-3.

La cuantificación de reservas de litio ha sido muy precisa, ya que el desarrollo de armas termonucleares en la década de los 50, y el potencial energético nuclear y convencional del litio, lo han calificado como material estratégico. Estas reservas se muestran en la tabla II-4.

Tomando en cuenta que la recuperación fluctúa entre el 50 y el 70%, se dispone de unas  $6.4 \times 10^6$  tons. - de Li en el mundo.

Los procesos extractivos del Li están dividi-- dos en dos grandes grupos: procesamiento de minerales y - procesamiento de salmueras; en el primer caso, el proceso consiste en el quebrado y molido del mineral a .3 mm --- aproximadamente, entonces, dependiendo del mineral que se trate, se forma una pulpa libre de hierro y colas usando - separación magnética, ciclones o decantación; la pulpa es flotada con ácidos grasos. La transformación del concen- trado se lleva a cabo en dos formas: el proceso ácido que parte de tostar el concentrado para transformar el  $\alpha$  -es- podumeno a  $\beta$  -espodumeno que es más extractable, molerlo a

TABLA II-3  
FUENTES DE LITIO

PEGMATITAS

Espodumeno (grupo piroxenos)	$\text{LiAlSi}_2\text{O}_6$
Lepidolita (grupo micas)	$\text{K}(\text{Li}, \text{Al})_3(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{F}, \text{OH})_2$
Petalita (grupo micas)	$\text{LiAlSi}_4\text{O}_{10}$
Eucríptita (grupo micas)	$\text{Li}(\text{AlSiO}_4)$
Holmquistita (grupo anfíbolos)	$\text{Li}_2(\text{Mg}, \text{Fe})_3\text{Al}_2\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$
Ambligonita (grupo fosfatos)	$(\text{Li}, \text{Na})\text{Al}(\text{PO}_4)(\text{F}, \text{OH})$
Litiofilita (grupo fosfatos)	$\text{LiMn}(\text{PO}_4)$
Trifilita (grupo fosfatos)	$\text{LiFe}(\text{PO}_4)$

GREISEN

Zinwaldita (grupo micas)	$\text{K}(\text{Li}, \text{Al}, \text{Fe})_3(\text{Al}, \text{Si})_4\text{O}_{10}(\text{OH}, \text{F})_2$
--------------------------	---

VENAS MANGANOSAS

Litioforita	$(\text{Al}, \text{Li})\text{MnO}_2(\text{OH})_2$
-------------	---

VENAS CUARZOSAS

Cokeita (grupo cloritas)	$(\text{LiAl}_4)\text{Si}_3\text{AlO}_{10}(\text{OH})_6$
--------------------------	--

ARCILLAS

Hectorita (grupo montmorillonitas)	$\text{Na}_{1/3}(\text{Mg}, \text{Li})_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{F}, \text{OH})_2$
------------------------------------	--

SALMUERAS

Salar de Atacama (Chile)	1,500 ppm
Gran Lago Salado (E.E.U.U.)	40 ppm
Pico de Plata (E.E.U.U.)	200 ppm
Lago Searle (E.E.U.U.)	50 ppm
Cerro Prieto (México)	110 ppm
etc.	

TABLA II-4  
RESERVAS MUNDIALES DE LITIO

MINERALES

PAIS	RESERVAS PROBADAS (TONX10 <sup>6</sup> )	RESERVAS PROBABLES (TONX10 <sup>6</sup> )	RECUPERABLE (TONX10 <sup>6</sup> )	LEY MINERAL (% Li)	RENDIMIENTO POTENCIAL (TONX10 <sup>6</sup> )
E.E.U.U.	70.7	704.5	413.0	.69	2.8
Zaire	468.0	- - -	351.0	.69	2.4
Canadá	7.8	51.6	38.0	.63	.24
Australia	24.7	- - -	18.0	.85	.15
Zimbawe	9.7	- - -	7.0	1.4	.09
Brasil	- - -	4.5	2.0	.7	.01
Europa	2.2	- - -	1.7	.6	.01
Namibia	1.0	- - -	.7	1.4	.01
Argentina	- - -	.1	.06	.7	.0004
Otros	140.0	- - -	70.0	.7	.49
<b>T O T A L</b>	<b>724.1</b>	<b>760.7</b>	<b>901.5</b>		<b>6.2004</b>

SALMUERAS

PAIS	SALMUERA DISPONIBLE (TON.X10 <sup>6</sup> )	CONCENTRACION PROMEDIO Li (% Li)	RENDIMIENTO POTENCIAL (TON.X10 <sup>6</sup> )
Chile	2,853	.14	4
E.E.U.U.	7,707	.004	.31
Otros	1,900	.005	.095
<b>T O T A L</b>	<b>12,460</b>		<b>4.405</b>

menos de .15mm y lixiviarlo con  $H_2SO_4$  caliente para formar  $Li_2SO_4$  soluble. Las impurezas son eliminadas por precipitaciones sucesivas y finalmente se añade  $Na_2CO_3$  para precipitar  $Li_2CO_3$ . El proceso alcalino consiste en tostar el mineral con caliza, transformando los silicatos de litio en aluminatos; se lixivia con NaOH para arrastrar el litio en forma de LiOH. El Ca se precipita como aluminato de calcio y el LiOH se cristaliza en evaporadores.

El procesamiento de salmueras depende del tipo de salmueras a tratar; todos parten de una concentración de la salmuera, generalmente a través de evaporación solar. Esta concentración elimina muchas impurezas por precipitación. La salmuera concentrada se trata con CaO para remover el Mg, y el Li se precipita como  $Li_2CO_3$  usando  $Na_2CO_3$ . Esto es válido cuando las concentraciones de Mg y Ca son bajas. En otros casos se prepara un fosfato de litio el cual es concentrado por flotación, lixiviado con  $H_2SO_4$  y se precipita  $Li_2CO_3$  por adición de  $Na_2CO_3$ .

Actualmente se esta llevando a cabo una considerable investigación para la extracción de litio de fuentes de baja concentración, particularmente agua de mar. Se trabaja en intercambio iónico, extracción con solventes, electrodiálisis, ósmosis inversa, clorinación selectiva, etc.; ya que la importancia, perspectiva y aplicaciones del litio son tales que se le conoce como "litio el elemento-energía".

REFERENCIAS

- (1) D. Eigo, J. Franklin, G. Cleaver; Lithium ---  
Engineering and Mining Journal, septiembre 1975.
- (2) Lithium  
U.S. Dept. of the Interior, Geological Survey -  
1979.
- (3) Lithium  
Mineral Commodity Profiles  
Bureau of Mines, U.S. Dept. of the Interior, -  
septiembre 1979.

## CAPITULO III

### APLICACIONES

#### III.1. APLICACIONES GENERALES.

El litio es usado para una amplia gama de aplicaciones en diversas formas que, en orden descendente de volúmen, son: compuestos inorgánicos, básicamente el carbonato, hidróxido y bromuro; minerales concentrados; compuestos organometálicos y, finalmente, litio metálico.

A principio de la década de los '60, la compañía norteamericana Kaiser Aluminium & Chemical Corp. desarrolló a escala industrial la adición de carbonato de litio ( $\text{Li}_2\text{CO}_3$ ) al electrolito fundido de las celdas de reducción de aluminio, abatiendo el consumo de criolita e incrementando la eficiencia de corriente eléctrica; logrando reducciones de costo del orden del 15% con la adición de 3-3.5 Kg de  $\text{Li}_2\text{CO}_3$  por tonelada de Al. Esta práctica es hoy en día universalmente seguida, al grado que representa aproximadamente el 35% del consumo actual de Li.

El Li es un importante constituyente de los barnices cerámicos, vidrios especiales y porcelanas vitrificadas. Se añade en forma de  $\text{Li}_2\text{CO}_3$  o minerales concentrados como el espodumeno, petalita o lepidolita aunque el uso de éstas dos últimas es muy reducido debido a que liberan flúor cuando están fundidas. El Li añadido reduce el punto de fusión por su acción fundente, mejora la resistencia al choque térmico e incrementa la resistencia a la abrasión y al ataque ácido. Su acción consiste en que cuando el material vítreo es conformado en estado pastoso, cristales de  $\beta$ -espodumeno o  $\beta$ -eucryptita (tetrago

nales) precipitan en el primario produciendo un cerámico ligero, tenaz y resistente al choque térmico de amplias aplicaciones domésticas e industriales. También se usa  $\text{Li}_2\text{CO}_3$  en las fritas para barnizado o porcelanizado del acero utilizado en cambiadores de calor, reactores vidriados y silos para almacenaje de productos alimenticios. Una característica fundamental de las fritas o los barnices "al litio" es su bajísima expansión térmica, característica aprovechada para la fabricación de grandes espejos para telescopios. La alta conductividad térmica y resistencia al choque térmico conferidos a la cerámica vítrea por el  $\text{Li}_2\text{CO}_3$  permitieron el desarrollo de la moderna "loza" de cocina que puede usarse a fuego directo u horno de gas ó microondas. Por otra parte, se usan concentrados minerales de Li en la producción de aislantes rígidos de espuma de fibra de vidrio, y en la preparación de vidrio al bario para pantallas de T.V. blanco y negro. Otra aplicación es la fabricación de vidrio para fanales de automovil, donde se aprovecha la resistencia al choque térmico y la tenacidad conferidas al vidrio por la adición de  $\text{Li}_2\text{CO}_3$ . Por último, en lo que se refiere a aplicaciones vítreas del Li, su uso más espectacular consiste en la fabricación de vidrios fotocromicos para anteojos; el ion Li ( $\text{Li}^+$ ) en combinación con un haluro de plata desdiseña el vidrio bajo la luz ultravioleta proveyendo cristales ahumados fotocambiantes para gafas de uso común.

En la actualidad, aproximadamente el 55% de las grasas lubricantes usadas en el mundo son grasas a base de estearato de litio; estas grasas contienen alrededor de un 2% de litio y consisten esencialmente de un lubricante relleno con un 10% de un jabón (estearato) de litio. Se añade hidróxido de litio ( $\text{LiOH}\cdot\text{H}_2\text{O}$ ) al lubricante don-

de saponifica en estearato de litio que actúa como espesante. Las grasas de litio son resistentes al agua y operan a temperaturas desde  $-40^{\circ}\text{C}$  hasta  $350^{\circ}\text{C}$ . Debido a esto han venido supliendo en gran medida a las grasas con jabones de Ca, Na y Al; y son usadas en la mayoría del equipo de transporte civil o militar, en equipos industriales pesados como convertidores BOF, hornos de fundición basculantes y trenes de laminación, también se usan como aceites lubricantes de alta detergencia para todo clima.

El uso más extendido del litio metálico es la fabricación de catalizadores para hules sintéticos; específicamente: butilitio normal y secundario producido directamente de Li metálico y el correspondiente haluro-butilo, que actúa como agente catalítico en la polimerización de butadieno, isopreno y estireno. Estos litioalquinos se producen por reacción del haluro-alquino con Li metálico en un solvente inerte. Los organolitios poseen mayor enlace covalente que sus equivalente organosódicos; consecuentemente son solubles en solventes hidrocarbura-dos. Esta solubilidad permite al butilitio (normal o secundario) funcionar como catalizador estereoespecífico en la polimerización produciendo hules en solución. Los hules sintéticos así producidos se usan en los pisos de llantas debido a su alta resistencia a la abrasión; también se usan para la producción de suelas de zapato deportivo y partes moldeadas de accesorio automotriz. Las resinas manufacturadas de polímeros de polibutadieno fabricados con catalizadores organolíticos se utilizan para la producción de una enorme variedad de artículos tales como: tinta de impresión, adhesivos, plásticos moldeados, plásticos laminados, etc.

Otra aplicación de creciente importancia consiste en el uso de salmueras concentradas de bromuro de litio (LiBr) usadas en unidades de aire acondicionado y refrigeración para trabajo pesado, que son mucho más eficientes y de menor mantenimiento que las de freón o amoníaco. En áreas de alta disponibilidad solar se están instalando estas unidades con dispositivos de energía solar en escuelas, hospitales y unidades habitacionales. El cloruro de litio (LiCl) aplicado como sal o salmuera se utiliza para control de humedad en quirófanos, camarotes de barco, cabinas de avión, en cápsulas y transbordadores aeroespaciales, plantas farmacéuticas y en la industria de alimentos y bebidas. Un uso importante del Li es la fabricación de acetilato de litio como un intermediario para la síntesis de vitamina A, antihistamínicos, anticonceptivos y tranquilizantes. De hecho el  $\text{Li}_2\text{CO}_3$  grado farmacéutico es ampliamente usado para el tratamiento de la sicosis maniaco-depresiva y el alcoholismo avanzado por su acción relajante; efecto que se aprovechaba como atractivo en un refresco embotellado hasta que se prohibió su uso a comienzos de la década de los '50.

El uso energético no nuclear del litio es muy amplio y prometedor, ya que su potencial típico de oxidación de +3.045 volts es el mayor de todos los elementos, lo que lo define como la fuente disponible más concentrada de energía química. Aunque el uso global de litio en baterías permanece bajo aún, la aplicación de Li metálico en forma de cintas anódicas para baterías primarias (no recargable) se ha convertido en el tercer uso principal de Li. Estas baterías se usan en cámaras, calculadoras, marcapasos, relojes, grabadoras, etc. y, principalmente, circuitos de memoria pues su vida útil mayor a 10 años,

densidad energética de 220 W-h/Kg (5 veces la de las celdas convencionales C-Zn), alto voltaje (cerca de 3 V.) y confiabilidad justifican el gasto extra en comparación a las pilas comunes. Las baterías comerciales de Li caen en tres grandes categorías: Electrolito sólido, electrolito orgánico y electrolito inorgánico. Todas son no acuosas debido a la fuerte reactividad del Li con agua excepto una batería Li-H<sub>2</sub>O-aire de la Lockheed que utiliza una solución de LiOH como electrolito. El 90% del mercado de baterías secas de Li lo forman los marcapasos y audífonos para sordera, cuya batería común es la de Li-I; su electrolito es LiI que es conductor iónico. Otro ejemplo de pila de electrolito inorgánico lo constituye la solución de cloruro de Li-Al (LiAlCl<sub>4</sub>) en cloruro de tionilo -- (SOCl<sub>2</sub>). Una de las bases de electrolito orgánico emplea un cátodo de sulfuro de cobre (CuS) y un electrolito de perclorato de litio (LiClO<sub>4</sub>) disuelto en dioxileno; otra usa un cátodo de cromato de plata (Ag<sub>2</sub>CrO<sub>4</sub>). Existen muchas otras combinaciones en uso o en desarrollo, ya que los usos militares, aeroespaciales y de informática están estimulando fuertemente el mercado; por ejemplo ya se dispone comercialmente de tres tipos de batería de electrolito orgánico, que utilizan cátodos de sulfuro de hierro, dióxido de manganeso y fluoruro de policarbono respectivamente. Otra faceta dentro de ésta línea la constituye la adición de LiOH.H<sub>2</sub>O al electrolito de KOH de las baterías alcalinas secundarias (recargable) de Ni-Cd para incrementar su capacidad y vida de anaquel. El LiOH.H<sub>2</sub>O evita la contracción de la esponja de Cd de superficie activa que recubre el ánodo y mejora la permeabilidad iónica del -- electrolito.

El LiOH anhidro es el compuesto más usado para

la adsorción del  $\text{CO}_2$  del aire para reciclaje en submarinos y cápsulas espaciales. Además descompone a  $800^\circ\text{C}$  en  $\text{Li}_2\text{O}$  que también es un fuerte adsorbedor de  $\text{CO}_2$ .

Las aplicaciones metalúrgicas del Li y sus compuestos (excluyendo la producción de Al primario) han sido variadas pero marginales hasta 1985, año en el que se inició la producción industrial de aleaciones Li-Al para el mercado aeroespacial básicamente. Aunque ya se habían desarrollado aleaciones ligeras (recuérdese que el Li es el metal más ligero que existe, con  $\rho = .531 \text{ g/cm}^3$ ) Li-Al y Li-Al-Mn a finales de los '50, la pobre ductilidad de éstas y su comportamiento a la fractura aunados al costo las relegaron a curiosidad de laboratorio. En la "Feria del Aire" de Farnborough Inglaterra de 1984 se presentó un avión de combate fabricado con una aleación Li-Al llamada Lital A o aleación 2014 (Li 3%), que hace a la aeronave 35% más ligera en comparación con su equivalente fabricada con las aleaciones convencionales de Al y Ti. A partir de ese momento se generó una fuerte demanda de la aleación, ya que los materiales ligeros alternativos como los cermets, grafito y plásticos requerirían un costosísimo cambio en técnicas de manufactura; mientras que el Lital A se maquina exactamente igual que las aleaciones a las que sustituye. Cabe hacer notar que esto representa un enorme atractivo, ya que las empresas aeroespaciales de todo el mundo son consideradas como las principales inversionistas en tecnología computarizada de producción y maquinado por control numérico. En la actualidad, todos los países productores de aluminio están instalando o arrancando hornos de 5-15 tons. para elaborar estas aleaciones. Dada la reactividad del Li, se requiere de atmósferas protectoras en la fusión y el colado, re--

fractarios especiales y técnicas de desgasificado secundario para la eliminación de rechupes y mazarotas. Se estima que la importancia y el impacto de éstas aleaciones son tal, que representarán el 13% del consumo mundial de Li para el año 2000. El Li metálico es usado para desgasificación y afinación de grano del cobre de alta pureza y conductividad usado en electrónica; y el cloruro de litio  $\text{LiCl}$  se usa como componente del baño de sal fundida - usado en el latonado de inmersión para cambiadores de calor, como ejemplos de aplicaciones metalúrgicas del Li.

Existen decenas de aplicaciones misceláneas de bajo volúmen para el Li y sus compuestos: el hipoclorito de litio ( $\text{LiOCl}$ ) se usa como bactericida en albercas y como agente sanitario en la industria alimenticia, lechera y de fermentación. Se produce hidruro de litio ( $\text{LiH}$ ) comercialmente por reacción de Li con H a alta temperatura, con el que se fabrican hidruros de  $\text{LiAl}$  usados extensamente en síntesis orgánicas, ya que mejora el rendimiento de compuestos con enlaces C-O y C-N. El etilen-glicóxido de litio se usa en la producción de películas de poliéster. Se usa nitruro de litio para la manufactura de diamante industrial, sulfato de litio para revelador fotográfico, amidas de litio en perfumería, polisilicatos de litio para pinturas anticorrosivas, metasilicato de litio como agente de liga en el sinterizado de zinc, etc.

Como ilustración de lo expuesto, a continuación se presenta una tabla que condensa las principales aplicaciones del litio, sus minerales y compuestos:

4

TABLA III-1

APLICACIONES DEL LITIO

CONCENTRADOS

NOMBRE	% Li	APLICACIONES
Espodumeno $\text{LiAl}(\text{SiO}_3)_2$	1.9-3.5	Materia prima para producción de $\text{Li}_2\text{CO}_3$ ; uso en cerámica y vidrio; vidrios especiales y fibras.
Petalita $\text{LiAl}(\text{Si}_2\text{O}_5)_2$	1.4-2.1	Cerámica y vidrio de baja expansión; fuente de sales de litio.
Lepidolita $\text{LiK}(\text{Al}(\text{OH})_2)_2\text{Al}(\text{SiO}_3)_3$	1.7-2.2	Fundente de baja temperatura y aditivo de vidrio y barnices.
Amblygonita $\text{Li}(\text{AlF})\text{PO}_4$	3.5-4.4	Vidriados y recubrimientos cerámicos; fundente para cuerpos cerámicos.
Eucryptita $\text{LiAlSiO}_4$	2.5-3.1	Fuente de sales de litio; vidrio cerámico y barnices.

COMPUESTOS

NOMBRE	FORMULA	APLICACIONES
Aluminato de Litio	$\text{LiAlO}_2$	Fundente para barnices porcelanizados de alta capacidad refractaria.
Amida de Litio	$\text{LiNH}_2$	Síntesis orgánica de fármacos, especialmente antihistamínicos.
Borohidruro de Litio	$\text{LiBH}_4$	Agente reductor de aldehídos, cetonas y ésteres.
Bromuro de Litio	$\text{LiBr}$	Fármaco hipnótico y sedativo, desecante y aire acondicionado, baterías y cambiadores de calor de bajo régimen.
Butilitio	$\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{Li}$	Polimerización de isopreno y butadieno (hules sintéticos), componente del combustible de cohetes y agente quelatante.

NOMBRE	FORMULA	APLICACIONES
Butoxhidruro de Litio Aluminio	$\text{LiAl}(\text{OC})(\text{CH}_3)_3\text{H}$	Reductor de esteroides cetónicos, cloruros ácidos y aldehidos
Carbonato de Litio	$\text{Li}_2\text{CO}_3$	Vidriado cerámico porcelanizado, fármaco, catalizador y materia prima para otros compuestos de Li, recubrimiento de electrodos de soldadura, pinturas luminiscentes, tintas y barnices, nucleónica y producción de aluminio.
Citrato de Litio	$\text{Li}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	Fármaco, saborizante de bebidas y dispersante de arcillas.
Clorato de Litio	$\text{LiClCO}_3$	Acondicionador de aire, propelente.
Cloruro de Litio	$\text{LiCl}$	Acondicionador de aire, fundente en soldadura, pilas secas, medio intercambiador de calor, desecante, producción de Li metálico.
Cobalito de Litio	$\text{LiCoO}_2$	Cerámico
Cromato de Litio	$\text{Li}_2\text{CrO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	Inhibidor de corrosión en anticongelantes, oxidante en síntesis orgánicas, lentes fotocromicos.
Deuteruro de Litio	$\text{LiD}$	Fusión termonuclear.
Dicromato de Litio	$\text{Li}_2\text{Cr}_2\text{O}_7 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	Dehumidificador y agente refrigerante.
Estearato de Litio	$\text{LiC}_{18}\text{H}_{35}\text{O}_2$	Cosméticos, plásticos, parafinas, grasas, inhibidor de la corrosión en petroquímica, agente cubriente en lacas y barnices, lubricante de alta temperatura.
Fluorofosfato de Litio	$\text{LiF} \cdot \text{Li}_3\text{PO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$	Cerámica.
Fluoruro de Litio	$\text{LiF}$	Fundente en soldaduras, cerámica, medio intercambiador de calor, combustible de cohete y rejilla para difracción de rayos X.
Grasa de Litio	Saponificación lítica de ácidos grasos de cadena larga.	Lubricante aeroespacial y para temperaturas extremas.

NOMBRE	FORMULA	APLICACIONES
Hidróxido de Litio	LiOH	Electrolito de baterías de vida larga, adsorbente de CO <sub>2</sub> para reciclaje de aire, lubricantes, cerámica, catálisis, fotografía y jabones de litio.
Hidroxiestearato de Litio	LiOOC(CH <sub>2</sub> ) <sub>17</sub> CHOH(CH <sub>2</sub> ) <sub>5</sub> CH <sub>3</sub>	Grasas lubricantes.
Hidruro de Litio	LiH	Desecante, reductor y fuente de H.
Hidruro de Litio Aluminio	LiAlH <sub>4</sub>	Agente reductor para varios grupos orgánicos, especialmente fármacos y perfumes, propelente, catalizador en polimerización, fuente de H.
Hipoclorito de Litio	LiOCl	Agente bactericida.
Ioduro de Litio	LiI-3H <sub>2</sub> O	Acondicionamiento de aire, baterías, catálisis y nucleónica.
Manganato de Litio	Li <sub>2</sub> MnO <sub>3</sub>	Aditivo en fritas y molinos de cerámicos, ligante de piedras de esmeril cerámicas.
Metaborato de Litio	LiB <sub>2</sub> .2H <sub>2</sub> O	Aditivo cerámico para incrementar la resistencia a la torsión, soldadura y latonado (anhidro)
Metasilicato de Litio	Li <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	Fundente para vidrioado cerámico, recubrimiento para electrodos de soldadura.
Molibdato de Litio	Li <sub>2</sub> MoO <sub>4</sub>	Recubrimientos siderúrgicos y catalizador en el fraccionado de petróleo.
Niobato de Litio	LiNbO <sub>3</sub>	Detector de infrarojos, transductor de láseres.
Nitrato de Litio	LiNO <sub>3</sub>	Cerámica, baños salinos, medio intercambiador de calor y refrigerante, propelente de cohetes.
Nitruro de Litio	LiN	Agente nitrurante, agente reductor en reacciones orgánicas.
Oxido de Litio	Li <sub>2</sub> O	Cerámico y aditivo para vidrios especiales, adsorbente del CO <sub>2</sub>
Percolato de Litio	LiClO <sub>4</sub>	Propelente en cohetes de combustible sólido.

NOMBRE	FORMULA	APLICACIONES
Peróxido de Litio	$\text{Li}_2\text{O}_2$	Agente fuertemente oxidante
Silicozirconato de Litio	$\text{Li}_2\text{O} \cdot \text{ZrO}_2 \cdot \text{SiO}_2$	Fundente en recubrimientos opacificados al zirconio, vidriado y porcelanas.
Sulfato de Litio	$\text{Li}_2\text{SO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$	Fármaco y ligas cerámicas.
Tetraborato de Litio	$\text{Li}_2\text{B}_3\text{O}_7 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	Cerámica, espectroscopía, desgasificación de metales y afinación de grano.
Titanato de Litio	$\text{Li}_2\text{TiO}_3$	Fundente en recubrimientos al titanio, recubrimientos vítricos y semivítricos.
Zirconato de Litio	$\text{Li}_2\text{ZrO}_3$	Fundente y opacificante en recubrimientos refractarios al zirconio, vidriado y porcelanas.

La procedencia y destino del producto se muestra en la figura III-1; la distribución<sup>2</sup> del uso final actual del Li y sus compuestos se resume en la figura III-2, donde se nota que las dos principales aplicaciones: vidrio-cerámica y aluminio primario, son consumidores preferenciales de  $\text{Li}_2\text{CO}_3$ . Debido a esto, las cifras de producción y comercio de Li se suelen presentar como equivalentes de carbonato de Li.

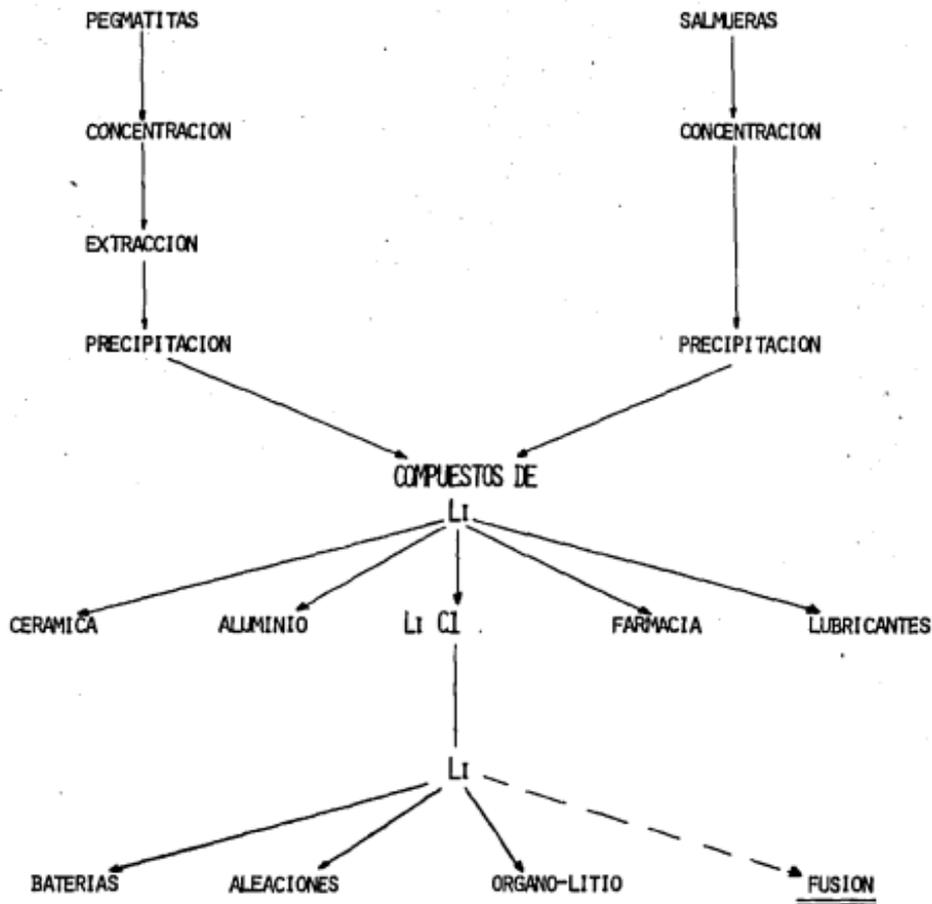
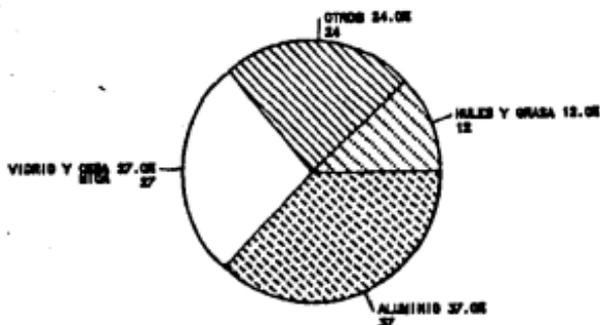


FIGURA III-1

FIG. III-2  
USO FINAL MUNDIAL DEL LITIO (1984)



La distribución del consumo<sup>(2)</sup> mundial en 1984 - mostrada en la tabla III-2 ilustra la demanda mayoritaria de los países desarrollados por el litio y sus compuestos, debido a que es un producto apto para aplicaciones de vanguardia tecnológica. Dado que estos países destinan grandes esfuerzos y recursos al desarrollo de reactores de potencia de fusión y al ahorro y conservación de energía, - se prevee una demanda importante de litio a mediano plazo, como se verá en el capítulo siguiente.

Finalmente, es pertinente hacer notar que en México existe una demanda sostenida de compuestos de litio, que se satisface a través de importaciones, básicamente de E.E.U.U. y Alemania Occidental. El destino de tales importaciones ha sido principalmente cerámica y vidrio, hules y grasas, fotografía y otros usos; sin que hasta el momento se destine nada a la industria de mayor consumo que es la del aluminio primario. Para ilustrar este aspecto se muestra en la tabla III-3 las importacio-

nes de compuestos de litio en 1983, mencionando a los principales importadores, el volúmen y el valor de las mismas. Un análisis más detallado del mercado se efectúa en el capítulo IV.

TABLA III-2  
CONSUMO MUNDIAL DEL LITIO (1984)  
(EN EQUIVALENTES DE  $\text{Li}_2\text{CO}_3$ )

	<u>TONS.</u>	<u>%</u>
E.E.U.U. y Canadá	16,500	40
Europa Occidental	7,800	19
Japón	3,700	9
Centro y Sud-América	3,300	8
U.R.S.S.	6,000 <sup>e</sup>	15
Otros	3,600	9
<b>T O T A L</b>	<b>40,900*</b>	<b>100</b>

\* = Equivalen a 7,700 tons. de Li metálico

e = estimado

TABLA III-3  
CONSUMO DE LITIO EN MEXICO (1983)

	<u>VOLUMEN(TONS)</u>	<u>VALOR(DLS)</u>	<u>CIAS. IMPORTADORAS</u>	<u>% IMPORTADO</u>
$\text{LiO}_2/\text{LiOH}$	231.2	675,587	PEMEX	72
$\text{Li}_2\text{CO}_3$	174.9	553,795	Vidrieras	63
$\text{LiCl}$	19.6	89,154	Pailería y Soldadura	45
$\text{Li}_2\text{SO}_4$	2.0	11,000	Kodak	80
<b>T O T A L</b>	<b>427.7*</b>	<b>1'329,536</b>		

\* = Equivalen a 97 tons. de Li metálico

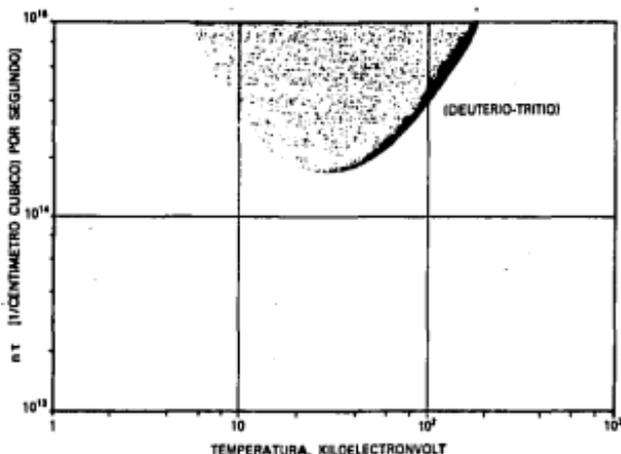
### III.2 APLICACIONES NUCLEARES

Como se mostró en el inciso I.2, una solución muy prometedora para el problema de la demanda energética parece ser la energía de fusión termonuclear controlada, ya que se trata de una fuente prácticamente inagotable, -- limpia y capaz de satisfacer nuevas y crecientes demandas. Los principales problemas para el logro de la fusión termonuclear controlada surgen del hecho de que las reacciones de fusión involucran solamente partículas cargadas (en contraste con la fisión); éstas reacciones de fusión ocurren a tasas apreciables solo cuando las velocidades relativas de los núcleos reactantes son lo suficientemente elevadas como para superar las barreras coulombianas. Esto es fácilmente alcanzable en aceleradores modestos, pero para obtener balances positivos de energía con reacciones autosostenidas se requieren temperaturas suficientemente altas -- tal que las velocidades térmicas rindan tasas de reacción apreciables. Las temperaturas de interés son del orden de  $10^7$  a  $10^8$  °K; a estas temperaturas la materia se comporta como gases completamente ionizados, conocidos como plasmas. Así que se requieren lograr dos metas para obtener reacciones de fusión; a) calentamiento suficiente del plasma y b) mantener el plasma caliente unido el tiempo suficiente para producir excedentes energéticos útiles de la reacción nuclear.

El calentamiento del plasma no es más que la temperatura de ignición, definida como la temperatura a la cual la tasa de producción de energía supera la tasa de -- pérdidas por radiación bremsstrahlung; la temperatura de ignición más baja corresponde a la reacción D-T y es del orden de  $5 \times 10^7$  °K.

El segundo factor, confinamiento del plasma - hasta que se alcance el punto de equilibrio (Esuministrada = Eobtenida) cuando menos, se puede expresar cuantitativamente, de acuerdo al análisis<sup>(8)</sup> de J.D. Lawson<sup>(9)</sup>, como la cota mínima necesaria del producto de la densidad del plasma (n) y el tiempo de confinamiento ( $\tau$ ). El producto  $n\tau$ , conocido como parámetro de Lawson, es del orden de  $10^{14}$  cm<sup>-3</sup> para la reacción D-T como puede verse en la figura III-3, y puede lograrse en varias formas manteniendo un plasma de  $n = 10^{14}$  cm<sup>-3</sup> confinado durante un tiempo  $\tau = 1$  seg., o con  $n = 10^{20}$  cm<sup>-3</sup> y  $\tau = 10^{-6}$  seg., etc. Pero en cualquier caso se debe alcanzar la temperatura de ignición para lograr la reacción.

FIG. III-3  
PARAMETRO DE LAWSON (D-T)



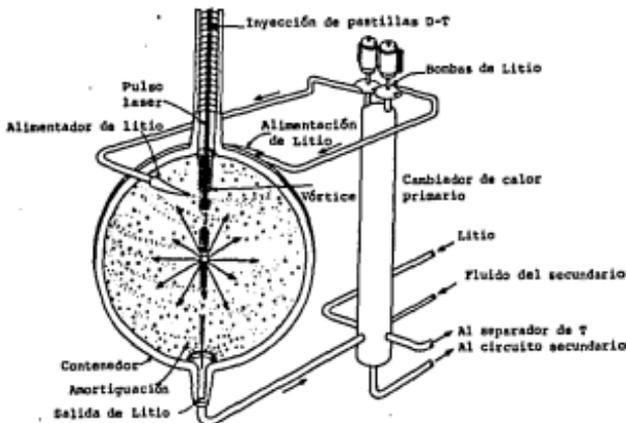
Los dispositivos o sistemas que cubren los requisitos exigidos para la fusión termonuclear son referidos por el tipo de confinamiento de que se valen para efectuar la reacción o reacciones. Así por ejemplo; las estrellas (entre ellas nuestro sol) mantienen sus plasmas confinados por los enormes campos gravitacionales que crean sus masas, y es llamado entonces "confinamiento Gravitacional".

Otro ejemplo de dispositivos de fusión hallados en la naturaleza lo forman las reacciones de fusión producidas por los eventuales impactos de los rayos cósmicos altamente energéticos en diversos núcleos, esta variante es llamada "Confinamiento Catalítico" y es la que a escala humana se efectúa con los aceleradores de partículas. Un concepto diferente<sup>(5)</sup> lo constituye el "Confinamiento Inercial", que consiste en evaporar violenta y rápidamente una capa superficial de material fusionable de forma esferoide, la evaporación radial simultanea comprime al material por efecto de conservación del momentum induciendo así la reacción termonuclear; la evaporación se genera incidiendo pulsos de alta energía de laseres, electrones o iones pesados en esferas de material fusionable, generalmente DT, provocando su implosión la que hace que se alcancen densidades varios órdenes de magnitud mayores que las normales, digamos  $10^{25}$ - $10^{26}$   $\text{cm}^{-3}$  con lo que sólo se requieren tiempos de confinamiento de  $10^{-11}$  seg. para lograr el parámetro de Lawson. Bajo éste principio operan las bombas de neutrones, aunque éstas utilizan los rayos X emitidos por una reacción de fisión para evaporar la capa del material fusionable:  $\text{Li}_2\text{DT}$ .

Por otra parte, las perspectivas del confinamiento inercial para aplicaciones energéticas están cobran

do gran importancia y se destinan grandes recursos para desarrollarlas. La eventual planta de potencia de este tipo aprovecharía la potencia generada por microexplosiones (unas 100  $\text{seg}^{-1}$ ) del orden de  $10^7$  J cada una en lapsos de  $10^{-11}$  seg.; para lo cual se han venido desarrollando lasers de varios tipos, P. Ej.: Nd,  $\text{CO}_2$ , I, etc., con potencias de alrededor de  $10^{12}$  W, junto con sistemas de alimentación de esferas de DT a cámaras de reacción (reactores), en conjunción con dispositivos de enfoque y sincronización de los pulsos laser. Los neutrones generados en este esquema, serán absorbidos en mantos de Li para criar T y extraer la energía térmica a un cambiador de calor para su posterior conversión en electricidad por medio de turbinas. Para atenuar las ondas de choque de las microexplosiones, se introducirán burbujas de aire o gas al Li fundido que está actuando como liquido de trabajo y fuente de T. Este concepto se muestra en la figura III-4.

FIG. III-4  
REACTOR DE CONFINAMIENTO INERCIAL



En otro órden de ideas; es evidente que un plasma a temperaturas aproximadas de  $10^8$  °K no puede ser confinado en ningún material. Esto condujo al concepto de "Botella Magnética" que se basa en el hecho de que las partículas cargadas de que se compone el plasma no pueden moverse en dirección transversal a un campo magnético, sino que se ven obligadas a describir trayectorias helicoidales a lo largo de las líneas de fuerza del campo magnético. Es posible confinar una masa de plasma porque la presión cinética ( $P_T$ ) del mismo puede compensarse con la presión magnética ( $P_o$ ) que ejerce el campo sobre el plasma ortogonalmente a las líneas de fuerza. Esta  $P_o$  se debe a que el campo magnético actúa sobre el plasma al interaccionar con las corrientes que circulan en el interior del propio plasma provocadas por la presencia del campo aplicado. Las fuerzas que desarrolla el campo magnético  $P_o = B_o^2 / 2 \mu_o$  compensan las fuerzas de expansión del plasma  $P_T = 2nkT$  siempre y cuando el cociente  $P_T/P_o$  llamado  $\beta$  sea menor a 1, esto es:

$$\beta \equiv \frac{P_T}{P_o} = \frac{4 \mu_o nkT}{B_o^2} < 1$$

cuando  $\beta < .1$  se dice que se tiene un plasma de "bajo beta", si  $\beta > .1$  se le llama de "alto beta".

Los sistemas de confinamiento magnético se clasifican en: abiertos cuando las líneas de fuerza del campo magnético salen del plasma y se cierran fuera de dicho plasma; y cerrados cuando estas líneas de fuerza se cierran dentro del plasma. Se han desarrollado diversas configuraciones con estos conceptos; sistemas abiertos con espejos magnéticos para reflejar las partículas emergentes de regreso al plasma, o con anillos magnéticos que estran-

gulan al plasma para alcanzar las condiciones de fusión, etc., sistemas cerrados donde la transformada rotacional es producida por corriente fluyendo en conductores externos como en el Stellarator, o por corriente fluyendo en el propio plasma como en los Tokamak.

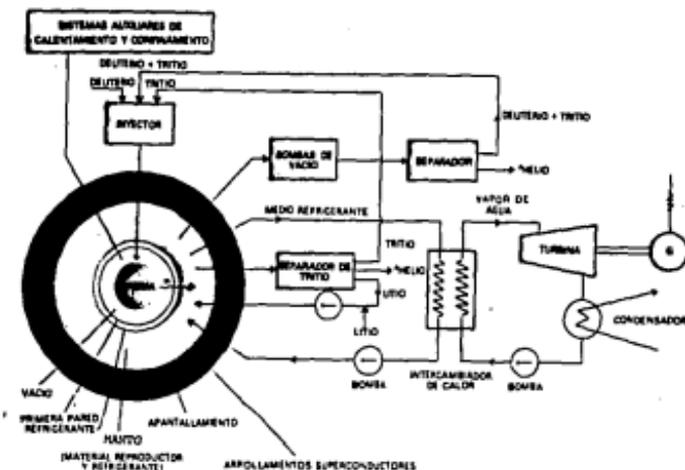
Este último es el dispositivo más prometedor para lograr la fusión termonuclear controlada, y es en el que se centran los mayores esfuerzos y recursos. Fue desarrollado originalmente en la U.R.S.S. y el nombre Tokamak es el acrónimo de "cámara Magnética Toroidal" en ruso; en éste sistema el plasma se confina mediante dos campos magnéticos, uno toroidal dirigido a lo largo de un recipiente en forma de toro, y otro poloidal cuyas líneas de fuerza circulares son simétricas respecto al eje del toro. Con el sistema Tokamak se han registrado grandes avances, por ejemplo se han alcanzado temperaturas de fusión y se han conseguido tiempos de confinamiento suficientes para lograr el parámetro de Lawson, pero aún no se han podido ligar esos logros. Al mismo tiempo se han resuelto varios problemas ingenieriles como la extracción de impurezas del plasma mediante "divertores", el calentamiento del plasma mediante inyecciones de haces neutros, la interacción del plasma y la pared así como la protección y blindaje, arrollamientos superconductores, plasmas de perfil no circular, etc. De cualquier modo existen todavía varios problemas por resolver, pero se calcula que se logrará controlar la fusión con el sistema Tokamak para la década de los '90, y que se tendrán reactores de fusión comerciales en operación a más tardar en 2015.

(6)  
Conceptualmente, un reactor Tokamak de potencia consistiría en el reactor Toroidal donde se estaría -

inyectando D y T como combustibles, rodeado de un manto de Li para criar T y que además funcionaría como fluido de trabajo para extraer la energía cinética de los neutrones de fusión en forma de calor, el cual cedería a través de un cambiador a un segundo circuito generador de vapor que movería las turbinas para producir electricidad. Todo esto apoyado por equipos auxiliares, de los cuales uno de vital importancia consistirá en un separador de T del Li para recircular dicho T (prácticamente inexistente en la naturaleza) como combustible de fusión. En la figura III-5 se muestra en forma esquemática lo expuesto.

FIG. III-5

REACTOR DE CONFINAMIENTO MAGNETICO

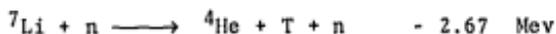
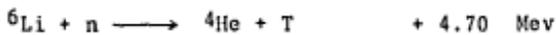


En la tabla III-4 se presenta en forma condensada una clasificación conceptual de dispositivos para fusión termonuclear con algunos ejemplos.

**TABLA III-4**  
**DISPOSITIVOS DE FUSION**

<u>CONFINAMIENTO</u>	<u>SISTEMA</u>	<u>EJEMPLO</u>
Magnético	Abierto	Espejos en serie (TASKA) Anillos móviles (KARIN)
	Cerrado	Stellarators (MSRIIB) Opresor de campo inverso (CRFPR) Tokamak (PLT, T-11, T-20)
Inercial	Laser	UMI-35, Omega
	Bombas termonucleares	Bomba N (de neutrones)
	Chorro iónico	Kensin-1, Proto-1
Gravitacional	Estrellas	Sol
Catalítico	Rayos cósmicos	
	Aceleradores	D-T- $\mu^-$

En todos los casos, las aplicaciones humanas de la fusión termonuclear, ya sea en aplicaciones militares o como fuente de energía, requerirán de grandes cantidades de Li; ya que además de criar T a través de las reacciones:



goza de magníficas características que lo hacen un estupendo material refrigerante. El Li metálico tiene el punto -

de fusión de 186°C y el de ebullición de 1341°C, este amplísimo intervalo de temperaturas (uno de los más amplios conocidos) aunado a su capacidad calorífica a presión constante de entre  $.72 \text{ cal g}^{-1}\text{C}^{-1}$  a  $1.29 \text{ cal g}^{-1}\text{C}^{-1}$  en este intervalo (similar al agua) hacen del Li un fluido de trabajo ideal para la conversión energética en los reactores de fusión. De hecho, de los 47 reactores Tokamak actualmente en fase de construcción únicamente 5 están diseñados para fluidos de trabajo sin Li, aunque aún éstos incluyen mantos de Li para cría de T.

Los fluidos de trabajo, a base de Li, contemplados son: Li metálico en su mayoría, compuestos como el fluoruro de litio-berilio (FLIBE  $\text{Li}_2\text{BeF}_4$ ) que aprovecha la multiplicación de neutrones de la reacción  $(n,2n)$  del  $^9\text{Be}$ , silicato de litio ( $\text{Li}_2\text{SiO}_3$ ), óxido de litio ( $\text{Li}_2\text{O}$ ), aluminato de litio ( $\text{LiAlO}_2$ ), diversas sales de litio; o aleaciones como Li 17% Pb 83% o la eutéctica Li 62% Pb 38% en las que se aprovecha la reacción  $(n,2n)$  del Pb. Se han sugerido compuestos de litio con C, Si, Pb, etc. basados en sus características térmicas y en la baja solubilidad del T en ellos. También se contempla la refrigeración indirecta por He, pero de cualquier modo se tendrá que disponer de suficientes cantidades de Li.

La refrigeración directa por Li líquido ofrece grandes ventajas como su sencillez, gran conductividad térmica y elevado calor específico; aunque presenta inconvenientes tales como su reactividad explosiva con el  $\text{H}_2\text{O}$  y el aire, su corrosividad y (la más importante) que por ser un metal conductor de corriente, interacciona con el campo magnético al moverse a través del mismo provocando caídas de presión de origen magnetohidrodinámico, que deberán --

compensarse con mayor potencia de bombeo.

Una aplicación nuclear actual del Li, menos espectacular que las expuestas, consiste en la producción de T para marcado de moléculas de uso en biología y medicina.

Finalmente, vale la pena recalcar que las aplicaciones, especialmente las energéticas (nucleares o no) - del litio, están creando un mercado de demanda a mediano - plazo para el cual vale la pena estar preparado, pues se - trata de un material estratégico cuya aplicación adecuada es un patrón del uso correcto (ecológica, económica y energéticamente hablando) de los recursos naturales.

REFERENCIAS

- (1) Industrial Minerals N° 185, February 1983 ed. by B. Coope
- (2) Mineral Facts and Problems  
Bureau of Mines Bulletin 672  
U.S. Dept. of the Interior 1981
- (3) Anuario Estadístico del Comercio Exterior de los Estados Unidos Mexicanos (1984)  
S.P.P. Dir. Gral. de Estadística
- (4) M. Llorens, A. Menzell, M. Villarrubia; Física y Tecnología del Reactor de Fusión  
Investigación y Ciencia, N° 51 diciembre 1980
- (5) A. Foster, R. Wright; Nuclear Engineering 3a. ed. 1977.  
Allyn and Bacon Inc.
- (6) H. Furth; Progresos Hacia un Reactor de Fusión -- TOKAMAK Investigación y Ciencia, N° 37 octubre 1979.
- (7) J. Lartigue; Thermonuclear Fuel Cycles  
IASTED Conference, Sta. Barbara Cal. U.S.A. 1985.
- (8) J. D. Lawson  
Proc. Phys. Soc. London Sect.  
B - 70, 6, 1957

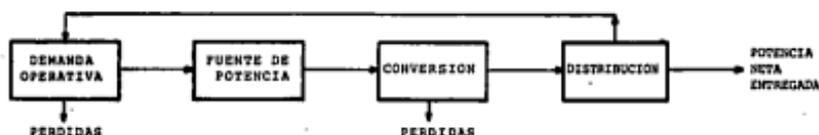
## CAPITULO IV

### DISEÑO DEL MANTO DE UN REACTOR DE FUSION .

#### IV.1. FLUJO Y BALANCE ENERGETICO

Cualquier planta de potencia, independientemente de su fuente de energía, requiere de un diseño conceptual que contemple los requisitos energéticos propios para el funcionamiento de la unidad, y las limitaciones y pérdidas relacionadas con las eficiencias de conversión en cada paso. Este panorama puede esquematizarse considerando cuatro etapas: 1) Demanda operativa; que es la energía necesaria para las operaciones de la planta. 2) Fuente de potencia; es la energía bruta entregada por la fuente. 3) Conversión; es la etapa donde se transforma la energía de la fuente en energía eléctrica para su distribución y 4) Distribución; esta secuencia se muestra en la figura IV-1.

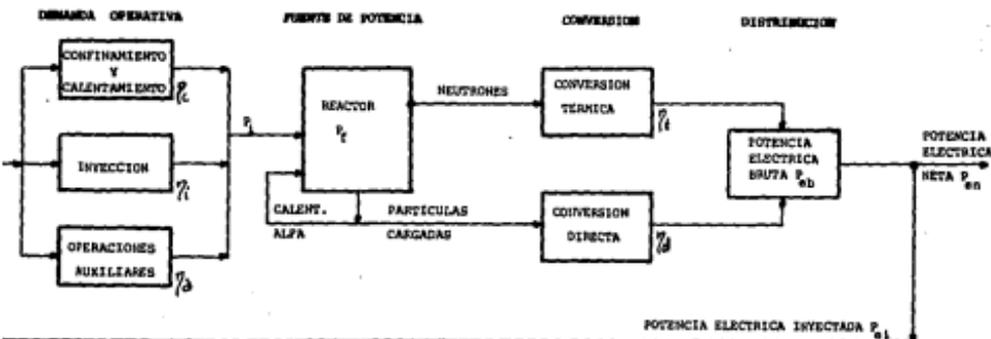
FIG. IV-1  
FLUJO DE ENERGIA



En el caso de un reactor de fusión termonuclear controlada<sup>(1)</sup> como fuente de potencia; la primera etapa contempla las necesidades energéticas para confinamiento del plasma, como sería el caso del sistema de refrigeración criogé-

nica para los magnetos superenfriados, el sistema de inyección y calentamiento, etc. En la segunda etapa, si se considera la fusión D - T, el 80% de la energía de fusión se entrega en forma de neutrones de elevada energía cinética - que "calentarán" al manto. El 20% restante está en forma de partículas cargadas ( $\text{He}^4$ ) que generan cierto grado de calentamiento del plasma. La tercera etapa está limitada simplemente por la eficiencia termodinámica de la conversión. Los reactores de fusión de generaciones posteriores, que están basados en reacciones de fusión que sólo rindan partículas cargadas, recurrirán a sistemas de conversión directa por captura de partículas o por inducción magnética, lográndose eficiencias muy superiores a las del ciclo termodinámico.

FIG. IV-2  
FLUJO DE ENERGIA EN UNA PLANTA DE POTENCIA DE FUSION



Para efectos de un análisis semicuantitativo del flujo energético en una planta de fusión como el mostrado en la fig. IV-2; se parte de la potencia de fusión  $P_f$  y  $\eta_{in} = f(\eta_c, \eta_i, \eta_a)$ , de modo que:

$$Q = \frac{\text{Potencia de Fusión}}{\text{Potencia Inyectada}} = \frac{P_f}{P_i} = \frac{P_f}{\eta_{in} P_{ei}}$$

la cantidad  $Q$  es llamada "ganancia energética" del reactor o factor de amplificación. La fracción de potencia eléctrica bruta que debe utilizarse como potencia eléctrica inyectada, considerando que los neutrones representan el 80% de la potencia de fusión  $P_f$ , será:

$$\epsilon = \frac{P_{ei}}{P_{eb}} = \frac{P_{ei}}{.8P_f \eta_t + r \cdot P_f \eta_d} = \frac{P_{ei}}{P_f (.8\eta_t + r \eta_d)}$$

donde  $r$  es la fracción de partículas cargadas disponibles para conversión directa. En el caso de los reactores de fusión D - T no se contempla la conversión directa, quedando entonces:

$$\epsilon = \frac{P_{ei}}{.8P_f \eta_t} \quad \text{y} \quad P_{ei} = .8P_f \eta_t$$

sustituyendo en  $Q$ .

$$Q = \frac{1}{.8 \eta_{in} \eta_t \epsilon}$$

Ahora se puede estimar la ganancia energética del reactor para simplemente mantenerlo operando, esto es cuando  $\epsilon = 1$ . Considerando eficiencias realistas de inyección  $\eta_{in} = .8$  y de conversión térmica  $\eta_t = .4$

$$Q = 3.9064$$

Una planta de potencia de rendimiento razonable, consumiría una fracción de potencia eléctrica bruta de un 15%, o sea  $\epsilon = .15$ , requiriendo por lo tanto una ganancia energética de:

$$Q = 26.04$$

lo que significa que el reactor debe generar más de 26 veces la potencia que demanda para su operación para que la planta sea rentable.

Por otra parte, la eficiencia total o general de la planta  $\eta_G$  vendría dada a través de:

$$\eta_G = \frac{P_{en}}{P_f}$$

$$P_{en} = P_{eb} - P_{ei}$$

combinando:

$$P_{en} = .8 P_f \eta_t - .8 P_f \eta_t \epsilon$$

$$P_{en} = .8 P_f \eta_t (1 - \epsilon)$$

$$\eta_G = .8 \eta_t (1 - \epsilon)$$

o en función de la ganancia energética:

$$\eta_G = .8 \eta_t - \frac{1}{\eta_t \ln Q}$$

lo que indica que aún con ganancias energéticas muy eleva--

das o con fracciones mínimas o nulas de potencia inyectada, la eficiencia general de la planta de potencia, con un ciclo de conversión termodinámico, no será mayor al 35%. Para los valores comunmente considerados:

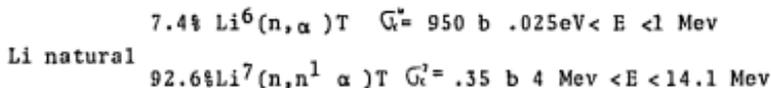
$$\eta_G = .277 = 28\%$$

la que comparada con eficiencias de 31-34% de plantas de --  
fisión con reactores LWR y PWR, o eficiencias de hasta ---  
39.5% en plantas con reactores de cría LMFBR; parece presen-  
tar cierta desventaja para el reactor de fusión. De cual-  
quier modo, las ventajas económicas, energéticas y ecológi-  
cas de los reactores de fusión, compensan con creces el pro-  
blema de la eficiencia.

#### IV.2. CALCULO DEL MANTO

La generación de energía a través de la fusión termonuclear controlada, basada en la reacción D - T, será llevada a cabo en reactores que esquemáticamente constarán de una cámara de reacción y un manto. En este manto se efectuarán dos procesos fundamentales: cría de tritio y deposición de la energía transportada por los neutrones de fusión; adicionalmente el material del manto puede ser utilizado como fluido de trabajo para acarrear la energía al ciclo térmico.

Para el cálculo se considerará un reactor toroidal de potencia térmica  $P_t$  (MW) que genera un flujo  $\phi$  ( $\text{cm}^{-2}\text{seg}^{-1}$ ) de neutrones con  $E = 14.1$  MeV. El manto considerado es Li natural cuyas reacciones de cría son: (2)



La reacción del  $\text{Li}^7$  rinde un neutrón térmico - apto para reaccionar con  $\text{Li}^6$ , por lo que no se requiere un manto enriquecido.

Entre la cámara de reacción y el manto existe una pared contenedora o primera pared cuya carga térmica máxima es  $4 \text{ MWm}^{-2}$ , de acuerdo a limitaciones metalúrgicas y a la experiencia obtenida de los reactores rápidos. Se han ensayado Ti, V, Mo, inox. 316, Nb, Al y C y en base a las propiedades nucleares, metalúrgicas, químicas así como su comportamiento ante la irradiación se eligió el Nb de acuerdo al criterio mostrado:

PRIMERA PARED Nb

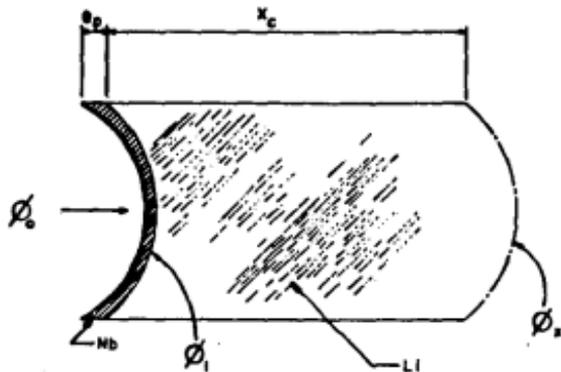
VENTAJAS

DESVENTAJAS

- |   |                             |
|---|-----------------------------|
| -Vida útil y resistencia a la radiación | -Maquinabilidad y soldadura |
| -Compatibilidad con Li y T              | -Disponibilidad industrial  |
| -Propiedades termomecánicas (irradiado) | -Costo                      |

El primer paso es el cálculo del "coeficiente de reproducción" o tasa de cría "T", para lo cual se efectuarán estimaciones monodimensionales basadas en la figura IV-3.

FIG. IV-3



$e_p$  = espesor de la primera pared (cm)

$x_c$  = espesor de cría del manto (cm)

El tritio formado por la reacción  $\text{Li}^7(n, n^1 \alpha)$ , - denominado  $T^7$ , será el flujo depositado en el tramo de espesor  $X_c$ , que es la diferencia de flujos. Por otra parte, el tritio formado por el neutrón térmico rendido por el  $\text{Li}^7$  -- con el  $\text{Li}^6$  por la reacción  $\text{Li}^6(n, \alpha)T$ , denominado  $T^6$ , será:

$$T^6 = T^7 \frac{\sum_i \text{Li}_i}{\sum_t \text{Li}_t} = T^7 \frac{3.29}{3.35} \quad (\text{secciones eficaces de Li natural en la región térmica})$$

$$T^6 = .9821 T^7$$

El litio total criado o tasa de cria  $T$  queda como:

$$T = T^6 + T^7$$

$$T = 1.9821 T^7$$

Ahora bién, el flujo depositado se calcula como:

$$T^7 = \phi_1 - \phi_x$$

$$\text{y: } \phi_x = \phi_1 e^{-\Sigma^u X_c}$$

$$\text{quedando: } T^7 = \phi_1 - \phi_1 e^{-\Sigma^u X_c}$$

$$T^7 = \phi_1 (1 - e^{-\Sigma^u X_c})$$

Siendo entonces la cría total:

$$T = 1.9821 \phi_1 (1 - e^{-\Sigma^u X_c})$$

Esto significa que sin considerar la primera pa red ( $\phi_1 = \phi_0$ ), en un manto infinito de Li natural ( $X_c \rightarrow \infty$ ) cada neutrón de la fusión D - T generaría 1.9821 átomos de T con una contribución aproximadamente igual de los dos

isótopos de Li.

Para evaluar la pared de Nb se considera un valor práctico para el espesor  $e_p$  entre 1 y 2 cm.; ya que más delgada que 1 cm. aporta problemas estructurales y metalúrgicos que acortan su vida útil, y mayor a 2 cm. genera problemas térmicos por el calentamiento y y neutrónico, reacciones nucleares que decrecientan la tasa de cría y elevado costo del material; por lo tanto:

$$\text{Nb } A=92.91 \text{ Ni}=5.45 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3} \quad \sigma_t=1.6b \text{ para } E > .025\text{eV}$$

$$\sum_t^{\text{Nb}} = (5.45 \times 10^{22}) (1.6 \times 10^{-24}) = .0872 \text{ cm}^{-1}$$

$$\phi_1 = \phi_0 e^{-.0872 e_p}$$

$$e_p = 1 \text{ cm} \quad \phi_1 = .9165 \phi_0$$

$$e_p = 2 \text{ cm.} \quad \phi_1 = .84 \phi_0$$

como la diferencia es de sólo 8.35%, se preferirá la primera pared gruesa para brindar ventajas estructurales al reactor.

Con esto en mente, la cría total viene a ser:

$$T = 1.9821 (.84\phi_0) (1 - e^{-\Sigma_c^{\text{Li}} X_c})$$

$$T = 1.665 (1 - e^{-\Sigma_c^{\text{Li}} X_c}) \phi_0$$

lo que implica que en un manto infinito cada neutrón de la fusión genera 1.665 átomos de t.

$$\sum_c^{Li} = Ni \left( \sigma_c^7 [.926] + \sigma_c^6 [.07] \right); \quad \sigma_c^6 = 0$$

para  $E > 1 \text{ MeV}$

$$\sum_c^{Li} = 4.63 \times 10^{22} (.35 \times 10^{-24} [.926])$$

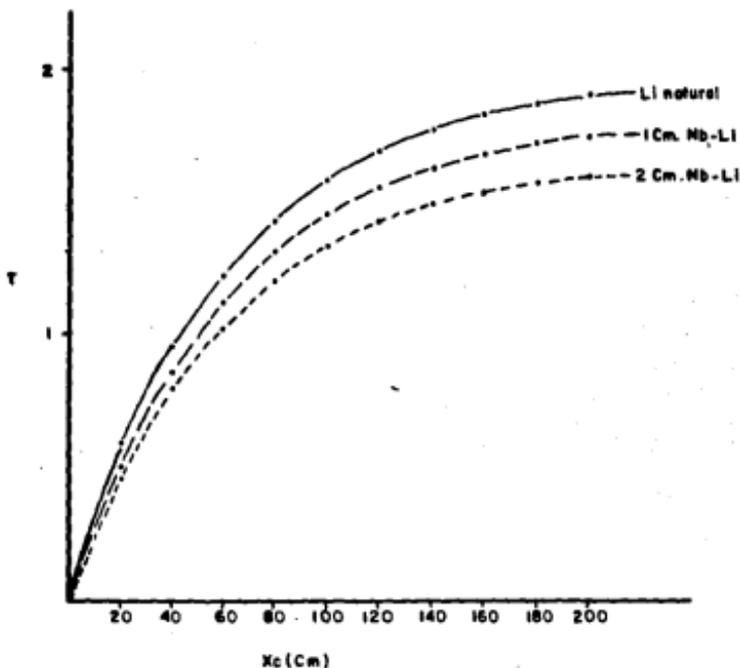
$$\sum_c^{Li} = .016 \text{ cm}^{-1}$$

$$\therefore T = 1.665 \phi_0 (1 - e^{-.016 X_c})$$

en forma gráfica se tiene:

FIG. IV-4

TASA DE CRIA EN FUNCION DEL ESPESOR DEL MANTO



De la ecuación de cría se obtiene el espesor en función de la tasa, que sería:

$$X_c = -\frac{1}{.016} \ln \left( 1 - \frac{T}{1.665} \right) \text{ cm.}$$

El espesor mínimo necesario para mantener el balance entre consumo y cría de T se da cuando T=1;

$$\text{para } T = 1 \quad X_c = 57.36 \text{ cm ;}$$

ésto significa que para cualquier  $X_c > 57.36 \text{ cm}$ .  $T > 1$ , o sea que se tiene ganancia de combustible.

Para evaluar que  $X_c > 57.36 \text{ cm}$  se necesita, se efectuará el análisis en función del frenado de neutrones para la deposición de su energía cinética:

-considerando el decremento logarítmico de la energía desde  $E_o = 14.1 \text{ MeV}$  a  $E_n = 4 \text{ MeV}$

$$\ln \frac{E_o}{E_n} = \ln \frac{14.1}{4} = 1.2599$$

-y la letargia  $\xi$

$$\xi = \frac{2}{A + 2/3} = \frac{2}{6.93 + 2/3} = 0.2633$$

se obtiene el número "n" de colisiones necesarias para que los neutrones pasen de 14.1 a 4 MeV en Li natural.

$$n = \frac{\ln(E_o/E_n)}{\xi} = 4.7855 = 5 \text{ colisiones}$$

-aparte, se estima  $\lambda_{tr}$  el camino medio de transporte por evento no absorbente.

$$\lambda_{tr} = \frac{1}{\Sigma_s(1-\overline{\cos \psi})} \quad \sigma_s^{Li} = .9b \text{ para } E > 1 \text{ MeV}$$

$$\Sigma_s^{Li} = .0417 \text{ cm}^{-1}$$

$$\overline{\cos \psi} = \text{coseno medio del ángulo de dispersión} = \frac{2}{3A}$$

$$\overline{\cos \psi} = \frac{2}{3(6.93)} = .0962$$

$$\lambda_{tr} = \frac{1}{.0417(1-.0962)} = 26.53 \text{ cm.}$$

por lo tanto se requieren:

$$4.7855 \text{ eventos } \left( \frac{26.53 \text{ cm}}{\text{evento}} \right) = 126.96 \text{ cm. de Li para deposición}$$

con este espesor llamado espesor de frenado  $X_f$ , se obtiene una cría:

$$T = 1.665 \phi_0 (1 - e^{-.016[126.96]})$$

T = 1.4466  $\phi_0$ . que es el 86.88% de la máxima cría teórica con un manto infinito

quedando un flujo remanente  $\phi_r$  de:

$$\phi_r = .84 \phi_0 e^{-.016(126.96)}$$

$$\phi_r = .1102 \phi_0$$

este flujo remanente no tiene mucha utilidad para cría rápida, ya que para el espectro neutrónico  $4 \text{ MeV} > E > 1 \text{ MeV}$  la sección eficaz del  $\text{Li}^7$   $\Sigma_C^7 = 0$  y la de  $\text{Li}^6$  es despreciable.

Dada esta situación, se analizará el manto en función de la extracción de calor:

-el Li natural tiene las siguientes características.<sup>(4)</sup>

$$\rho = 475 \text{ kg m}^{-3} \quad C_p = 4200 \text{ J kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$$

se tomará un salto térmico  $\Delta T = 300^\circ\text{C}$  con  $T_o = 300^\circ\text{C}$ ,  $T_f = 600^\circ\text{C}$  por ser éste el intervalo de mejor comportamiento que como fluido y químico presenta en relación a la eficiencia del ciclo.

-entonces se tiene:

$$P_t \text{ (MW)} = m C_p \Delta T \quad 1 \text{ W}\cdot\text{s} = 1 \text{ J}$$

$$m \text{ (kg d}^{-1}\text{)} = 6.9 \times 10^4 P_t \quad \text{ésta es la masa a bombear diariamente para extraer el calor producido, en volúmen:}$$

$$V \text{ (m}^3 \text{S}^{-1}\text{)} = 1.67 \times 10^{-3} P_t$$

$$V \text{ (m}^3 \text{d}^{-1}\text{)} = 144.3 P_t$$

El volúmen en el canal refrigerante es la superficie caliente multiplicada por el "espesor térmico"  $X_t$  del manto; en el caso de un toroide:

$$S = 4 \pi^2 rR \text{ (m}^2\text{)}$$

$$V = S X_t \text{ (m}^3\text{)}$$

de donde:

$$4 \pi^2 r R X_t = 1.67 \times 10^{-3} P_t$$

quedando:

$$X_t = 4.23 \times 10^{-3} \frac{P_t}{r R} \text{ cm}$$

como la carga térmica  $F_p^{\text{máx.}} = 4 \text{ MW m}^{-2}$  es determinante en el diseño, la potencia térmica se relaciona con la geometría como:

$$P_t = 4 \pi^2 r R F_p$$

sustituyendo para  $X_t$

$$X_t = \frac{1.67 \times 10^{-3} (4 \pi^2 r R) F_p}{4 \pi^2 r R} = .7 \text{ cm.}$$

Evidentemente el espesor térmico del manto ( $X_t$ ) queda sobradamente compensado por el espesor de cría ( $X_c$ ), y éste por el espesor de frenado ( $X_f$ ). Entonces la optimización del manto radica en mejorar (disminuir) el espesor de frenado  $X_f = 126.96 \text{ cm.}$  a través del uso de moderadores, reflectores y multiplicadores de neutrones, como p.ej.: -- FLIBE, sales de Li, aleaciones Li-Pb; o diseñando arreglos de capas alternadas con grafito como moderador, o con diversas secuencias de paredes -material de cría- refrigerante, etc.

En este trabajo se considera solamente Li natural y un reflector exterior de grafito por su ligereza, maquinabilidad, nula interferencia con el campo magnético y sus magníficas propiedades reflectoras.

El primer paso es calcular el albedo del grafito ( $\alpha_c$ ) definido como:

$$\alpha_c = \frac{\text{corriente neutrónica reflejada}}{\text{corriente neutrónica incidente}}$$

que en el arreglo geométrico monodimensional en el que se ha conducido el cálculo, se computa como:

$$\alpha_c = \frac{1 - \frac{2D}{L} \operatorname{ctgh} \left( \frac{X_r}{L} \right)}{1 + \frac{2D}{L} \operatorname{ctgh} \left( \frac{X_r}{L} \right)}$$

reflector : grafito  
 $X_r$  = espesor del reflector  
 $D$  = coef. de dif. del reflector  
 $L$  = long. de dif. del reflector

resolviendo:

$$N_i^c = 8.03 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3} \quad \sigma_a^c = .0034b \quad \text{para neutrones } E > 1 \text{ MeV}$$

$$A = 12.011 \quad \sigma_s^c = 4.66b$$

$$\frac{D}{L} = \sqrt{\frac{\Sigma_a}{3 \Sigma_{tr}}} \quad \Sigma_{tr} = \Sigma_s (1 - \overline{\cos \psi})$$

$$L = \frac{1}{\sqrt{3 \Sigma_{tr} \Sigma_a}} \quad \overline{\cos \psi} = \frac{2}{3A}$$

$$\frac{D}{L} = .0174 \quad \frac{2D}{L} = .0348$$

$$D = .9448 \text{ cm} \quad L = 54.3 \text{ cm}$$

$$\alpha_c = \frac{1 - .0348 \operatorname{ctgh} \left( \frac{X_r}{54.3} \right)}{1 + .0348 \operatorname{ctgh} \left( \frac{X_r}{54.3} \right)}$$

<u>Xr/54.3</u>	<u><math>\alpha_c</math></u>	<u>Xr (cm. de C)</u>
.1	.4824	5.43
.2	.7002	10.86
.3	.7866	16.29
.4	.8322	21.72
.5	.8599	27.15
.6	.8783	32.58
.7	.8911	38.01
.8	.9004	43.44
.9	.9073	48.87
1	.9126	54.3
$\infty$	.9327	$\infty$

como se ve, a partir de un espesor de reflector de unos 43 cm. en adelante, el coeficiente de reflexión tiende a ser asintótico entre 90% y 93%; debido a ésto y en aras de la economía de materiales y tamaño, se elige un espesor de reflector  $X_r = 44$  cm

$\therefore X_r = 44$  cm,  $\alpha_c = .9026$ ;

con este espesor se logra el 97% de la máxima reflexión teórica alcanzable con un reflector infinito.

Este reflector permite visualizar la optimización del manto desde dos puntos de vista: economía neutrónica y ahorro de manto como se verá a continuación:

-economía neutrónica:

dado que con un espesor de manto  $X_f = 126.96$  se tiene un flujo remanente  $\phi_r = .1102 \phi_0$  que sufrirá reflexión, se --

obtiene:

$$\phi_R = .1102\phi_0$$

$$\phi \text{ reflejado} = \alpha_c \phi_R = .9026 (.1102) \phi_0$$

$$\phi \text{ ref.} = .0995\phi_0$$

y el flujo perdido  $\phi_p$  será:

$$\phi_p = \phi_R - \phi \text{ ref.} = .1102\phi_0 - .0995\phi_0$$

$$\phi_p = .0107\phi_0$$

para lograr éste abatimiento de flujo se requeriría un espesor equivalente de Li sin reflector  $X_{eq}$  tal que:

$$.0107\phi_0 = .84\phi_0 e^{-.016X_{eq}}$$

$$X_{eq} = 272.69 \text{ cm}$$

con éste espesor equivalente, la tasa de cría sería:

$$T_1 = 1.665 \phi_0 (1 - e^{-.016[272.69]})$$

$$T_2 = 1.6438\phi_0$$

es decir, se alcanza el 98.73% de la máxima cría teórica - con un manto infinito, logrando un elevado aprovechamiento neutrónico, ya que se incrementa en aproximadamente 14% la cría usando el mismo manto de 126.96 cm., esto es:

$$X_f = 126.96 \text{ cm. sin reflector } T = 1.4466\phi_0$$

$$X_f = 126.96 \text{ cm. con reflector } T_r = 1.6438\phi_0$$

$$\frac{\Delta T}{T} (100) = 13.63\%$$

-ahorro de manto:

en este enfoque se busca un nuevo espesor del manto  $X_f'$  tal que con el reflector genere una tasa de cría igual a la lograda con  $X_f = 126.96$  cm. sin reflector, o sea  $T = 1.4466\%$ . es decir:

$$\begin{aligned} T &= \text{flujo depositado} + \text{flujo reflejado} \\ T &= 1.665\phi_0 \cdot (1 - e^{-.016X_f'}) + \phi_{\text{ref}} (1 - e^{-.016X_f'}) \\ T &= (1 - e^{-.016X_f'}) (1.665\phi_0 + .0995\phi_0) \end{aligned}$$

resolviendo:

$$\begin{aligned} 1.4466 &= 1.7645 (1 - e^{-.016X_f'}) \\ X_f' &= 107.12 \text{ cm} \end{aligned}$$

lo que significa que un manto de 107.12 cm con un reflector de grafito de 44 cm. generan la misma tasa de cría que un manto de 126.96 cm. sin reflector, con la consiguiente economía en materiales y estructura, dando además como extra - el servicio de blindaje. El ahorro obtenido es:

$$\frac{\Delta X_f}{X_f} (100) = 15.63\%$$

Debido a que una tasa de cría  $T = 1.4466$  es lo suficientemente elevada, y a que geometrías compactas dan muchas ventajas para el diseño y operación, se decide utilizar como espesor del manto  $X_f' = 107.12$  cm.

Con este dato se procede a estimar las necesida

des de litio en función a la capacidad térmica instalada del reactor a través de:

$$\text{volúmen del manto} \quad V_m = 4 \pi^2 r R X_f' \left(1 + \frac{1}{2} \frac{X_f'}{r}\right)$$

$$\text{masa del manto} \quad m_m = V_m \rho_{Li} = 4 \pi^2 r R X_f' \rho_{Li} \left(1 + \frac{1}{2} \frac{X_f'}{r}\right)$$

$$\text{potencia térmica} \quad P_t = 4 \pi^2 r R F_p^{\text{máx}} F_p^{\text{máx}} = \text{carg. térmica a la 1a. pared (máx.} = 4 \text{MW}_m^{-2})$$

por lo tanto:

$$\frac{m_m}{P_t} = \frac{1.0712 \text{ m} (475 \text{ kg m}^{-3})}{4 \text{ MW}_m^{-2}} \left(\frac{3}{2}\right) \text{ con } X_f' = r$$

$$\frac{m_m}{P_t} = 190.8 \frac{\text{kgLi}}{\text{MW}_t}$$

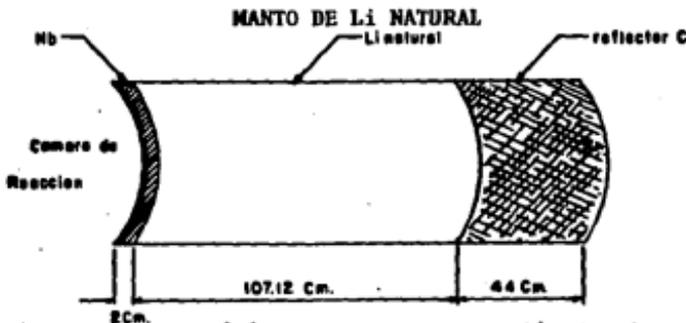
Con este valor se estimarán y proyectarán las necesidades de litio natural para fusión termonuclear controlada en un capítulo posterior.

Con los resultados obtenidos, el manto quedaría como se muestra en la figura IV-5.

Finalmente, ya que el espesor calculado da una tasa de cría  $T = 1.4466$  y por lo tanto una ganancia  $G = T - 1$  de:

$$G = .4466$$

FIG. IV-5



Se usará éste valor y la ecuación (e) del capítulo I para evaluar el tiempo de duplicación de un reactor de referencia:

$$(e) \quad 2X_0 = \frac{G P_t f}{\lambda Q} (1 - e^{-\lambda t_2}) + X_0 e^{-\lambda t_2}$$

### Reactor de Referencia

Potencia térmica	$P_t = 1000 \text{ MW}$
Ganancia	$G = .4466$
Factor de carga del reactor	$f = .8$
Inventario inicial de tritio hasta retroalimentación (1 año)	$X_0 = 45 \text{ kg} = 4 \times 10^{27} \text{ átomos}$
Energía liberada por reacción	$Q = 3.6 \times 10^{-12} \text{ Ws}$
Constante de decaimiento del tritio	$\lambda = .0565 \text{ a}^{-1} = 1.79 \times 10^{-9} \text{ s}^{-1}$

$$t_2 = \frac{-\ln\left(\frac{2X_0}{X_0} \frac{\lambda Q}{\lambda Q} - \frac{G P_t f}{G P_t f}\right)}{\lambda}$$

$$X_0 \lambda Q = 2.5202 \times 10^7 \text{ W} \quad G P_t f = 3.5728 \times 10^8 \text{ W}$$

$$t_2 = 1.397 \text{ años}$$

Lo que significa que en unos 17 meses de operación nominal del reactor de referencia, se contaría con 90 kg de T, suficientes para instalar un segundo reactor sin dejar de operar el primero.

### REFERENCIAS

- (1) R. Mills; Some Engineering Problems of Thermonuclear Reactors, Princeton University 1974
- (2) E. Batalla, J. Castillo; Consideraciones Tecnológicas en Torno al Proyecto de un Reactor --- TOKAMAK  
Energía Nuclear, España Julio-Agosto 1979
- (3) G. Casini; First Wall and Blanket Problems in Fusion Power Reactors  
Commission of the European Communities  
Joint Research Centre, Italia 1980
- (4) R. Perry, C. Chilton; Chemical Engineers' Handbook 5a. ed. 1974  
Mc. Graw-Hill
- (5) J. Duderstadt, L. Hamilton; Nuclear Reactor Analysis ed. 1976  
John Wiley and Sons Inc.

## CAPITULO V MERCADO DEL LITIO

### V.1. DEMANDA Y PRECIOS HISTORICOS

De acuerdo a lo mostrado en el capítulo III, el litio encara un futuro promisorio, para cuya proyección se requiere de cierto grado de análisis histórico de las condiciones comerciales relacionadas con este elemento, como se muestra a continuación:

#### RELACIONES SUMINISTRO-DEMANDA

Estados Unidos continúa siendo el principal productor y consumidor de litio y sus compuestos, permaneciendo completamente autosuficiente y exportando aproximadamente el 30% de su producción; principalmente a Alemania Federal y Japón, y en menores, pero significativas, cantidades a Canadá, México y Sudamérica.

El consumo mundial de litio es básicamente en forma de productos químicos. El uso directo de concentrados minerales de litio es menor al 15% del consumo total. El carbonato ( $\text{Li}_2\text{CO}_3$ ) contabiliza más del 50% del consumo de litio, por lo que el comercio internacional utiliza como unidad de medida al "carbonato equivalente".

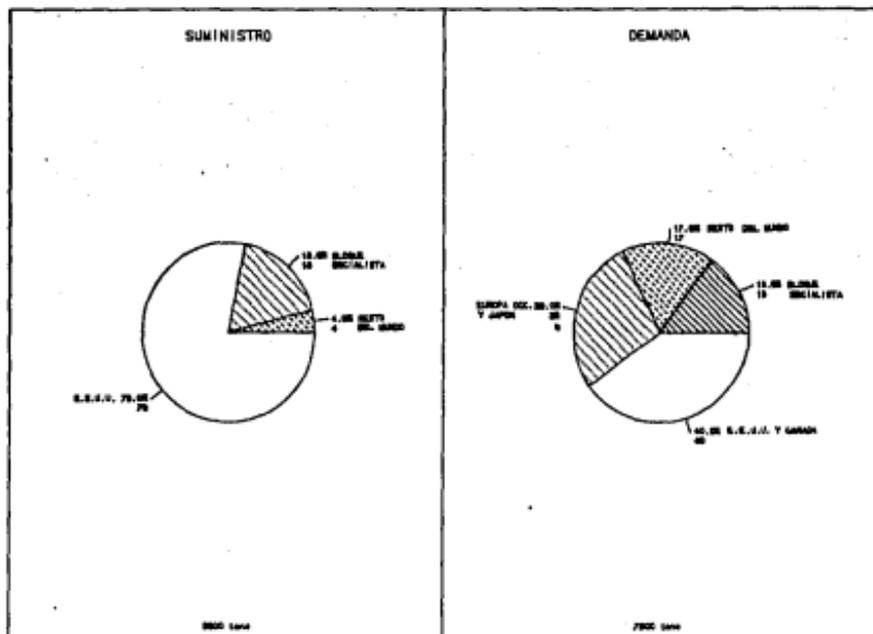
El suministro mundial<sup>(1)</sup> total en 1984, incluyendo los inventarios norteamericanos liberados, contuvieron --- 9,000 tons. de "carbonato equivalente". De ésto 78% se originó en E.E.U.U., 18% en países de economía centralizada -- (U.R.S.S.) y el resto provino principalmente de Africa.

El consumo mundial total durante el mismo periodo fue de 7,900 tons., lo que indica la creación de un inventario de 1,300 tons., ya que el litio se considera material estratégico. Este consumo se distribuyó principalmente en E.E.U.U. y Canadá (40%), Europa Occidental y Japón (28%), el bloque socialista (15%) y el resto del mundo con un 17% como se muestra en la figura V-1.

A pesar de que la industria del aluminio está operando al 76% de su capacidad, y ésta es la mayor consumidora de litio (figura III-1); el consumo mundial de litio creció 11% en 1984 y los precios promedio crecieron 5%, lo que es indicativo de un giro industrial sano.

FIGURA V-1

SUMINISTRO - DEMANDA DE Li (1984)



La evolución histórica de la demanda y precios<sup>(2)</sup> se muestra en la tabla V-1; en la que se observa, durante la década reportada, un incremento estable de precios del 6.36% anual. Muy en concordancia, y ligeramente superior al crecimiento industrial promedio durante el mismo periodo.

**TABLA V-1**  
**LITIO 75-84**

<u>AÑO</u>	<u>DEMANDA</u> <u>TONS. DE Li CONTENIDO</u>	<u>PRECIO</u> <u>DLS. Kg-1 Li<sub>2</sub>CO<sub>3</sub></u>
1975	6,550	1.83
1976	6,350	1.83
1977	9,300	1.92
1978	7,700	2.03
1979	7,250	2.33
1980	7,250	2.64
1981	6,575	2.97
1982	6,300	3.11
1983	7,180	3.23
1984	7,900	3.39

**DEMANDA NACIONAL**

Dada la gran variedad de aplicaciones para el litio y sus compuestos, aún las economías de países en desarrollo o con grandes retrasos tecnológicos como México requieren de estos productos. La demanda nacional se cubre en su totalidad con importaciones, básicamente de E.E.U.U. El destino de las importaciones va desde soldaduras (Cia. Ind. del Norte, S.A.) hasta chicles (ADAMS) pasando por galletas (GAMESA), fotografía (KODAK) fármacos (Eli Lilly)-

textiles (Nylon de México) y cerámica y vidrio (El Anfora, Corning Glass, Vitromex, etc.). Los volúmenes y valores de las importaciones<sup>(3)</sup> se muestran a continuación:

TABLA V-2  
LITIO EN MEXICO

$\text{Li}_2\text{CO}_3$  Fracción Arancelaria 28.42A.003 ad-valorem 25%

1980		1981		1982		1983	
TONS.	DLS.	TONS.	DLS.	TONS.	DLS.	TONS.	DLS.
99.6	277,760	116.2	345,069	94.4	294,187	174.9	553,795

$\text{Li}_2\text{O-LiOH}$  Fracción Arancelaria 28.28A.007 ad-valorem 10%

1979		1980		1981		1982		1983	
TONS.	DLS.								
173.6	511,049	174.6	594,797	226.4	835,176	231.2	675,587	50.7	207,176

$\text{LiCl}$  Fracción Arancelaria 28.30A.009 ad-valorem 7%

1979		1980		1981		1982		1983	
TONS.	DLS.								
5.7	26,511	6.1	29,832	19.6	89,154	12.5	56,567	10.6	51,370

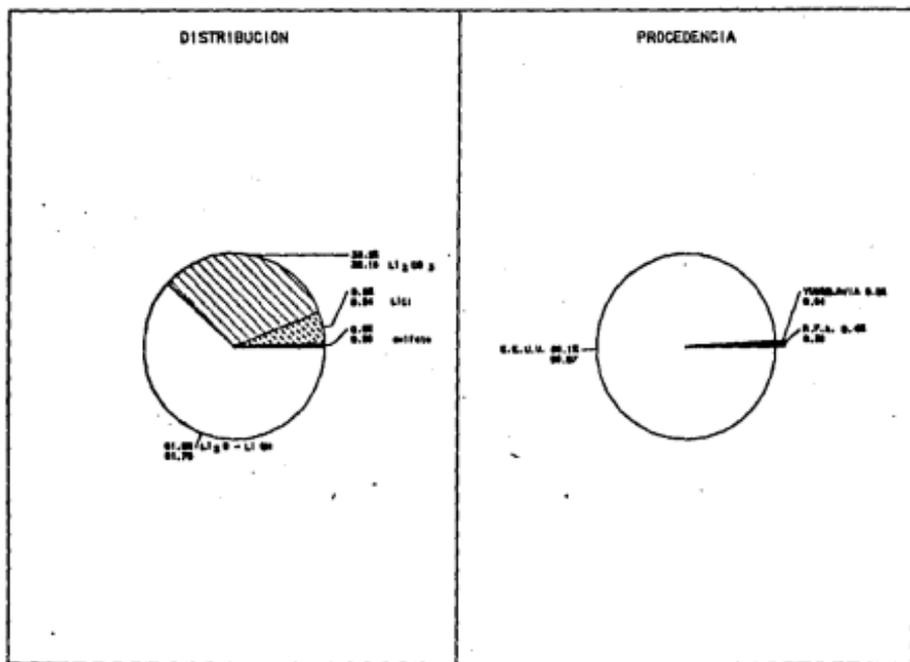
$\text{Li}_2\text{SO}_4$  Fracción Arancelaria 28.38A.010 ad-valorem 10%

1979		1980		1981		1982		1983	
TONS.	DLS.	TONS.	DLS.	TONS.	DLS.	TONS.	DLS.	TONS.	DLS.
1.9	10,559	.6	5,302	.05	989	.2	5,616	.1	2,923

**TABLA V-3**  
**VARIACION DE PRECIOS DE LITIO EN MEXICO (DLS. kg<sup>-1</sup>)**

	<u>1979</u>	<u>1980</u>	<u>1981</u>	<u>1982</u>	<u>1983</u>
Li <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	--	2.79	2.97	3.12	3.17
Li <sub>2</sub> O-LiOH	2.94	3.41	3.69	2.92	4.09
LiCl	4.65	4.89	4.55	4.53	4.85
Li <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	5.56	8.84	19.78	28.08	29.23

**FIGURA V-2**  
**DISTRIBUCION Y PROCEDENCIA DE LAS IMPORTACIONES DE LITIO**



Los datos mostrados arrojan una cifra de crecimiento promedio del Li en México del 6.33% anual, a pesar del desplome iniciado en 1982. La distribución del consumo por su parte, muestra variaciones menores; la principal de las cuales es una ligera baja en  $\text{Li}_2\text{O-LiOH}$  compensada por un aumento equivalente en  $\text{Li}_2\text{CO}_3$ . Ya que con éste último es relativamente fácil fabricar el óxido o el hidróxido.

Por lo visto, la perspectiva del mercado de -- aplicaciones convencionales del Li en México, denota un comportamiento similar al mercado mundial. Lo que hace prever un crecimiento sostenido en la demanda de este producto, -- particularmente en forma de carbonato, ya que éste último es la base de comercio del metal, y la materia prima para la generación de los demás compuestos de litio.

## V.2. CAPACIDAD INSTALADA

Más del 80% de la producción mineral de Li en los países de economía de mercado, está en los E.E.U.U.; a partir del espodumeno de Carolina del Norte y  $\text{LiCl}$  de las salmueras del desierto de Nevada. La mayor parte de la producción remanente proviene de Africa y Sudamérica, principalmente de la lepidolita de Rodesia, lepidolita y petalita de Brasil, y la de salmuera del Salar de Atacama en Chile. El único productor europeo de minerales de litio es Portugal, pero su producción representa menos del 1%. De los países de economía controlada, la URSS produce el 80% de los minerales de litio y China Continental el resto.

**TABLA V-4**  
**CAPACIDAD MUNDIAL DE PRODUCCION DE MINERALES DE LITIO**  
**(TONS. DE Li CONTENIDO)**

<u>PAIS</u>	<u>1975</u>	<u>1980</u>	<u>1985</u>
E.E.U.U.	5,500	6,000	7,000
Brasil	60	100	150
Chile	---	---	1,000
Argentina	10	10	10
Rodesia	1,000	1,000	1,200
URSS	1,000	1,100	1,400
China	---	350	350
<b>T O T A L</b>	<b>7,570</b>	<b>8,560</b>	<b>11,110</b>

Los datos mostrados en la tabla V-4 indican un crecimiento del 3.91% durante la década; aunque este crecimiento ha permitido satisfacer la demanda, y aún crear cierta sobreoferta, será rebasado por el crecimiento de la demanda a muy corto plazo.

En relación a la producción, refinamiento y elaboración de productos del litio, existen varios productores en el mundo; de los que las dos más grandes son norteamericanas: Lithium Corp. of America (Lithco) y Foote Mineral Co. las que juntas producen unas 4,850 toneladas anuales de litio (contenido) en forma metálico o química. En Sudamérica, la Sociedad Chilena de Litio Ltda. (SCL) arrancó en 1984 y a la fecha produce cerca de 1,000 toneladas anuales de litio contenido en productos químicos, básicamente  $\text{Li}_2\text{CO}_3$ . La URSS produce 1,400 tons. anuales y China Continental 350. En Europa, Metallgesellschaft AG de la RFA produce todo ti-

po de compuestos de litio y es considerada la tercera mayor fábrica de este tipo de compuestos en el mundo, seguida por las compañías japonesas Honjo Chemical Corp. y Asia Lithium Corp. La capacidad instalada mundial para la elaboración de litio y sus compuestos hasta 1985 se calcula en 8,000 tons. anuales y no se han contemplado expansiones hasta 1990, a pesar de que en 1985 se inició la instalación de 3 fundiciones que producirán aleaciones Li-Al para la industria aeroespacial, las cuales representarán el 12.5% de la demanda mundial de litio para el año 2000.

**TABLA V-5**  
**PRINCIPALES PRODUCTORES DE LITIO**

<b>COMPANIA</b>	<b>MATERIA PRIMA</b>	<b>PRODUCTOS</b>
Foot Mineral Co.	Espodumeno Salmuera	Li <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> , Haluros Li <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> , Butilitio, óxido e hidróxido
Lithium Corp.	Espodumeno	Todos
Sociedad Chilena del Litio	Salmuera	Li <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>
Metallgesellschaft A.G.	Li <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	Todos
Honjo Chemical Co.	Li <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	Todos
Asia Lithium Co.	Li <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	Butilitio
URSS	Petalita, lepidolita	Todos
China	Lepidolita, salmuera	Li <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> , Butilitio

**TOTAL**

**8,000 tons. anuales**

**(Li contenido a plena capacidad)**

### V.3. MERCADO DEL LITIO PARA LA FUSION

Si se pretende efectuar un presupuesto realista de la demanda de litio, sobre todo a mediano y largo plazo; deberá tomarse en cuenta la demanda explosiva de este metal generada por la construcción, arranque y operación de reactores de fusión termonuclear controlada. Evento que ocurrirá a más tardar para 1995, y comercialmente para 2015.

Para este efecto se realizó un inventario<sup>(5)</sup> de reactores de fusión en construcción, en cuyo diseño se contemplan mantos de litio. Aunque en algunos casos el manto no es de Li puro, sino compuestos o aleaciones; con el objeto de no complicar incesariamente las estimaciones, se considerará al manto como 100% Li. La tabla V-6 muestra los reactores en construcción y la potencia térmica instalada. Esta información se obtuvo del reporte de OIEA: Nuclear -- Fusión 1983.

**TABLA V-6**  
**INVENTARIO DE REACTORES DE FUSION**

<u>PAIS</u>	<u>REACTOR</u>	<u>POTENCIA TERMICA (GW)</u>
OIEA	INTOR	.62
Japón	FER	.44
	SPTR-P	3.7
	MRR	2
Países Bajos	BSPR	2.5
Inglaterra	MKIIC	1.8
E.E.U.U.	STARFIRE	4
	STARFIRE/D	1.05
	DD REACTOR	2.8

<u>PAIS</u>	<u>REACTOR</u>	<u>POTENCIA TERMICA (GW)</u>
E.E.U.U.	SAFFIRE	.1
	SPHERO-MAK	2.9
	RFP-REACTOR	3
	Fast Linner	.43
	Linear Theta Pinch	2.65
	Compact Torns	1
	Dense Z-Pinch	.044
	LINUS	3.35
	Elmo Bumpy Torus	4.03
	Modular Stellarator	4.8
	Tandem Mirror Reactor	3.5
	TMNS	.25
	Tandem Mirror Hybrid	3.6
	MRFRMR	.3
	TMR	3.5
	TRACT	.4
	Basic Tandem Mirror	8.605
	LINUS-II	2.5
	NUWMAK	2.097
	TETR	.36
	CTHR	5.34
	DTHR	.3
	UWMAK-I	5
UWMAK-II	5	
UWMAK-III	5	
URSS	TORSATRON	4
	GTRT	6.75
	TROL-3	7.5
<b>T O T A L</b>		<b>105.216</b>

Por si mismos, y de acuerdo al resultado obtenido en el inciso IV-2, estos reactores demandan:

$$105,216 \text{ MW}_t \left( 190.8 \frac{\text{kgLi}}{\text{MW}_t} \right) = 20'075,212.8 \text{ KgLi}$$

estas  $\approx$  20,000 toneladas de litio representan el 250 % de la actual capacidad instalada anual; lo que confiere al litio un extraordinario potencial a mediano y largo plazo.

#### V.4. PROYECCION DE LA DEMANDA

Efectuar una proyección de la demanda de un material tan versátil como el litio, requiere de una serie de premisas, las cuales conducen a una gran dispersión de las cotas del pronóstico. La proyección se realizó con las siguientes consideraciones:

- a) Los usos tradicionales del litio como son: hullas, grasas, abonos, cerámica, vidrio y especialmente aluminio crecerán de acuerdo al crecimiento industrial promedio (6.36%) hasta 1995. De 1995 a 2005 el crecimiento industrial promedio bajará de acuerdo al descenso del crecimiento poblacional; es decir: hasta 1995 el crecimiento poblacional se considera unitario, la ONU estima que de 1995 a 2005 este será de .84, por lo tanto el crecimiento industrial promedio será de 5.4%. De 2005 en adelante se estimará un crecimiento del 3% conservadoramente.
- b) De los usos nuevos del litio, el de crecimiento más explosivo es el de baterías y almacenamiento de energía, el cual se estima que representará el 23% del consumo de litio para 1995. Con

- c) un crecimiento sostenido del 3% anual. El uso en fusión parte de 20,000 toneladas de litio en 1995 y un crecimiento de 1.55% anual a partir de esa fecha. Este crecimiento es el proyectado en la demanda energética mundial. Esta condición se aplica en 2 formas: considerando que se crea una demanda real de las 13,000 tons. por una parte; y considerando que dicho tonelaje se satisface de los inventarios creados, creciendo de ahí en adelante, evitando así una proyección excesivamente optimista.

Los resultados obtenidos se muestran en las tablas y gráficas siguientes:

**TABLA V-7**  
**PROYECCION DEL CONSUMO MUNDIAL DE LITIO**  
**(TONS. DE LITIO CONTENIDO X 10<sup>3</sup>)**

USOS	1985	1990	1995		2000		2005		2015		2025	
			1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
			Convencionales	8	11	15	15	19.5	19.5	25	25	33
Baterías	-	1	4.5	4.5	5.3	5.3	6.5	6.5	9	9	12	12
Fusión	-	--	--	20	1	21	2.2	23	5	26	8	31
<b>TOTAL</b>	<b>8</b>	<b>12</b>	<b>19.5</b>	<b>39.5</b>	<b>25.8</b>	<b>45.8</b>	<b>33.7</b>	<b>54.5</b>	<b>47</b>	<b>68</b>	<b>64</b>	<b>87</b>

- 1) Los reactores arrancan con litio proveniente de inventarios creados.
- 2) Los reactores demandan litio nuevo para el arranque

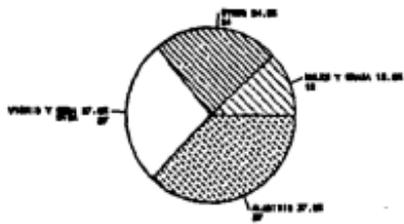
**TABLA V-8**  
**PROYECCION DE LA DISTRIBUCION DE USOS DE LITIO**

USOS	1985	1990	1995		2000		2005		2015		2025	
			1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
Vidrio y cerámica	27	25										
Hules y grasas	12	11										
Aluminio	37	33										
Otros	24	22										
<b>SUB-TOTAL CONVENCIONALES</b>	<b>100</b>	<b>91</b>	<b>77</b>	<b>38</b>	<b>75</b>	<b>42</b>	<b>74</b>	<b>46</b>	<b>70</b>	<b>48</b>	<b>68</b>	<b>50</b>
Baterías	-	9	23	11	20	12	19	12	19	14	19	14
Fusión	-	-	-	51	5	46	7	42	11	38	13	36
<b>TOTAL</b>	<b>100</b>											

Como se ve en los resultados, la capacidad instalada de producción de litio para el año 2000 deberá crecer a tasas anuales del 8.12% en el caso de que los reactores arranquen con litio proveniente de inventarios; y a razón del 12.5% en caso de que los reactores de fusión demanden litio para el arranque.

Evidentemente el mercado del litio es altamente promisorio, por lo que es conveniente iniciar exploraciones y proyectos de extracción de este metal, como se propone posteriormente.

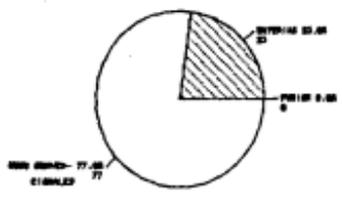
USOS DEL LITIO  
1980



USOS DEL LITIO  
1990

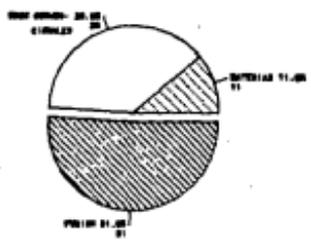


USOS DEL LITIO  
1995



ISS INVESTIMEN

USOS DEL LITIO  
1995



ISS INVESTIMEN

USOS DEL LITIO

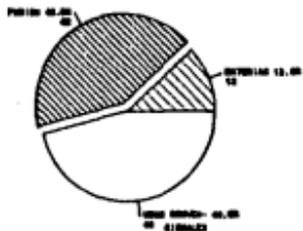
2005



CON TRACTACIÓN

USOS DEL LITIO

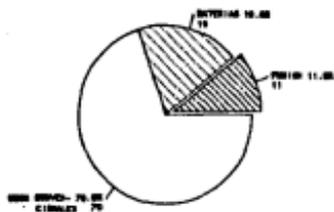
2005



SIN TRACTACIÓN

USOS DEL LITIO

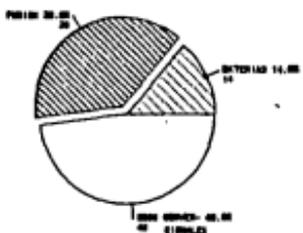
2015



CON TRACTACIÓN

USOS DEL LITIO

2015



SIN TRACTACIÓN

# PROYECCION DEL CONSUMO MUNDIAL DE LITIO (tons. de litio contenido)

CONVENCIO-  
NALES



BATERIAS



FUSION CON  
INVENTARIO



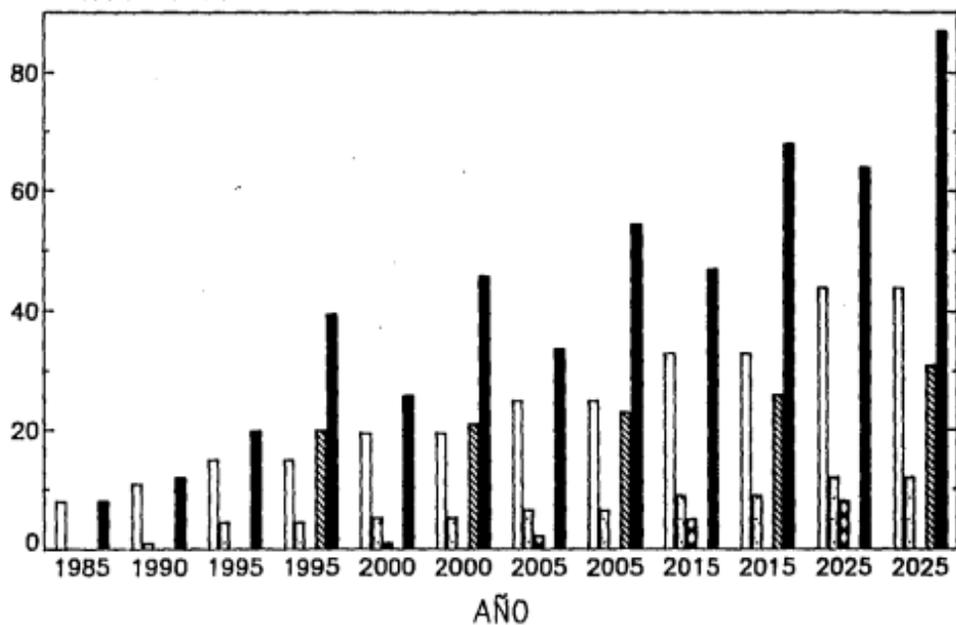
FUSION SIN  
INVENTARIO



TOTAL



tons. X 1000



**REFERENCIAS**

- (1) Mining Annual Review 1985  
Pub. by Mining Journal, London, June 1985
- (2) Mineral Commodity Summaries 1976-1985  
Bureau of Mines  
U.S. Dept. of the Interior
- (3) Anuario Estadístico del Comercio Exterior de los  
Estados Unidos Mexicanos (1980-1984)  
S.P.P. Dir. Gral. de Estadística
- (4) Mineral Facts and Problems  
Bureau of Mines Bulletin 680  
U.S. Dept. of the Interior 1983
- (5) Fusión Termonuclear  
IAEA Report, Viena 1980

## CAPITULO VI

### OBTENCION DE LITIO EN MEXICO

#### VI.1. CUANTIFICACION DE RECURSOS

En el país existen varias fuentes de litio registradas por la Comisión de Estudios del Territorio Nacional. Estas fuentes están contempladas en 2 grandes grupos: Minerales y Salmueras. Estas últimas presentan gran interés ya que su disponibilidad es inmediata y, como en el caso objeto de éste trabajo, generalmente están o pueden asociarse a otros procesos o productos, haciéndolos más atractivos al aumentar su rentabilidad.

Una salmuera particularmente atractiva desde el punto de vista del contenido de litio, la constituye la formada por el agua de desecho de la geotermoeléctrica de Cerro Prieto, B.C. En esta salmuera geotérmica se encuentra disuelto LiCl en una proporción de <sup>(1)</sup>.011% en peso. Considerando una producción de salmuera anual de  $31.536 \times 10^6 \text{ m}^3$  para una generación de 150 MW, con densidad de 1.016 se obtendría 3524.46 toneladas de LiCl.

La operación global del complejo rinde:

<u>UNIDAD</u>	<u>POTENCIAL (MW)</u>	<u>LiCl TON.AÑO<sup>-1</sup></u>
CP I	150	3,524.46
CP II	220	5,169.20
CP III	220	5,169.20
<b>TOTAL</b>	<b>590</b>	<b>13,862.86</b>

lo que equivale a 2,310 tons. de Li metálico o a unas 12,215 tons. de  $\text{Li}_2\text{CO}_3$ . Aún si se supone una eficiencia global del 60%, se dispone de unas 7250 tons. anuales de  $\text{Li}_2\text{CO}_3$  que a un precio (1986) de 3.4 dls.  $\text{kg}^{-1}$  representan  $25 \times 10^6$  dls. anuales.

## VI.2. METODOS DE OBTENCION

La obtención del LiCl disuelto en la salmuera puede llevarse a efecto de diversas maneras. Entre la gran cantidad de procesos posibles,<sup>(2)</sup> se evaluaron los siguientes por contar con características como: disponibilidad, economía, rendimiento, versatilidad o cualquier combinación de estas:

- Extracción con solventes
- Intercambio iónico
- Electrodiálisis
- Osmosis inversa
- Extracción con aluminatos
- Precipitación alcalina

**Extracción con solventes, Intercambio iónico.**- En estos procesos se aprovecha el hecho de que los metales alcalinos forman complejos quelados del tipo:  $\beta$ -Dicetonas, Nitrofenoles, 1-Nitro-2-naftol, etc. El enlace de tales complejos es esencialmente electrostático, al igual que lo que ocurre en las resinas de intercambio iónico. De acuerdo al orden de preferencia la formación de complejos será  $\text{Cs}^+ \text{Rb}^+ \text{K}^+ \text{Na}^+ \text{Li}^+$ . Esta es la razón por la que la aplicación de estos procesos se recomienda siempre y cuando la salmuera tenga un bajo nivel de otros metales alcalinos o alcalinotérreos

compitiendo con el que desea extraerse. Por otro lado, dado que el enlace en este tipo de complejos tiene un grado mínimo de covalencia, son poco solubles en solventes no polares, por lo que se hace necesario utilizar elevadas relaciones solvente-salmuera que hacen caros a los procesos.

**Extracción con Aluminatos.**- Este proceso se basa en la precipitación selectiva de litio en forma de  $\text{LiH}(\text{AlO}_2)_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ . El proceso consiste en alcalinizar la salmuera con  $\text{NH}_3$  o  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  y añadir  $\text{AlCl}_3$  precipitando el aluminato de litio junto con algunos otros aluminatos alcalinos y alcalinoterreros. Posteriormente se lixivia el  $\text{LiH}(\text{AlO}_2)_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  con  $\text{H}_2\text{SO}_4$  y esta solución ácida vuelve a alcalinizarse con  $\text{NH}_3$  para reprecipitar aluminato de litio, el licor sobrante se trata con  $\text{CaCl}_2$  para regenerar el  $\text{AlCl}_3$ . El proceso es accesible, pero requiere de mucho equipo para mover grandes volúmenes de salmueras, además la regeneración del  $\text{AlCl}_3$  es cara y compleja, por lo que no parece ser un proceso adecuado para la salmuera de Cerro Prieto.

**Electrodiálisis, Osmosis Inversa.**- Estos procesos se basan en las diferentes tasas de transporte catiónico a través de membranas selectivas. La selectividad sigue el orden  $\text{K}^+ \succ \text{Na}^+ \succ \text{Li}^+$  lo cual requiere mucha separación de fracciones empobrecidas hasta lograr concentraciones adecuadas de  $\text{Li}^+$  con bajas presencias del resto de los cationes. Generalmente se trabaja con celdas formadas por electrodos de grafito alternados con películas de PVC consumiendo alrededor de .2 kW por  $\text{m}^3$  de salmuera. Si se tiene que reciclar varias veces un gran volumen de salmuera, el consumo energético y los costos de capital desfavorecen estos procesos.

**Precipitación Alcalina.**- Cuando se tiene una solución su-

ficientemente concentrada en litio, la adición de un carbonato precipita al litio en forma de  $\text{Li}_2\text{CO}_3$ . El principal problema para lograr la reacción:



es la presencia de iones  $\text{Ca}^{+2}$  y  $\text{Mg}^{+2}$ , ya que éstos precipitan antes contaminando el precipitado de litio. El proceso es eficiente cuando la concentración de calcio es menor al 1.5%. Para lograr este efecto se aprovecha que los halogenuros de litio son altamente solubles, por lo que al concentrar la salmuera, precipitan los halogenuros de los demás elementos en una serie de evaporaciones sucesivas, obteniendo en cada etapa sales aprovechables y, finalmente, una solución con bajos contenidos de calcio. El calcio se precipita por adición de  $\text{NaOH}$  obteniendo una salmuera rica en litio el cual se precipita por adición de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ . Esta evaporación puede efectuarse usando evaporadores solares, aprovechando el alto "índice de sol" en Cerro Prieto.

### VI.3. SELECCION Y PROPUESTA

Dadas las condiciones expresadas en el punto anterior, y tomando en cuenta otros factores como: flexibilidad e independencia tecnológica, aprovechamiento de recursos e infraestructura disponible, el método de evaporaciones sucesivas y precipitación alcalina es el más atractivo para el caso de "Cerro Prieto". Por lo que se procederá a establecer las bases del proceso para consolidar un anteproyecto.

La composición <sup>(1)</sup>típica de la salmuera de Cerro -

Prieto se muestra en la Tabla VI-1. Esta salmuera contiene tantas sales disueltas que prácticamente está sobresaturada. Al ir evaporando (concentrando) la solución, comenzarán a precipitar el NaCl, KCl, MgCl<sub>2</sub> y CaCl<sub>2</sub>. Posteriormente se añade NaOH hasta lograr un pH de 11 con lo cual precipitan el calcio y el magnesio en forma de hidróxidos. Evaporaciones posteriores eliminan el sodio y potasio remanentes -- dejando una solución enriquecida en litio, la cual es tratada con Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> precipitando Li<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> de pureza comercial. Después de un filtrado, el Li<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> es lavado en filtros-banda, secado y empacado.

**TABLA VI-1**  
**ANALISIS TIPICO DE SALMUERAS**  
**CERRO PRIETO**

<u>Ion</u>	<u>% EN PESO</u>	<u>P.P.M.</u>
Ca <sup>2+</sup>	9.85	98,500
Mg <sup>2+</sup>	.36	3,600
Na <sup>+</sup>	.14	1,400
K <sup>+</sup>	1.51	15,100
Li <sup>+</sup>	.0018	18
Cl <sup>-</sup>	20.74	207,400
insolubles	<u>.3</u>	<u>3,000</u>
	<b>32.9018</b>	<b>329,018</b>

Para efectos económicos, se consideran valores recuperables al K en forma de KCl, el Ca como CaCl<sub>2</sub>, el Mg como MgCl<sub>2</sub> y por supuesto Li como Li<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>. Para efectuar un estimado, los costos provenientes de reactivos se calculan usando las relaciones estequiométricas siguientes:

3.29 g NaOH por g  $Mg^{2+}$

2.0 g NaOH por g  $Ca^{+2}$

7.64 g  $Na_2CO_3$  por g  $Li^+$

aprovechando que por sus productos de solubilidad, primero precipita el Mg y luego el Ca. Es decir:

$$\frac{Kps \text{ Mg(OH)}_2}{Kps \text{ Ca(OH)}_2} = 2.73 \times 10^{-6}$$

lo que significa que hasta que la salmuera contenga solo  $3.8 \times 10^{-3}$  de  $Mg^{2+}$  empezará a precipitar el Ca.

Por otra parte, el producto de interés, que es el litio, sufre algunas pérdidas por derrames o filtraciones y por solución atrapada en las cavidades y retículos de las sales precipitadas. Si se desprecian las pérdidas por derrame y filtración, la pérdida puede calcularse<sup>(3)</sup> a partir de:

C = concentración de litio al final de un periodo

Ci = concentración inicial de litio

Vi = volumen inicial de salmuera

E = volumen perdido de salmuera por evaporación

A = volumen atrapado en el precipitado

$K = \frac{A}{E}$  = constante que se fija para cada caso. Como base de cálculo se utiliza la constante del "caracol" de Sosa Texcoco  $K = .1$

Siendo entonces:

$$C = \frac{CiVi}{Vi-E}$$

combinando variables:

$$\frac{C}{C_i} - \frac{CA}{C_i V_i} \frac{1}{K} = 1$$

por lo que la fracción perdida de litio queda como:

$$\frac{CA}{C_i V_i} = K \left( \frac{C}{C_i} - 1 \right)$$

Para minimizar las pérdidas de litio, se debe usar una serie de evaporadores para mantener baja la relación de concentración de Li en cada evaporador. El rendimiento máximo se lograría con un gran número de evaporadores, pero desde el punto de vista práctico se deberá optimizar éste usando las ecuaciones generales<sup>(3)</sup> para evaporadores solares que se muestran a continuación:

- I = tasa de ingreso de salmuera con concentración inicial de litio  $C_o$ .
- S = tasa de salida de salmuera.
- E = tasa de evaporación (en Mexicali  $E = 130 \text{ cm año}^{-1}$ )
- P = Tasa de pérdida por filtraciones y derrames
- A = salmuera atrapada
- C = concentración de litio
- V = volumen de salmuera
- Q = cantidad de litio = CV

el cambio en volumen en cada fosa o evaporador solar será:

$$dV = dI - dS - dE - dA - dP$$

el cambio en cantidad de litio en cada fosa será:

$$dQ = C_o dI - CdS - CdP - d(CA)$$

$$dQ = C_o dI - AdC - C(dS + dP + dA)$$

como  $K = \frac{A}{E}$ ,  $A = KE$  y  $dA = KdE$

quedando  $dQ = C_0 dI - KE dC - C (dS + dP + KdE)$

Con las relaciones  $dV$  y  $dQ$  se puede obtener el rendimiento total de litio, las pérdidas, las áreas óptimas y profundidades para cada fosa. La fosa final, usada para acumular la solución rica en litio es el caso de partida, - ya que su concentración se mantendrá constante a un valor - predeterminado siendo su ingreso:

$$I = \frac{CE}{C-C_0}$$

Una solución adecuada para resolver esta serie de ecuaciones requiere de un programa de computadora para optimización por iteración. Para éste trabajo se consideró  $C = 5,000$  ppm y se simplificaron al máximo los cálculos par- tiendo de varios supuestos sencillos obteniendo una serie - de 9 fosas con sus características mostradas en la tabla -- VI-2.

Lo que permite calcular el volumen diario de - bombeo de salmuera 300 días al año, con las siguientes recu- peraciones:

$Li_2CO_3$	$KCl$	$CaCl_2$
61%	.08%	.16%

Esto rinde un estimado de venta anual de:

	<u>CANTIDAD (TONS.)</u>	<u>PRECIO DLS.TON<sup>-1</sup></u>	<u>VALOR (DLSX10<sup>6</sup>)</u>
Li <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	7,312	3,400	24.86
KCl	100,000	105	10.5
CaCl <sub>2</sub>	200,000	91	18.2
<b>T O T A L</b>			<b>53.56</b>

con un consumo de reactivos:

	<u>CANTIDAD (TONS.)</u>	<u>PRECIO DLS.TON<sup>-1</sup></u>	<u>VALOR (DLSX10<sup>6</sup>)</u>
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	17,400	90	1.57
NaOH	103,000	175	18.025
<b>T O T A L</b>			<b>19.595</b>

La bajísima recuperación de otros valores se debe a que la planta se diseña para recuperar litio, haciendo que las otras sales coprecipiten. Si se pretendiera rescatar otros valores, aumentaría extraordinariamente la inversión en equipo (filtros, cristalizadores, separadores, etc.) y el consumo de reactivos, lo que seguramente abatiría la rentabilidad del proyecto.

En México se dispone de los reactivos necesarios, incluso a precios mucho menores que los internacionales; por lo que éste aspecto no representa fuga de divisas. Por otra parte, prácticamente todo el costo en reactivos se refiere a NaOH, así que el proyecto puede redondearse si se considera un circuito recuperador de sosa; para efectos de evaluación del proyecto, no se toma en cuenta ésta posibilidad.

TABLA VI-2  
EVAPORADORES C.P.

<u>FOSA</u>	<u>AREA m<sup>2</sup></u>	<u>PROF. m.</u>	<u>VOLUMEN m<sup>3</sup></u>	<u>CONC. Li ppm</u>	<u>FASE SOLIDA</u>
1	503,970	.25	126,000	18	- - - - -
2	344,820	.22	75,860	110	NaCl
3	59,680	.26	15,520	160	NaCl, KCl
4	57,030	.24	13,680	966	MgCl <sub>2</sub> , NaCl, KCl
5	30,500	.30	9,150	1,400	Mg(OH) <sub>2</sub>
6	27,190	.22	5,920	1,900	CaCl <sub>2</sub> , NaCl, KCl
7	11,270	.20	2,300	2,400	Ca(OH) <sub>2</sub>
8	8,620	.19	1,650	3,100	NaCl, KCl
9	8,283	.19	1,570	5,000	NaCl, KCl

REFERENCIAS

- (1) Comunicación directa de R. Angulo, Coordinador  
Div. Fuentes de Energía Centro Cerro Prieto. -  
B.C. México junio 1985.
- (2) Patentes E.E.U.U. N° 2 726 138 (1955)  
2 964 381 (1960)  
2 980 497 (1961)  
3 101 246 (1963)  
3 342 548 (1967)  
3 306 712 (1967)  
3 479 147 (1969)  
3 537 813 (1970)
- (3) W. Barrett, B. O'Neill; Recovery of Lithium from  
Saline Brines Using Solar Evaporation  
Foote Mineral Company

## CAPITULO VII

### ANTEPROYECTO

#### VII.1. OPERACION DE LA PLANTA DE $\text{Li}_2\text{CO}_3$

De acuerdo a la selección y parametrización de una planta productora de  $\text{Li}_2\text{CO}_3$  a partir de las salmueras - de Cerro Prieto, efectuadas en el capítulo VI; la planta -- consistiría simplemente de 9 fosas que aprovechando la energía solar, irían concentrando hasta saturación y precipitación las sales que componen la salmuera; retirando dichas - sales por dragado con cargadores frontales, pues es muy poca profundidad la de dichas fosas. Cada fosa consta de un bordo circular de cemento, siendo la base de tierra apisonada para aprovechar la baja permeabilidad del terreno. En todos los casos, las fosas tendrán una rampa de cemento para entrada y salida de los cargadores. El licor sobrenadante es bombeado con bombas de succión de 15 H.P. de una fosa a otra. Las fosas 5 y 7 contarán además con un pequeño sistema de alimentación de  $\text{NaOH}$  consistente en una lanza o cañón de soplo de escamas de  $\text{NaOH}$  asistido por un pequeño compresor de  $5 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1}$  para ambas fosas, logrando así un efecto extra de agitación y mezclado.

Los precipitados conteniendo  $\text{NaCl}$ ,  $\text{KCl}$ ,  $\text{MgCl}_2$  y  $\text{CaCl}_2$  se envían a un tanque espesador donde se alimenta el licor sobrante de la precipitación del  $\text{Li}_2\text{CO}_3$  para lixiviar selectivamente al  $\text{NaCl}$  y  $\text{KCl}$  quedando al fondo un lodo de  $\text{MgCl}_2$  y  $\text{CaCl}_2$  que se apila en un patio de secado donde el  $\text{MgCl}_2$  queda separado del  $\text{CaCl}_2$  en forma de una costra en el fondo, dejando al  $\text{CaCl}_2$  listo para embarque. El licor de lixiviación se retira por canales de derrame y se apila en

otro patio de secado donde se separa el KCl al igual que en el caso anterior, enviándolo a unos silos de almacenamiento.

Por otra parte, el licor enriquecido en Li proveniente de la fosa N° 9 se bombea a un tanque espesador -- donde se alimenta  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  precipitando el  $\text{Li}_2\text{CO}_3$ , este es extraído y colocado en una banda de malla donde es lavado con aspersores, secado con aire y almacenado en tolvas de empaque de cuñetes de 150 kg. El líquido sobrenadante del tanque espesador se lleva por canaletas de fibra de vidrio al tanque espesador de otras sales. Las sales sobrantes se acumulan en una presa de jalés destinada para tal efecto, ya que su valor comercial es muy bajo como para justificar su separación, lavado, secado y almacenaje. La figura --- VII-1 bosqueja el diagrama de flujo del sistema descrito.

## VII.2. COSTEO Y EVALUACION FINANCIERA

La estimación de costos y presupuestos de inversión se llevó a cabo recurriendo a los costos típicos publicados por el "Capital and Operating Cost Estimating System Handbook" ed. 1985, "Mercado Industrial Mexicano" ed. 1985 y fuentes propias; generando el siguiente desglose de inversión:

**PLANTA DE  $\text{Li}_2\text{CO}_3$**   
**INVERSION EN DLSX10<sup>6</sup>**

Ingeniería	.7315
Equipo	23.6861
Construcción del sistema de evaporadores	5.9954
Construcción y montaje de la planta de proceso	13.2240
Gastos de administración durante la construcción	1.2565
<b>T O T A L</b>	<b>44.8935</b>

Para efectuar la evaluación financiera del proyecto, se adoptaron las políticas tipo, comunmente seguidas por la industria química en proyectos de similar envergadura, utilizando estas políticas como base para calcular el tiempo de recuperación de la inversión, el retorno o rentabilidad sobre la inversión, el valor neto presente y la tasa interna de recuperación, a través de un análisis del flujo de efectivo ejecutado con un pequeño modelo de cálculo - cuyos resultados se muestran a continuación:

**PLANTA DE  $\text{Li}_2\text{CO}_3$**

**BASE DE DATOS**

**PRESUPUESTO DE INVERSION**

CONCEPTO	AÑO RELATIVO (DLSX10 <sup>6</sup> )		
	-2	-1	0
Ingeniería	.3889	.3426	
Equipo	9.9961	13.69	
Construcción del sistema de evaporadores	5.9954		
Construcción y montaje de la planta de proceso	1.1426	9.2481	2.8333
Gastos de administración durante la construcción	.5778	.3454	.3333
<b>T O T A L</b>	<b>18.1008</b>	<b>23.6261</b>	<b>3.1666</b>

**Arranque.**- Al 100% el 2° semestre del año relativo "0" -- (1989)

**Préstamo.**- Apalancamiento 2/1; interés 12% anual capitalizable semestralmente; 1 año de gracia; 5 años - de amortización.

**Gastos Fijos.**- Sueldos: 18 confianza y 68 obreros; 667 -- dls/mes confianza, 112 dls/mes obreros; 50% extra en prestaciones.

Mantenimiento Anual: .45 X 10<sup>6</sup> dls.

**Gastos Variables.**- Consumo: 1.57 X 10<sup>6</sup> dls. en  $\text{Na}_2\text{CO}_3$   
 18.025 X 10<sup>6</sup> dls. en NaOH  
 .18 X 10<sup>6</sup> dls. en energía eléctrica (8.96 MW-h)  
 .04 X 10<sup>6</sup> dls. en combustibles y lubricantes

**Gastos Administrativos.**- 5% de las ventas

**Capital de Trabajo.**- 2 meses de costos

Depreciación.- Lineal a 10 años

Vida del Proyecto.- 10 años para efectos financieros y fiscales.

Tasa de Cambio.- 450 ps/dl.

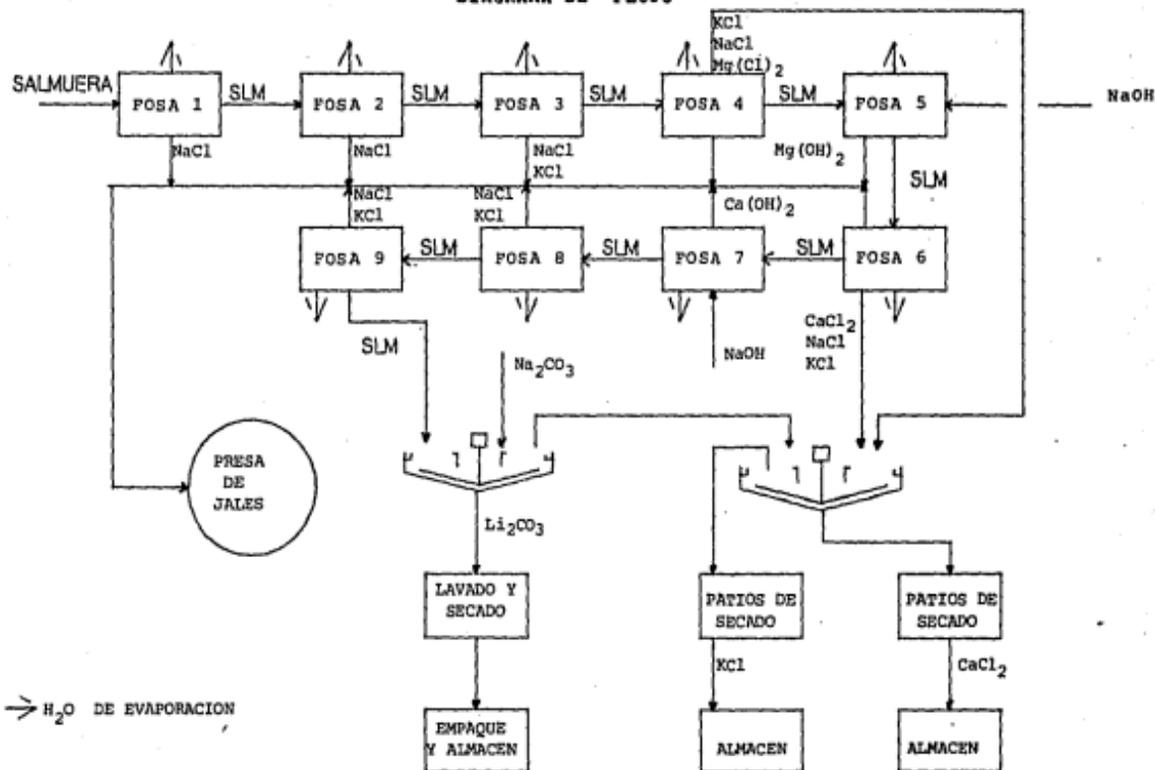
### PLANTA DE Li<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>

#### RESULTADOS

Tiempo de Recuperación de la Inversión	2.3 años a partir del año relativo "0"
Retorno sobre la Inversión con financiamiento	41.338 %
Retorno sobre la Inversión sin financiamiento	44.119 %
Valor Neto Presente con financiamiento	114.267 X 10 <sup>6</sup> dls.
Tasa Interna de Retorno con financiamiento	32.783 %
Tasa Interna de Retorno sin financiamiento	26.848 %

Como es patente por los resultados obtenidos, el proyecto no sólo resulta rentable, sino que representa una magnífica inversión de rápido retorno y elevado rendimiento; aún cuando se contratara en tasas flotantes, pues la TIR con financiamiento concede más de 20 puntos de ventaja sobre la tasa utilizada del 12% para la evaluación, siendo ésta última superior en 2 puntos a la tasa LIBOR.

FIGURA VII-1  
 PLANTA DE  $\text{Li}_2\text{CO}_3$   
 DIAGRAMA DE FLUJO





FECHA : 02/07/86  
 MODELO : NEPESTFI

HORA : 12:14

DATAFILE : REACTOR

SERVICIO : EVALUACION DE PROYECTOS SA de CV  
 ESTADO DE RESULTADOS

PAGE 1

PROYECTO : REACTOR DE FUSION

-Con financiamiento-

PERIODO ANO RELATIVO	1987 -2	1988 -1	1989 0	1990 1	1991 2	1992 3	1993 4	1994 5	1995 6	1996 7	1997 8	1998 9
TOTAL DE VENTAS			26,780	53,561	53,561	53,561	53,561	53,561	53,561	53,561	53,561	53,561
TOTAL DE COSTOS			19,789	20,617	20,617	20,617	20,617	20,617	20,617	20,617	20,617	20,617
UTILIDAD BRUTA			16,071	32,944	32,944	32,944	32,944	32,944	32,944	32,944	32,944	32,944
TOTAL DE GASTOS DE ADMN Y DEPRECIACION DE PLANTA Y EQ AMORTIZACION DE GASTOS FINA			1,339 4,409 241	2,678 4,409 482	2,678 4,489 482	2,678 4,489 482	2,678 4,489 482	2,678 4,489 241	2,678 4,489 4,489	2,678 4,489 4,489	2,678 4,489 4,489	2,678 4,489 4,489
TOTAL DE GASTOS			6,069	7,649	7,649	7,649	7,649	7,408	7,167	7,167	7,167	7,167
UTILIDAD EN OPERACION GASTOS FINANCIEROS			10,002 1,347	25,295 2,200	25,295 1,761	25,295 1,212	25,295 673	25,295 135	25,777	25,777	25,777	25,777
UTILIDAD ANTES I S W			8,655	23,005	23,544	24,083	24,621	25,491	25,777	25,777	25,777	25,777
UTILIDAD GRAVABLE I S W P T U			8,655 3,336 865	23,005 9,661 2,301	23,544 9,008 2,354	24,083 8,141 2,408	24,621 6,461 2,462	25,491 13,065 2,540	25,777 13,826 2,578	25,777 13,826 2,578	25,777 13,826 2,578	25,777 13,826 2,578
UTILIDAD NETA			4,154	11,043	11,301	11,560	11,818	12,152	12,373	12,373	12,373	12,373

SERVICIOS INDUSTRIALES PEXOLES SA de CV  
 EVALUACION DE PROYECTOS  
 FLUJO DE EFECTIVO

PERIODO AÑO RELATIVO	-Con financiamiento-											
	1987 -2	1988 -1	1989 0	1990 1	1991 2	1992 3	1993 4	1994 5	1995 6	1996 7	1997 8	1998 9
UTILIDAD NETA			4,154	11,043	11,301	11,560	11,818	12,190	12,373	12,373	12,373	12,373
LIQUID CAPITAL DE TRABAJO												
RESTANCO INVERSION ACTIVO F		19,200	3,167									
DEPRECIACION DE PLANTA Y EQ			4,489	4,489	4,489	4,489	4,489	4,489	4,489	4,489	4,489	4,489
AMORTIZACION DE GASTO FINA			241	462	482	462	482	241				
TOTAL DE ENTRADAS DE EFECTI		19,200	12,052	16,014	16,272	16,531	16,789	16,923	16,862	16,862	16,862	20,110
INVERSION EN ACTIVO FIJO	18,101	23,626	3,167									
GASTOS FINANCIEROS CAPITALI		1,157	1,252									
INVERSION EN CAPITAL DE LRA			1,661	1,461	4,489	4,489	4,489	2,245				
PAGOS DE PASIVO A LARGO PLA			2,245	4,489								
TOTAL DE SALIDAS DE EFECTIV	18,101	24,703	8,314	6,141	4,489	4,489	4,489	2,245				
FLUJO DE EFECTIVO	-18,101	-5,503	2,737	9,873	11,783	12,041	12,308	14,678	16,862	16,862	16,862	20,110

FECHA : 02/07/86 HORA : 12:15  
 MODELO : MEPESTFI DATAFILE : DREACTOR

SERVICIOS INDUSTRIALES PEXOLEES SA de CV  
 EVALUACION DE PROYECTOS  
 PARAMETROS DE EVALUACION

PROYECTO : REACTOR DE FUSION

VALOR NETO PRESENTE CON FINANCIAMIENTO

1  
2  
3  
4  
5  
6  
7  
8  
9  
10  
11  
12

PERIODO	ANO RELATIVO	VALOR NETO PRESENTE
1987	-10	-21,901.97
1988	-11	-27,955.16
1989	0	-24,217.87
1990	1	-15,242.40
1991	2	-5,501.54
1992	3	3,542.37
1993	4	11,943.45
1994	5	21,057.36
1995	6	30,575.61
1996	7	40,228.56
1997	8	47,094.88
1998	9	55,646.65

FECHA : 02/07/86 HORA : 12:15  
 MODELO : MEPESTFI DATAFILE : DREACTOR

SERVICIOS INDUSTRIALES PEXOLEES SA de CV  
 EVALUACION DE PROYECTOS  
 PARAMETROS DE EVALUACION

PROYECTO : REACTOR DE FUSION

TASA INTERNA DE RECUPERACION CON FINANCIAMIENTO

1  
2  
3  
4  
5  
6  
7  
8  
9  
10  
11  
12

PERIODO	ANO RELATIVO	VNP(I R CF)
1987	-10	-31,914.273
1988	-11	-39,221.207
1989	0	-35,483.915
1990	1	-20,048.488
1991	2	-21,365.635
1992	3	-16,222.266
1993	4	-12,265.582
1994	5	-8,789.676
1995	6	-5,633.215
1996	7	-3,316.311
1997	8	-1,571.436
1998	9	0.003

TIR CF %  
32.783

## CONCLUSIONES

- A) El crecimiento de la población mundial aunado a la necesidad de mejoras en el nivel de vida, han generado una demanda energética que no sólo no podrá ser satisfecha con los métodos convencionales, que ejercen una gran presión sobre los recursos naturales y vulneran peligrosamente la ecología, si no que además representan un deplorable desperdicio.

La mejor alternativa energética está constituida por las fuentes nucleares, de las cuales la fusión termonuclear controlada representa la perspectiva de una fuente de energía limpia, barata y prácticamente inagotable.

- B) La primera generación de reactores de fusión está basada en la reacción D - T, donde el T funge como catalizador para la fusión D - Li. Los cálculos efectuados indican que se necesitarán unos 190 kg de Li por cada MW<sub>t</sub> instalado; lo que para los reactores de fusión actualmente en construcción, representa una demanda inmediata de 13,000 tons. de Li.

- C) Los usos convencionales y energéticos del litio exigen que su producción crezca a razón del 10 % anual para satisfacer la demanda proyectada. México importa alrededor de 100 tons. de Li al año, con la correspondiente fuga de divisas del orden de 1.3 millones de dls., a pesar de contar con recursos naturales del metal; y su demanda nacio

nal crece más del 6% anual. Por lo tanto la explotación de litio es necesaria y altamente -- atractiva.

**D)**

De los recursos nacionales de litio, la salmuera geotérmica de Cerro Prieto B.C., es una fuente - disponible inmediata. La caracterización de la salmuera y la evaluación de diversos métodos de extracción, condujo a la selección del método de evaporaciones sucesivas en celdas solares y precipitación alcalina para obtener  $\text{Li}_2\text{CO}_3$ . La parametrización del método propuesto desembocó en un anteproyecto para la producción de 7,312 tons. producción anuales de  $\text{Li}_2\text{CO}_3$  y subproductos con valor total de 54 millones de dls. La evaluación financiera del proyecto demuestra que es una inversión rentable, de rápido retorno y alto rendimiento.

## BIBLIOGRAFIA

### FUSION

- 1) Fusión; ed. by E. Teller  
Academic Press, 1981
- 2) T. Kammash; Fusion Reactor Physics  
Ann Arbor Science, 1975
- 3) M. Hagler, M. Kristiansen; An Introduction to  
Controlled Thermonuclear Fusion  
Lexington Books, 1979
- 4) S. Glasstone, R. Lovberg; Controlled Thermonuclear  
Reactions. Van. Nostrand, 1960

### NUCLEONICA

- 1) Handbuch der Physik; herausgegeben von S. Flügge  
Springer-Verlag, 1967
- 2) G. Choppin, J. Rydberg; Nuclear Chemistry  
Pergamon Press, 1980
- 3) G. Friedlander, J. Kennedy, E. Macias, J. Miller;  
Nuclear and Radiochemistry, 3d. ed.  
John Wiley and Sons, 1981
- 4) T. Connolly; Fundamentos de Ingeniería Nuclear,  
1a. ed. Limusa Wiley, 1983.

- 5) W. Burcham; Física Nuclear.  
Reverté, 1974

#### QUIMICA Y METALOGENESIS DEL LITIO

- 1) F. Cotton, G. Wilkinson; Química Inorgánica Avanzada 2a. ed., 1969  
Limusa-Wiley, S.A.
- 2) D. Steele; The Chemistry of the Metallic Elements  
1a. ed., 1966  
Pergamon Press
- 3) C. Bell, K. Lott; Un Esquema Moderno de la Química Inorgánica, 1a. ed., 1968  
Alhambra
- 4) K. Rankama, T. Sahama; Geoquímica, 1a. ed., 1954  
Aguilar
- 5) B. Mason; Principles of Geochemistry, 3a. ed, 1966  
John Wiley and Sons, Inc.
- 6) E. Dana, W. Ford; Tratado de Mineralogía, 1a. ed.,  
1969  
C.E.C.S.A.