

VE 8400007

SE-RN-0148

AGUA PESADA  
UNA ALTERNATIVA DE PRODUCCION PARA VENEZUELA

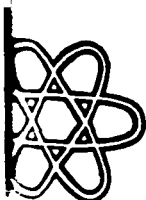
Coordinación de Reactores Nucleares

MINISTERIO DE ENERGIA Y MINAS  
CONSEJO NACIONAL  
PARA EL DESARROLLO DE LA  
INDUSTRIA NUCLEAR

SE - RN -- 0148

AGUA PESADA

UNA ALTERNATIVA DE PRODUCCION PARA VENEZUELA



1974

Coordinación de Reactores Nucleares

## INDICE GENERAL

<u>CAPITULO</u>	<u>PAGINA</u>
INTRODUCCION	1
GENERALIDADES	5
USOS	7
FUENTES DE ABASTECIMIENTO	8
DEMANDA	12
PRODUCCION MUNDIAL ACTUAL	17
METODOS DE PRODUCCION DE D <sub>2</sub> O	21
1.1. INTERCAMBIO ISOTOPICO Acido Sulfhídrico /Agua	23
1.2. INTERCAMBIO ISOTOPICO Amoníaco /Hidrógeno.	25
1.3. DESTILACION DE AGUA	30
1.4. DESTILACION DE HIDROGENO	31
1.5. DESTILACION DE AMONIACO	33
1.6. ELECTROLISIS	34
1.7. METODOS POTENCIALES EN DESARROLLO	35
1.7.1. METODOS A PARTIR DEL GAS NATURAL	35
1.7.2. EXCITACION OPTICA	35
OBSERVACIONES	38
BIBLIOGRAFIA	42

## INDICE DE TABLAS

<u>TABLA</u>		<u>PAGINA</u>
1-B	PROPIEDADES DEL AGUA PESADA	6
1	VARIEDAD DE REACTORES QUE UTILIZAN AGUA PESADA	7
1-A	CONCENTRACION DE DEUTERIO EN EL PETROLEO Y EL GAS NATURAL PARA CANADA, VENEZUELA Y ARGENTINA.	9
2	ESTRATEGIAS DE UTILIZACION DE REACTORES.	15
3	REQUERIMIENTOS NETOS ACUMULADOS DE AGUA PESADA.	16
4.	PRODUCCION MUNDIAL DE AGUA PESADA. (ACTUAL)	19
5.	FIRMAS COMERCIALES ESPECIALIZADAS EN DISEÑO, MONTAJE Y/O SUMINISTRO PARA PLANTAS PRODUCTORAS DE AGUA PESADA.	20
6.	CUADRO COMPARATIVO DE LOS DIVERSOS METODOS DE OBTENCION DE AGUA PESADA.	36

INDICE DE FIGURAS

<u>FIGURA</u>		<u>PAGINA</u>
A-1	CICLO DE UN REACTOR	4
1	REQUERIMIENTOS ACUMULADOS DE AGUA PESADA. PROYECCION BAJA.	13
2	REQUERIMIENTOS ACUMULADOS DE AGUA PESADA. PROYECCION ALTA.	14
B-1	ESQUEMA DEL PROCESO BITERMICO $H_2S/H_2O$	24
3	ESQUEMA GENERAL DEL PROCESO MONOTERMICO $NH_3/H_2$	27
4	ESQUEMA GENERAL DEL PROCESO BITERMICO $NH_3/H_2$	28
5	ACOPLAMIENTO DE UNA PLANTA DE $D_2O$ A- UNA PLANTA DE SINTESIS DE $NH_3$	29
6	PRINCIPALES PASOS DEL REFORMING Y ACOPLAMIENTO CON UNA PLANTA DE DESTILACION DE $H_2$ .	32

## I N T R O D U C C I O N

Las técnicas nucleares empleadas para la generación de energía eléctrica, se presentan como una alternativa viable, como complemento térmico de las fuentes tradicionales generadoras de dicha energía.

Esta alternativa ha tomado gran auge a nivel mundial debido a diversos factores, entre los que cabe mencionar :

1. El encarecimiento de las fuentes térmicas tradicionales de energía, hecho que sitúa a la energía nuclear en igualdad de condiciones, en cuanto a costos se refiere.
2. La utilización del petróleo (una de las fuentes más utilizadas para suministro de electricidad) en terrenos, donde puede aportar mayores beneficios (petroquímica, etc.) o donde no ha podido ser sustituido hasta el momento (gasolina y gasoil para el transporte, por ejemplo).
3. La problemática político-económica que se ha originado a nivel mundial, con la crisis que han ocasionado, básicamente, los altos precios del petróleo.

Todo esto hace preveer una cada vez mayor utilización de la nucleoelectricidad, sobre todo en países de escasos recursos energéticos.

Por supuesto que Venezuela, aunque posee grandes recursos petroleros, no se escape de esta situación, ya que, si bien ambos combustibles (uranio o hidrocarburos) son recursos naturales no renovables, pueden ser empleados más favorablemente, si cada uno se utiliza donde presente mayores beneficios : Por ejemplo: el uranio en la industria nucleoelectrica, y los hidrocarburos en la Petroquímica.

Por otro lado, y como bien se sabe, actualmente la economía Venezolana - es totalmente dependiente del petróleo, y por tanto, la búsqueda de nuevas alternativas que sirvan de soporte a la misma, debe incrementarse.

No se considera en este informe que la producción de agua pesada constituya la base de una de estas alternativas, sino que probablemente la transformación de alguno de nuestros productos en ella, produzca con una baja inversión grandes ganancias, o por lo menos que mejoren las obtenidas por la venta del producto sin elaborar.

Esta hipótesis de producción está favorecida por tres figuras :

1. Disponibilidad de la materia prima principal de varios de los métodos de obtención, lo que suministraría a la hora de una escogencia varias opciones de estudio.
2. Los programas de producción de agua pesada son generalmente similares a los requeridos por plantas petroquímicas y refinerías, lo que procuraría herramientas de trabajo útiles para una instalación de este tipo.
3. Los requerimientos de agua pesada, a nivel mundial, van en ascenso, esperándose para el año 2000 un incremento de siete veces, con respecto a las exigencias actuales, lo que permite intuir la existencia potencial de un gran mercado de consumo.

Por último es conveniente explicar el principio básico de funcionamiento de los reactores nucleares, elemento principal empleado en la generación de electricidad por métodos nucleares. De esta forma se podrá establecer la relación agua pesada-reactor.

La figura A-1 expone en forma simplificada este principio: La fisión

del U-235 en el combustible alojado en el núcleo del reactor, produce - una gran cantidad de calor; éste es removido por medio de un refrigerante generando vapor que se transmite a un turbogenerador, con lo que se obtiene, finalmente, energía eléctrica. La misión del agua pesada (moderador) es disminuir la velocidad de los neutrones sin ocasionar una captura apreciable de ellos, lo que origina a su vez, una mayor efectividad en las reacciones de fisión.

Los reactores que utilizan uranio, pueden ser clasificados por la forma - en que éste se presenta en el combustible. Por ello se tienen básicamente dos tipos : de uranio enriquecido y de uranio natural.

Los reactores de uranio enriquecido son, a la fecha, los más comercializados (Westinghouse, General Electric, KWU) lo que hace que el conocimiento que se tiene sobre ellos es mayor que en los otros.

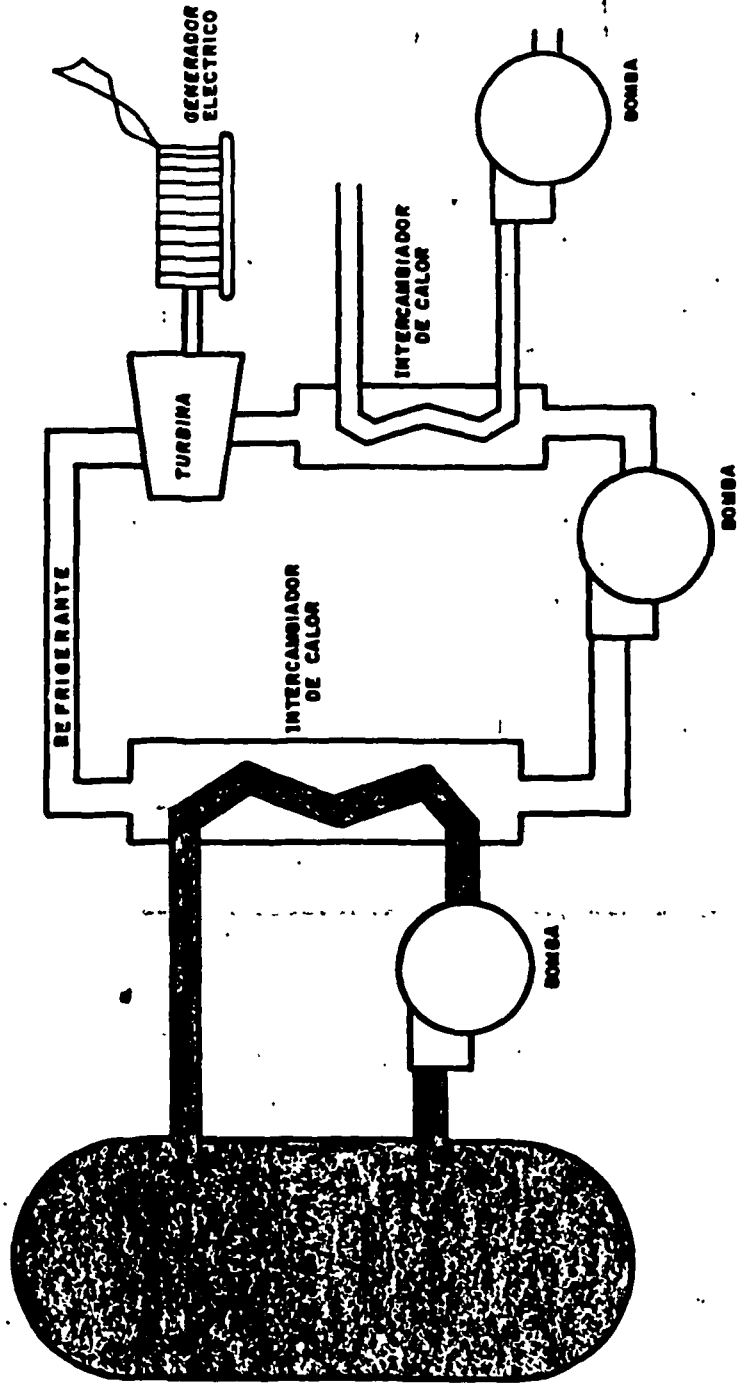
Los del segundo grupo, son reactores que presentan la ventaja del uso del uranio natural como combustible, y la aparente desventaja, del uso de - agua pesada. Y se dice aparente, porque para muchos países \* sería más accesible técnica y económicamente la compra de tecnología de enriquecimiento de deuterio, que la de enriquecimiento de uranio. \*\*

De lo expuesto, puede deducirse fácilmente, la importancia que la producción de agua pesada tiene para un país en vías de desarrollo y que busque máxima independencia tecnológica, a la hora que las necesidades del país indiquen la conveniencia de la incorporación de la energía nucleoelectrónica, al sistema de generación energético nacional.

\* Como es el caso de Venezuela, que presenta, como se verá más adelante muchas de las condiciones industriales necesarias para estos procesos.

\*\* Muy difícil de conseguir en los actuales momentos, por los acuerdos internacionales existentes sobre no proliferación y en menor cuantía por los elevados costos involucrados.





Circuito primario  
 Circuito secundario

Fig. A-1 - CICLO DE UN REACTOR

## GENERALIDADES :

Es en 1932 cuando por primera vez se evidencia la existencia de un isótopo del hidrógeno (deuterio), que en combinación con el oxígeno forma agua con moléculas más pesadas (10% aproximadamente) que las conocidas normalmente. De aquí el nombre de agua pesada. Esta característica física es su principal distinción y es la que se emplea para su separación. Su concentración en agua ordinaria es muy pequeña, aproximadamente 1 por 7000. Las propiedades del  $D_2O$  aparecen resumidas en la tabla N° 1-B.

Es en Noruega, en 1933 cuando se prepara por primera vez agua pesada pura, utilizando el método electrolítico y con fines experimentales.

En 1939 se encuentra que el agua pesada resulta ser un elemento moderador altamente eficiente en reactores nucleares.

Durante la Segunda Guerra Mundial, una planta de agua pesada ( $D_2O$ ), situada en Noruega fué bombardeada y destruída, a pesar de ello, un grupo de investigadores logra sacar la cantidad del producto existente para el momento (185 Kg.), con lo que se continúan estudios en un laboratorio que se establece en Montreal, Canadá. Puesto que la cantidad existente era pequeña para su uso en reactores nucleares, Canadá proyecta y construye una planta de obtención de  $D_2O$  usando en ella diversos procesos.

A partir de este momento el desarrollo e investigación sobre obtención del agua pesada toma gran auge, con lo que se logra un incremento en la variedad de métodos empleados en su fabricación.

TABLA N° 1-B

PROPIEDADES DEL AGUA PESADA

Abundancia Natural	1 D <sub>2</sub> O/7000 H <sub>2</sub> O
Peso Molecular	20.03
Densidad a 25°C (g/cm <sup>3</sup> )	1.1079
(g/ml)	1.1060
Punto de Ebullición	101.42°C
Punto de Congelación	3.82°C
Producto iónico a 25°C	0.3 x 10 <sup>-14</sup>
Tensión Superficial	67.8 dy/cm
Calor de Fusión	1516 cal/gmol
Forma Cristalina	Hexagonal
Índice de Refracción	1.33844
Estado Físico	Líquido Incoloro
Sección Eficaz	0.00046 barns
Promedio Logarítmico de la pérdida de Energía por colisión.	0.508

El óxido de deuterio se expende comercialmente en cantidades del orden de la tonelada, empleándosele como moderador por un determinado tipo de reactores nucleares, tanto por su efectividad en reducir energía de los neutrones rápidos de fisión, convirtiéndolos en neutrones térmicos, como por su pequeña sección eficaz de captura de neutrones respecto a la que posee el hidrógeno, no reduciendo apreciablemente el flujo de los mismos.

En menor grado es empleada como refrigerante en ciertos modelos de reactores (Ver tabla N°1), y un insignificante porcentaje se aprovecha a escala de laboratorio en estudios de mecanismos de reacción y en estudios espectroscópicos.

De todo esto se deduce que el mercado de agua pesada está virtualmente controlado por la demanda que ocasionan los reactores que la emplean, como se aprecia en la tabla N° 1.

**TABLA N° 1**

Tipo de Reactor	Función del D <sub>2</sub> O
HVGR *	Moderador
HVLWR **	Moderador
PHWR <sup>I</sup>	Moderador y Refrigerante
BHWR <sup>II</sup>	Moderador y Refrigerante
SGHWR <sup>III</sup>	Moderador y Refrigerante

Ver figura A-1.

\* Usa gas como refrigerante

\*\* Refrigerado con agua normal en ebullición.

I El D<sub>2</sub>O trabaja bajo presión.

II Hay generación de vapor en el circuito primario.

III Hay generación de vapor en el circuito secundario.

## FUENTES DE ABASTECIMIENTO

Cualquier receptáculo de hidrógeno es una fuente potencial de deuterio, lo que hace que en la naturaleza se encuentren cantidades inagotables de este elemento.

Ocurre sin embargo, que las proporciones isotópicas Deuterio/Hidrógeno halladas naturalmente, son muy bajas, lo que impide su aprovechamiento directo y obliga al trato de grandes cantidades de materia prima, para la obtención de un producto final con los requerimientos deseados.

Entre los grandes reservorios de deuterio que pueden ser explorados industrialmente se tienen : El agua, el hidrógeno y los hidrocarburos.

### - Agua.

La concentración \* de deuterio en el agua varía desde  $160 \times 10^{-6}$  en las regiones oceánicas tropicales, hasta  $100 \times 10^{-6}$  en las polares. Las aguas de mar de la región costera en general tienen una concentración de  $155 \times 10^{-6}$  a  $150 \times 10^{-6}$  de deuterio, pudiendo ser un poco mayor en zonas donde la tasa de evaporación sea alta, como por ejemplo el Mar Mediterráneo.

La concentración de deuterio en lagos y ríos situados cerca de la costa, varía entre  $145 \times 10^{-6}$  y  $151 \times 10^{-6}$ ; mientras que en los localizados lejos de ella resulta menor a  $130 \times 10^{-6}$ .

En principio la alimentación a una planta de agua pesada GS \*\* puede hacerse tanto con agua de mar como con agua dulce. Ocurre sin embargo, - que suele utilizarse agua dulce debido a que su uso ocasiona menos problemas de corrosión y por ende de mantenimiento.

El proceso GS para obtención de agua pesada tiene una baja eficiencia de recuperación de deuterio, (alrededor de un 20%), de la corriente de alimentación. Así para una planta de 400 tn/a de  $D_2O$  se necesita una alimentación de aproximadamente 450Kg. de agua por segundo, (Kg  $H_2O/s$ ).

\*. Todas las concentraciones están dadas en proporción de átomos de deuterio a hidrógeno (D/H).

\*\* Girdler Sulphide : Proceso de obtención de agua pesada, basado en el intercambio isotópico  $H_2S/H_2O$ .

Se han propuesto otros procesos, (además del GS), que involucran el uso de agua en la alimentación. De ellos el más desarrollado es el intercambio Metilamina- Hidrógeno, en el que se recupera aproximadamente entre el 45 y el 60% de deuterio. Como resultado se tiene un requerimiento de agua de alimentación de 135 a 180 Kg/s para una producción de 400 ton/a de D<sub>2</sub>O. \*

- Hidrocarburos.

No se conocen muchos datos de las concentraciones de deuterio en el petróleo y el gas natural. La tabla N° 1-A resume los detalles que sobre el tema se tienen.

TABLA N° 1-A

PAIS	HIDROCARBURO	CONCENTRACION
Canadá	Gas Natural	110 a 134 x 10 <sup>-6</sup>
	Nafta	132 x 10 <sup>-6</sup>
Venezuela	Nafta	139 x 10 <sup>-6</sup>
Argentina	Gas Natural	140 x 10 <sup>-6</sup>

Como se observa, la concentración de deuterio en los hidrocarburos, es en general menor que la conseguida en el agua, además no se dispone en la actualidad de una tecnología apropiada de extracción directa de deuterio de esta fuente de abastecimiento.

\* Para que se tenga una idea comparativa de lo que representa este volumen de agua, puede tomarse como ejemplo que una planta generadora de electricidad, que utilice combustibles fósiles, requiere, entre 115 y 150 Kg/sg Kw-h generado, de agua para enfriamiento.

- Hidrógeno.

La concentración de deuterio en hidrógeno depende de la concentración - en el material del cual se obtuvo el hidrógeno y del proceso empleado para la producción del mismo. De cualquier forma, esta concentración es muy baja, lo que se traduce en la utilización de grandes flujos de materia prima ( $H_2$ ), para lograr las cantidades requeridas de  $D_2O$ .

Así, el hidrógeno producido por reformado de vapor de gas natural o nafta, proviene en un 50% aproximadamente del hidrocarburo y el resto del agua. En procesos donde se utiliza un exceso de vapor, el deuterio se reparte equilibradamente entre el hidrógeno y el vapor, llegando el último a enriquecerse muchas veces hasta más de  $200 \times 10^{-6}$ ; en algunas plantas de reformado este vapor enriquecido se bota como condensado de desecho; como resultado, se obtiene un hidrógeno con un contenido de deuterio 25% menor que si se hubiese reciclado todo el condensado. En las unidades diseñadas para conservar el deuterio, las pérdidas de condensado suelen ser menores del uno por ciento (1%). La utilización de estas corrientes de hidrógeno es limitada ya que requieren una alta purificación antes de ser utilizadas en la planta de agua pesada.

El contenido de deuterio en la corriente de alimentación de la planta de agua pesada es un parámetro que afecta de forma importante la capacidad de producción: Un cambio en esta concentración del orden de  $1 \times 10^{-6}$  aumentará los costos del agua pesada en aproximadamente 0.5%.

Industrialmente la extracción de deuterio de la corriente de hidrógeno, se realiza por destilación o por procesos de intercambio amoníaco-hidrógeno, metilamina-hidrógeno. El primer método tiene un porcentaje de recuperación de deuterio entre 80 y 90%, mientras que los procesos de intercambio lo tienen entre 70 y 85%.

La síntesis de amoníaco requiere grandes corrientes de hidrógeno con -

con muy bajas concentraciones de impurezas, es por ésto que las mismas son especialmente atractivas para ser utilizadas en procesos de obtención de  $D_2O$ . El empleo de estas corrientes con el fin de extraerles el deuterio se ha usado en algunos casos y es conocido como un acoplamiento de planta parasitario. Con este sistema a una planta de amoníaco que produzca 1000 ton.  $NH_3$ /día \* puede acoplársele una planta de agua pesada produciendo entre 58 y 70 ton.  $D_2O$ /año.

Hay un tipo de plantas de agua pesada que aunque son alimentadas con agua, están asociadas con la producción de hidrógeno.

Este es el caso del proceso de intercambio monotérmico hidrógeno-agua. Estas plantas deben estar situadas en localidades donde se produzcan grandes cantidades de hidrógeno por electrólisis de agua. Una planta que produzca 60 ton/a de  $D_2O$  requiere un flujo de hidrógeno producido electrofíticamente de aproximadamente 7500 Kg/hora. Los altos costos por energía utilizada dada la necesidad de disponer de altas cantidades de hidrógeno, hacen limitado el empleo de este sistema de producción.

\* La alimentación de hidrógeno para esta planta es de 8000 Kg/h.



## DEMANDA .

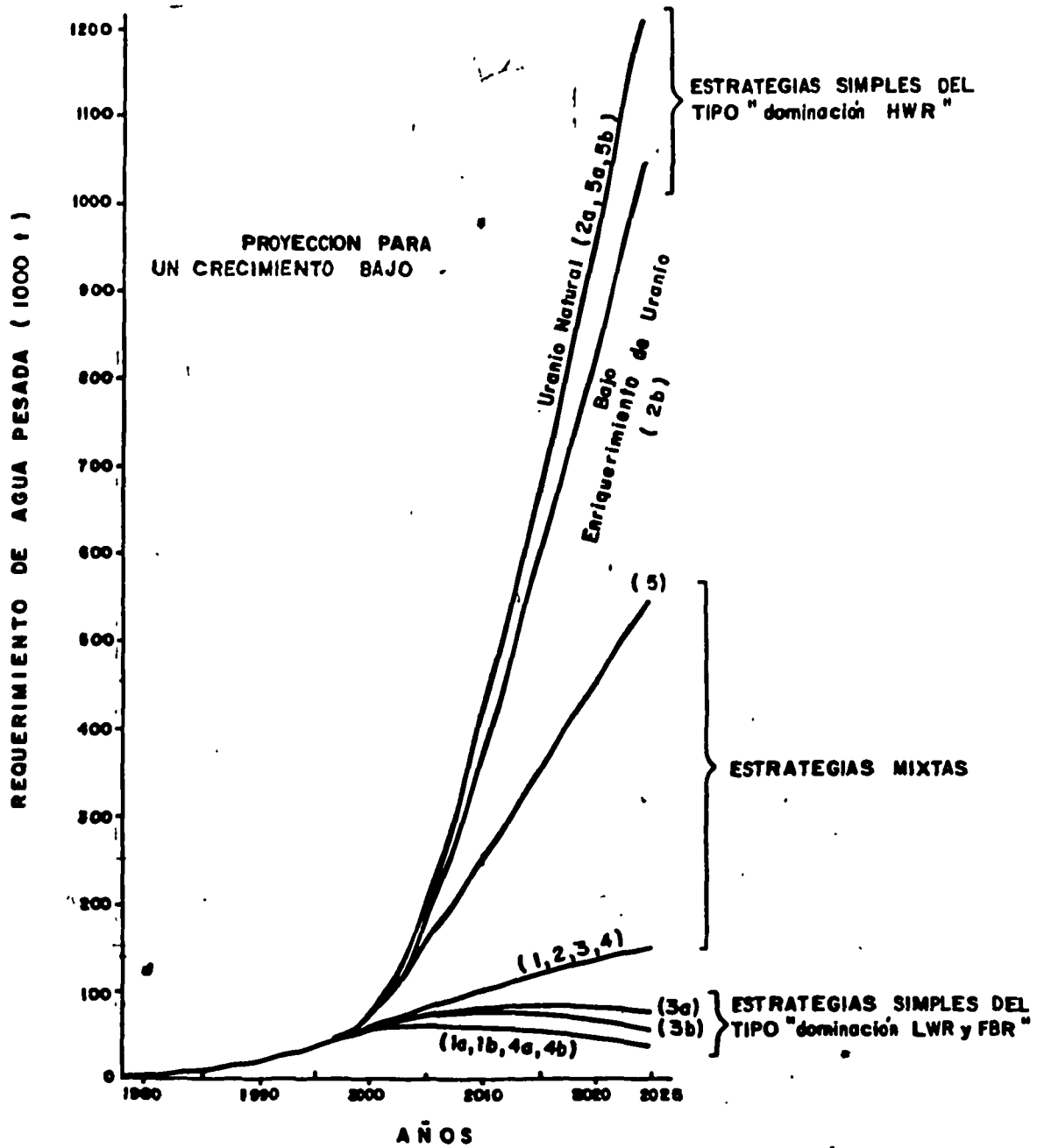
A continuación se presentan las necesidades de abastecimiento de agua pesada a nivel mundial hasta el año 2025.

La gráfica N° 1 representa una proyección de crecimiento lento de estos requerimientos, mientras que la N° 2 es una proyección para un crecimiento más acelerado.

Las perspectivas de utilización de agua pesada varían de acuerdo al tipo de reactor utilizado, es por eso que cada gráfico tiene diferentes curvas, que representan diversas posibilidades de dominación absoluta en el mercado mundial de un tipo de reactor frente a otro.

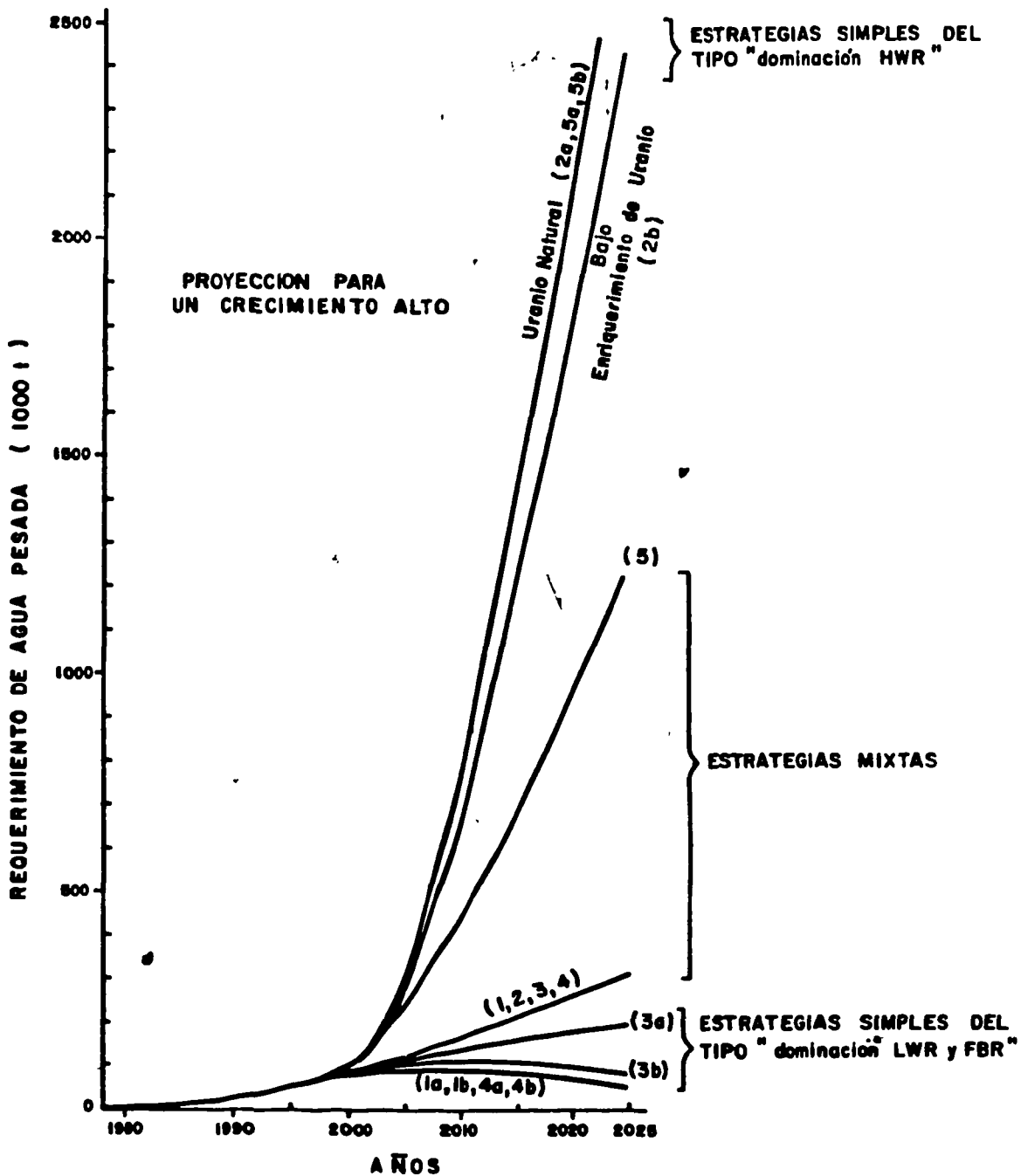
Estas opciones se denominan estrategias y se encuentran brevemente explicadas en la tabla N° 2.

Es de observar que tanto la gráfica N° 1, como la N° 2, poseen una curva común cuya proyección alcanza hasta finales de la década de los 90. Es después de este punto donde empiezan a definirse en realidad las denominadas estrategias de utilización de reactores nucleares. Esto se debe a la definición de políticas que en materia nuclear tienen los diferentes países hasta ese año. De ahí en adelante todos los datos se basan en especulaciones de completa dominación en el mercado de cierto tipo de reactor, como se explicó anteriormente.



**Fig. 1**  
**REQUERIMIENTOS ACUMULADOS DE AGUA PESADA**  
 CADA CURVA REPRESENTA DIFERENTES TIPOS DE ESTRATEGIAS  
 PROYECCION BAJA

Fuente: INFCE. Report of Working group 1 - Enero 1980



**Fig. 2**  
**REQUERIMIENTOS ACUMULADOS DE AGUA PESADA**  
 CADA CURVA REPRESENTA DIFERENTES TIPOS DE ESTRATEGIAS  
 PROYECCION ALTA

Fuente: INFCE. Report of Working group I- Enero 1980

TABLA N°2. ESTRATEGIAS DE UTILIZACION DE REACTORES

TIPO DE ESTRATEGIA	TIPO DE REACTOR DOMINANTE	CICLO DE COMBUSTIBLE
Simple * (1)	LWR	Un solo paso
" (2)	HWR	Un solo paso
" (3)	FBR	(U, Pu)
" (4)	LWR **	Reciclo
" (5)	HWR	Reciclo (U-Th) ó (Pu-U)
<p>Mixta : Esta estrategia provee datos intermedios entre las estrategias simples y es a la hora de hacer un estudio, probablemente la más acertada debido a que la penetración en el mercado de las variadas tecnologías nucleoelectricas, varia en los distintos paises dependiendo de las politicas energeticas y tecnologicas, economia y capacidad industrial nacionales :</p>		
Mixta 1:	10% FBR; 10% HWR; 80% LWR	
" 2:	30% FBR; 10% HWR; 60% LWR	
" 3:	60% Eventualmente FBR; 10% HWR; resto LWR	
" 4:	60% FBR; 10% HWR; 30% LWR	
" 5:	30% FBR; 40% HWR; 30% LWR	

\* Cada una de las estrategias simples es considerada con variantes técnicas (b) ó sin ellas (a), que implican una demanda menor o mayor de Uranio.

\*\* Sin tomar en cuenta los FBR.

**TABLA N. 3. REQUERIMIENTOS NETOS ACUMULADOS DE AGUA PESADA**

(Miles de Toneladas)

Estrategia		1980	1990	2000	2010	2020	2025
SA1	a	3.6	23	80	81	72	53
	b	3.6	23	80	81	72	53
SA2	a	3.6	23	93	797	2083	2836
	b	3.6	23	91	693	1792	2433
SA3	a	3.6	23	85	132	182	198
	b	3.6	23	85	107	100	82
SA4	a	3.6	23	80	81	72	53
	b	3.6	23	80	81	72	53
SA5	a	3.6	23	93	796	2080	2832
	b	3.6	23	93	796	2080	2832
SB1	a	3.5	21	58	58	48	36
	b	3.5	21	58	58	48	36
SB2	a	3.5	21	66	434	932	1216
	b	3.5	21	65	379	804	1046
SB3	a	3.5	21	61	80	82	76
	b	3.5	21	61	75	67	36
SB4	a	3.5	21	58	58	48	36
	b	3.5	21	58	58	48	36
SB5	a	3.5	21	66	433	931	1215
MA: 1,2,3,4		3.6	23	87	157	243	293
MA5		3.6	23	88	421	893	1178
MB: 1,2,3,4		3.5	21	62	102	138	154
MB5		3.5	21	65	254	455	546

#### PRODUCCION MUNDIAL ACTUAL .

La tabla N° 4 recopila las producciones actuales y los procesos de extracción que utilizan las plantas de agua pesada actualmente en funcionamiento. También se señala la fecha de "Arranque" o puesta en marcha de cada planta. Si se hace una evaluación global se obtiene que alrededor de unas 3000 ton. del producto ( $D_2O$ ), se obtuvieron para el último año de fabricación y que otras 1600 ton/a podrían sumarse próximamente, ya que las plantas de La Prade y Bruce D., ambas situadas en Canadá, y con una capacidad de producción de 800 ton/a cada una, se encuentran en avanzado estado de construcción.

La tabla N° 4 no incluye las plantas que se supone existen en la URSS y en la República Popular China.

Hasta el momento la producción ha abastecido satisfactoriamente el mercado mundial, pero la construcción de nuevas plantas no cesa ya que la demanda va en aumento exponencial; es por ésto que numerosas firmas con experiencia en el diseño, montaje y suministro para plantas de  $D_2O$ , funcionan actualmente en el mundo, pudiendo mencionarse como ejemplo, en los Estados Unidos : Atomergic Chemetals Corp., Edlow International CO.; en Canadá: Atomic Energy of Canada LTD International, Canatom LTD, The Lumus Company Canada LTD; en Noruega: Norsk Hydro A.S.; en Suiza: Sulzer Brothers Limited, y en Alemania : Kraftwerk Union.

La tabla N°5 resume brevemente el o los procesos de producción de agua pesada, en los que se especializan las compañías más importantes, dada su mayor experiencia.

La experiencia vivida por otros países demuestra que hay que ser muy cuidadosos a la hora de elegir los servicios técnicos de una ó otra empresa ya que solo algunas de ellas ofrecen la posibilidad de " Transferir Tecnología ", es decir, permiten una verdadera participación del país contratante. Como ejemplo de esta situación se tiene el caso de Argentina, vi

vido recientemente; en esta oportunidad Alemania aventajó a Canadá en su oferta de venta y construcción de la planta de agua pesada argentina, debido entre otras cosas, a que el País del Norte ofrecía una tecnología del tipo "Llave en mano" sin ofrecer oportunidades de participación a los argentinos.

Otro ejemplo de este tipo se tiene en el contrato que la India firmó con la Sulzer en combinación con Air-Liquide, para el emplazamiento de dos plantas productoras de agua pesada, una en Baroda y la otra en Tuticorin. En este caso se le permitía a la India el suministro de 1/3 del material necesario para la construcción en sí. Por otro lado las compañías contratadas proporcionaban: El trabajo de Ingeniería y el suministro de 2/3 del material requerido, el control y supervisión de la participación India, y la patente de producción.

Aunque en Venezuela no existe ninguna firma nacional especializada en diseño y montaje en este campo, si las hay capaces de tomar parte en muchas de las áreas que conforman el proyecto en sí, como son la construcción de algunos equipos, tuberías, accesorios, obras civiles y participación en Ingeniería.

TABLA N° 4. PRODUCCION DE AGUA PESADA ACTUAL

PAIS	PLANTA	PROCESO DE EXTRACCION	PRODUCCION Ton/a.	FECHA DE PUESTA EN MARCHA
Canadá	Port Hawkesbury	GS	400	1970
	Bruce A	GS	800	1973
	Glace Bay	GS	400	1976
	Bruce B	GS	800	1979
	La Prade	GS	800	*
	Bruce D	GS	800	*
India	Nangal	Electrólisis/ Destilación H <sub>2</sub>	14	1963
	Baroda	Intercambio monotérmico H <sub>2</sub> /NH <sub>3</sub>	67	1977
	Tuticorin	Intercambio monotérmico H <sub>2</sub> /NH <sub>3</sub>	71	1978
	Talcher	Intercambio bitérmico H <sub>2</sub> /NH <sub>3</sub>	63	* 1979
	Kota	GS	100	1979
Noruega	Rjukan	Electrólisis	20	1935
	Savannah River	GS	190	1952

\* Estas plantas se encuentran en avanzado estado de construcción.



**TABLA N° 5. FIRMAS COMERCIALES ESPECIALIZADAS EN DISEÑO.**

**MONTAJE Y/O SUMINISTRO PARA PLANTAS DE D<sub>2</sub>O**

PROCESO	FIRMA ESPECIALIZADA
H <sub>2</sub> O Destilación	USAEC, Sulzer
NH <sub>3</sub> Destilación	CEA
H <sub>2</sub> Destilación	Linde, Sulzer, CEA/Air Liquide
H <sub>2</sub> O/H <sub>2</sub> S Intercambio químico.	USAEC, AECL, Lumus, Canatom, Pinsch/Bamag, URSS, DAE (Gov. India)
H <sub>2</sub> /NH <sub>3</sub> Intercambio químico.	Uhde, CEA/ Air Liquide/ Sulzer, DAE (Gov. India)
Metilamina Intercambio Químico.	Sulzer/AECL
H <sub>2</sub> /H <sub>2</sub> Intercambio Químico.	USAEC, AECL, Sulzer, Uhde
H <sub>2</sub> O/ NH <sub>3</sub> Intercambio Químico	Sulzer
Electrólisis	Norsk Hydro.

MÉTODOS DE PRODUCCIÓN DE AGUA PESADA.

1. Clasificación.

La clasificación de los métodos de obtención de agua pesada puede hacerse en varios grupos, dependiendo del patrón que se tome para dicha división.

Por lo expuesto anteriormente y basándose en la bibliografía, se construye el siguiente cuadro de clasificación.

PATRÓN DE CLASIFICACION	MÉTODOS	PROCESOS
<p>En función de la disponibilidad de materia prima principal.</p>	<p><u>DEPENDIENTES</u> : Comparten la materia prima con otra planta industrial. Producción limitada.</p> <p><u>INDEPENDIENTES</u> : Utilizan agua como materia prima y por tanto la producción en este aspecto resulta ilimitada.</p>	<p>- Amoníaco/ Hidrógeno - Amina/ Hidrógeno - Electrólisis.</p> <p>- Acido Sulfhídrico/Agua - Hidrógeno/ Agua</p>
<p>En función de la etapa de producción alcanzada.</p>	<p><u>DESARROLLADOS</u> : Han alcanzado como mínimo la etapa de planta piloto.</p> <p><u>POTENCIALES</u> : Se encuentran en desarrollo o han sido propuestos.</p>	<p>Todos los incluidos anteriormente en el grupo Dependientes e Independientes.</p> <p>- Excitación óptica.</p>

<p>función del tipo de operación fundamental en que están basados.</p>	<p><b>INTERCAMBIO ISOTOPICO.</b> Se ponen en contacto en condiciones adecuadas, dos compuestos hidrogenados y se origina una acumulación preferencial de deuterio en uno de ellos.</p> <p><b>DESTILACION</b></p> <p><b>ELECTROLISIS</b> <b>MÉTODOS POTENCIALES EN DESARROLLO.</b></p>	<p>+ Procesos monotérmicos, involucran una transformación química de un componente en otro. Hidrógeno/ Agua, Hidrógeno/Amoníaco.</p> <p>- Procesos bitérmicos, utilizan la variación de la constante de equilibrio con la temperatura como medio para invertir el sentido de transferencia del deuterio. (Hidrógeno/ Amoníaco)</p> <p>- Hidrógeno. - Amoníaco - Agua</p> <p>- Excitación óptica</p>
--	---	---

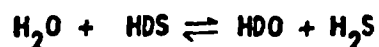
De estos métodos los más económicos y confiables desarrollados hasta ahora son los que involucran un intercambio entre dos compuestos diferentes e hidrogenados: Un gas y un líquido, sobre todo para la parte de pre-enriquecimiento del proceso en la que se utilizan grandes cantidades de materia prima debido a la baja concentración de deuterio existente en la naturaleza.

Para la fase de enriquecimiento o elevación de la concentración de deuterio se pueden utilizar métodos más simples y confiables, como la destilación y electrólisis.

## 1.1. INTERCAMBIO ISOTOPICO.

### Acido Sulfhídrico /Aqua.

La obtención de agua pesada en este caso se basa en el intercambio de deuterio entre el agua natural y el ácido sulfhídrico. La velocidad de reacción es alta y no requiere el uso de un catalizador :



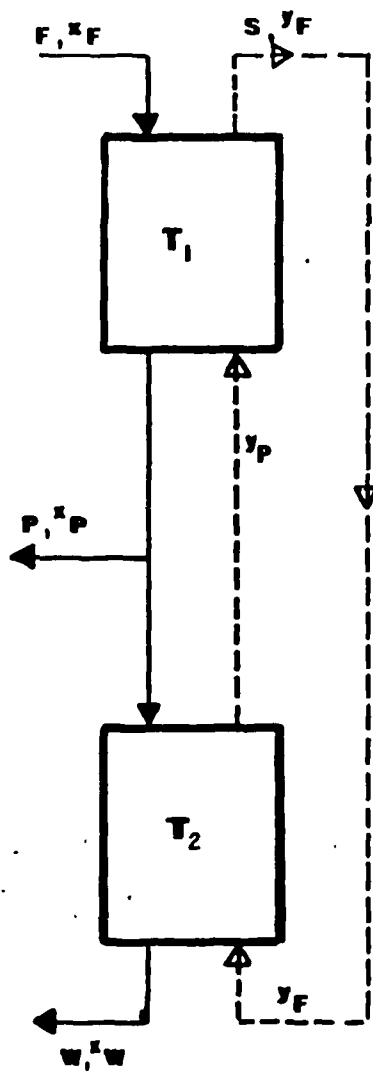
El diseño a escala industrial del proceso corresponde al método bi térmico, siendo las temperaturas de operación de la columna fría y caliente de 30°C y 130°C respectivamente. Como se observa en la figura B-1, el H<sub>2</sub>S circula en circuito cerrado, de forma que sale por la cabeza de la columna fría y sirve de alimento a la caliente, cediendo el deuterio al H<sub>2</sub>O en la primera, mientras que en la segunda ocurre lo contrario.

Los factores que determinan los parámetros de operación del sistema son :

- La formación del hidrato sólido H<sub>2</sub>S. 6H<sub>2</sub>O, a bajas temperaturas y altas presiones.
- El incremento de humedad del gas a temperaturas mayores de 130°C
- La necesidad de usar equipos no usuales debido a las altas presiones de operación.

Este proceso se utiliza en la etapa de preenriquecimiento, llegando a alcanzar en tres etapas sucesivas una concentración del 20% -- aproximadamente.

Debido a la alta toxicidad y poder corrosivo del ácido sulfhídrico se deben tomar precauciones en el diseño de válvulas y otros equipos, selección de materiales, técnicas de operación e instalación.



$$T_2 > T_1$$

$T_1$  = Temperatura columna fria

$T_2$  = Temperatura columna caliente

—  $H_2O$

- - -  $H_2S$

$x$  = Fracción Atómica de D, en  $H_2O$

$y$  = Fracción Atómica de D, en  $H_2S$

F = Corriente de Alimentación

P = Producto deseado, rico en D

W = Corriente Empobrecido en D

Fig. B-1.- ESQUEMA DEL PROCESO BITERMICO  $H_2S / H_2O$

Este método es el más experimentado industrialmente y provee en la actualidad el 90% de la producción mundial.

## 1.2. INTERCAMBIO ISOTOPICO

### Amoníaco /Hidrógeno.

Este sistema se utiliza en la etapa de preenriquecimiento pero a diferencia del anterior en el que se usa como materia prima, éste utiliza hidrógeno lo que lo sitúa en el grupo de métodos dependientes y por tanto de producción limitada como se sabe. La reacción posee un alto factor de separación, pero su velocidad es baja, por lo que se requiere el uso de un catalizador (amiduro de potasio) \*

El proceso se basa en poner en contacto a contracorriente  $H_2$  gaseoso con  $NH_3$  líquido: El deuterio que contiene el hidrógeno pasa, en parte, al  $NH_3$ , según la siguiente reacción:



El  $H_2$  utilizado en el proceso contiene alrededor de 130 ppm de deuterio y se recupera un 70 a 80%, necesitándose grandes caudales para lograr una producción significativa de  $D_2O$ .

A escala industrial se han utilizado las dos variantes del intercambio isotópico.

- Proceso monotérmico, trabaja a una temperatura de  $25^\circ C$  y obtiene una recuperación del 80% de deuterio. Consume más energía que el proceso bitérmico, y presenta la desventaja de recuperación del catalizador. (Ver fig. 3).

\* Se ha establecido que los amiduros de cesio y rubidio son catalizadores más efectivos que el de potasio. Además son más seguros para manipular y más solubles en amoníaco, pero su alto costo limita su utilización.

- Proceso bitérmico, con una recuperación de deuterio menor (43%), pero con la ventaja de que el procedimiento permite el reciclado del catalizador a través de todo el sistema, sin tener que implementar una recuperación del mismo. Las temperaturas de operación de las columnas (fría y caliente) están limitadas por varios factores como son solidificación del  $\text{NH}_3$  ( $\alpha$ -78°C), presión de trabajo y los valores de  $\alpha$  (factor de separación). Normalmente se trabaja con temperaturas de -30°C y 60°C para la columna fría y caliente respectivamente. (Ver fig. 4).

En cuanto a diseño y operación, el proceso  $\text{NH}_3/\text{H}_2$ , trabaja de forma similar a una planta productora de amoníaco, lo que facilita el acoplamiento de ambas. Este sistema hace que la producción máxima de agua pesada esté limitada por la disponibilidad de hidrógeno y por lo tanto por la producción de la planta de amoníaco, que se supone ya está instalada.

La conexión a la planta de agua pesada no afecta a la planta de síntesis de amoníaco como lo demuestran las experiencias de Francia y la India.

Como se muestra en la Fig. 5., el gas de síntesis es derivado a la planta de agua pesada y después de pasar a través de ella, alimenta la sección de síntesis.

Este sistema es beneficioso económicamente cuando las cantidades tratadas permiten cargar los costos de materia prima a los costos de  $\text{NH}_3$ . La experiencia demuestra que una producción aproximada de 60 ton. de  $\text{D}_2\text{O}$  ofrece beneficios económicos de este tipo.

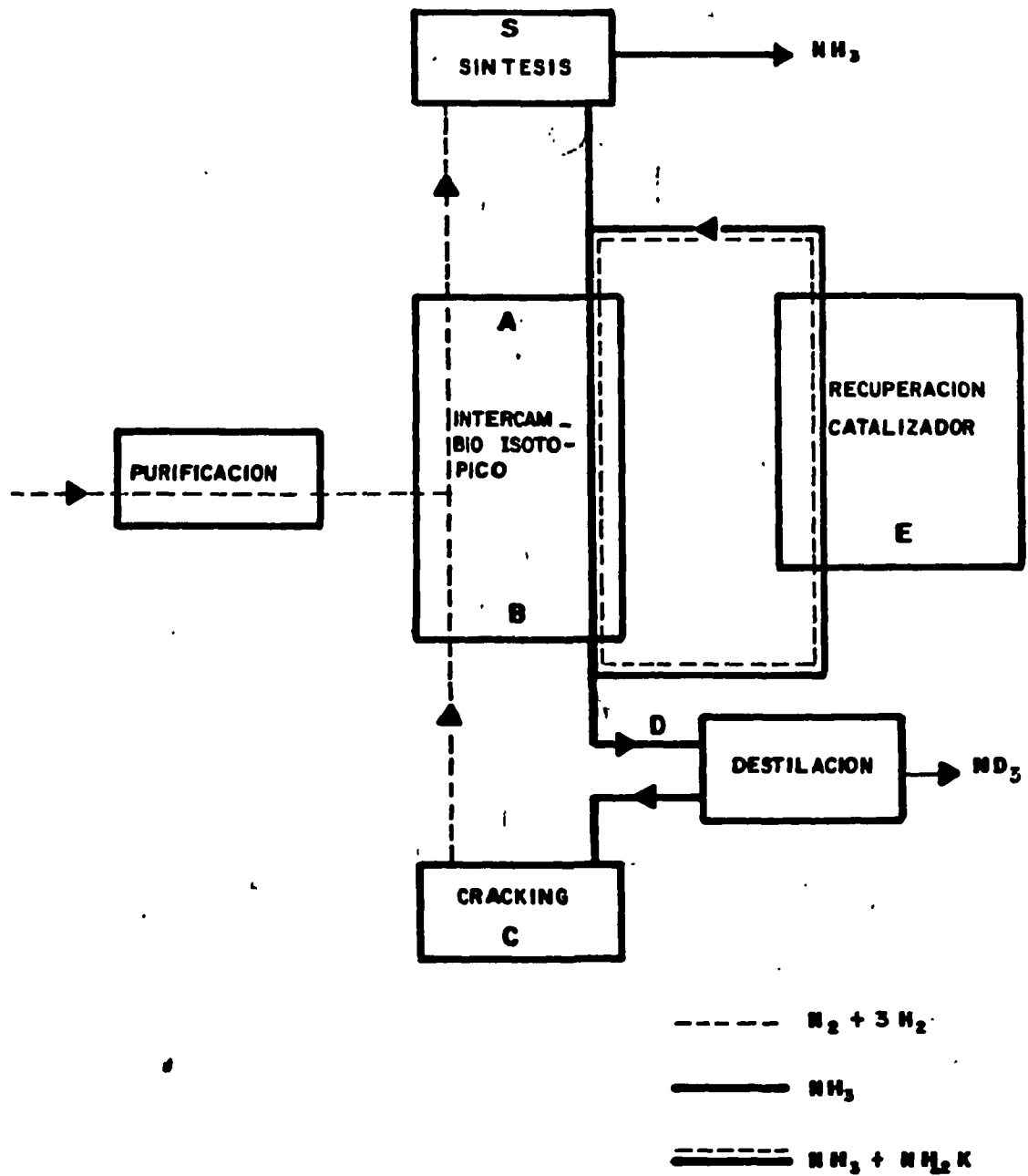
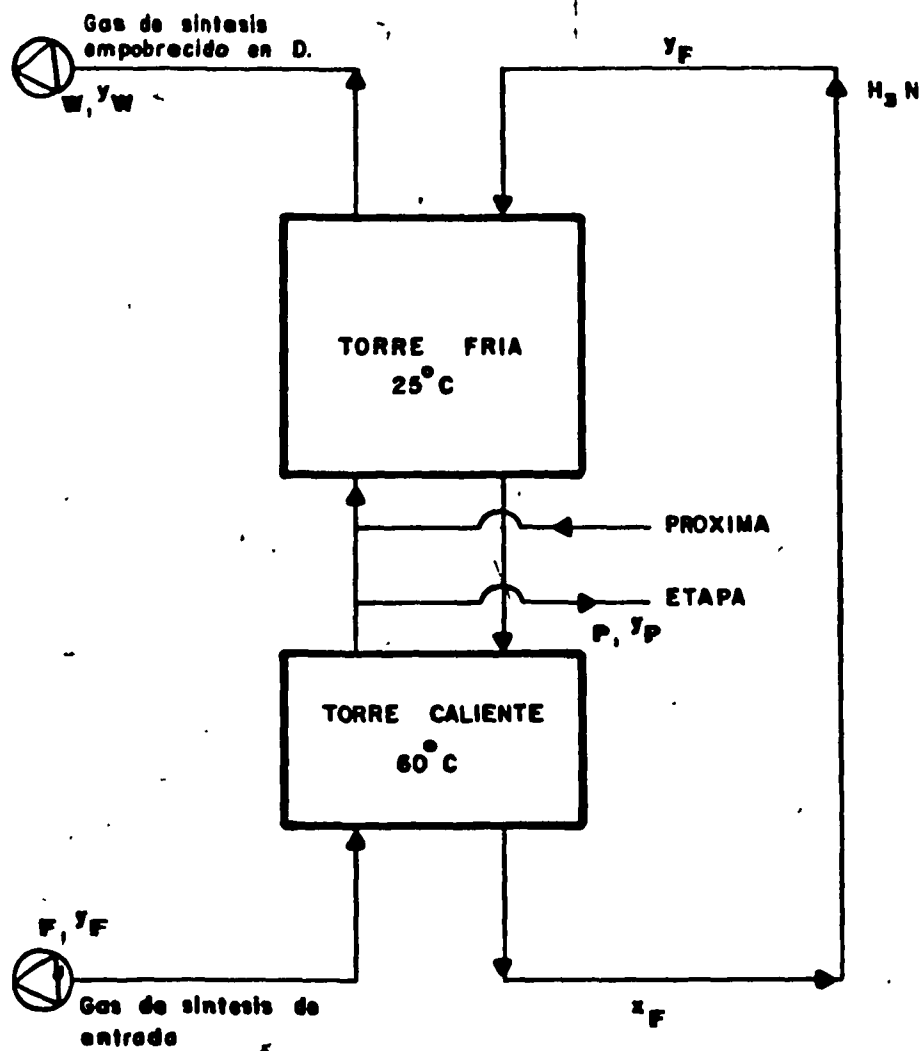


Fig. 3.- ESQUEMA GENERAL DEL PROCESO MONOTERMICO  
 NH<sub>3</sub> / H<sub>2</sub>



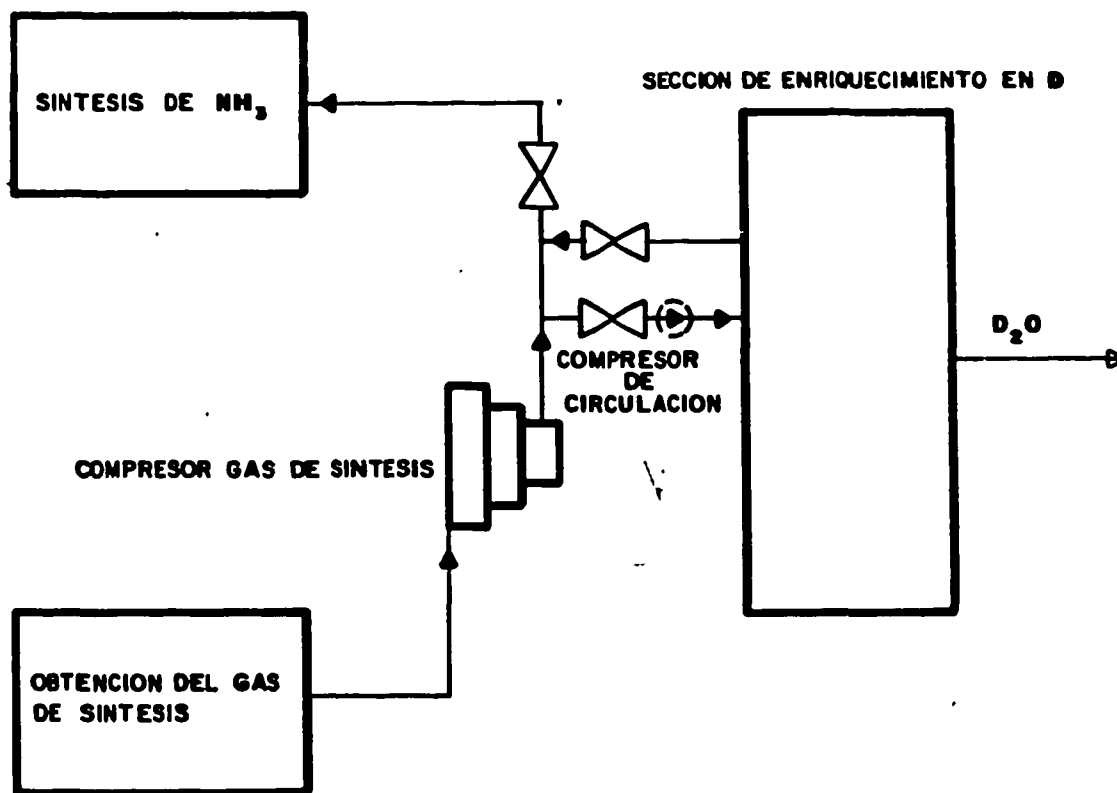


$x$  = Fracción atómica de D en  $H_3N$   
 $y$  = Fracción atómica de D en gas de síntesis

$P$  = Producto enriquecido en D.  
 $F$  = Alimentación  
 $W$  = Salida Pobre en D

Fig. 4.- ESQUEMA DEL PROCESO BITERMICO





**Fig.5.-ACOPLAMIENTO DE UNA PLANTA DE D<sub>2</sub>O A UNA PLANTA DE SINTESIS DE NH<sub>3</sub>**

### 1.3. DESTILACION DE AGUA.

Es una técnica bien conocida, simple y de producción ilimitada.

Como todas las de su tipo, la destilación de agua, se basa en las pequeñas diferencias de presión de vapor entre las especies isotópicas, esto hace que el factor de separación sea muy pequeño; por tanto no se considera un método económico de obtención de  $D_2O$  en la etapa de pre-enriquecimiento, ya que el manejo de grandes cantidades en las primeras etapas se hace necesario, y estos requerimientos ocasionan un elevado consumo de vapor y alto costo de las instalaciones.

El agua utilizada en el proceso debe ser químicamente pura, \* ya que de haber impurezas estas formarán parte de la fase líquida del proceso, y es de ella de la que se recupera el producto final: Agua pesada.

\* Un tratamiento combinado de filtrado, intercambio iónico, cloración y filtrado con carbón activado, puede transformar en químicamente pura el agua de un río, un mar ó un lago.

- Posiblemente también se necesite añadir un tratamiento desalinizador.

#### 1.4. DESTILACION DE HIDROGENO.

Su fundamento teórico es igual al anterior y por la misma razón se convierte en un proceso de concentración final, a pesar de que presenta el mayor factor de separación de todos los métodos de destilación, pero con la desventaja del bajo punto de ebullición que presenta el hidrógeno ( $-252.5^{\circ}\text{C}$ ), lo que implica problemas de ingeniería de bajas temperaturas.

En general cualquier gas que esté formado por más de un 60% de hidrógeno, con una concentración en deuterio del orden de 120 ppm y del cual se disponga una cantidad mínima de  $5000 \text{ m}^3/\text{hr.}$ , puede utilizarse como alimentación de un proceso de destilación de hidrógeno para producir agua pesada. Es por eso que el gas de síntesis puede considerarse apto para ser utilizado en este proceso, ya que cumple con las condiciones como fuente de hidrógeno en ciertas etapas del reformado del gas.

La Figura N° 6 indica cual es la etapa a la que puede acoplarse la planta de  $\text{D}_2\text{O}$  para obtener buenos resultados de producción.

En nuestro país existen otras corrientes que podrían ser utilizadas como fuente proveedora de hidrógeno, pero que no cumplen la condición de caudal necesario para que el proceso, resulte económicamente viable, por lo que no se tomarán en cuenta en este estudio.

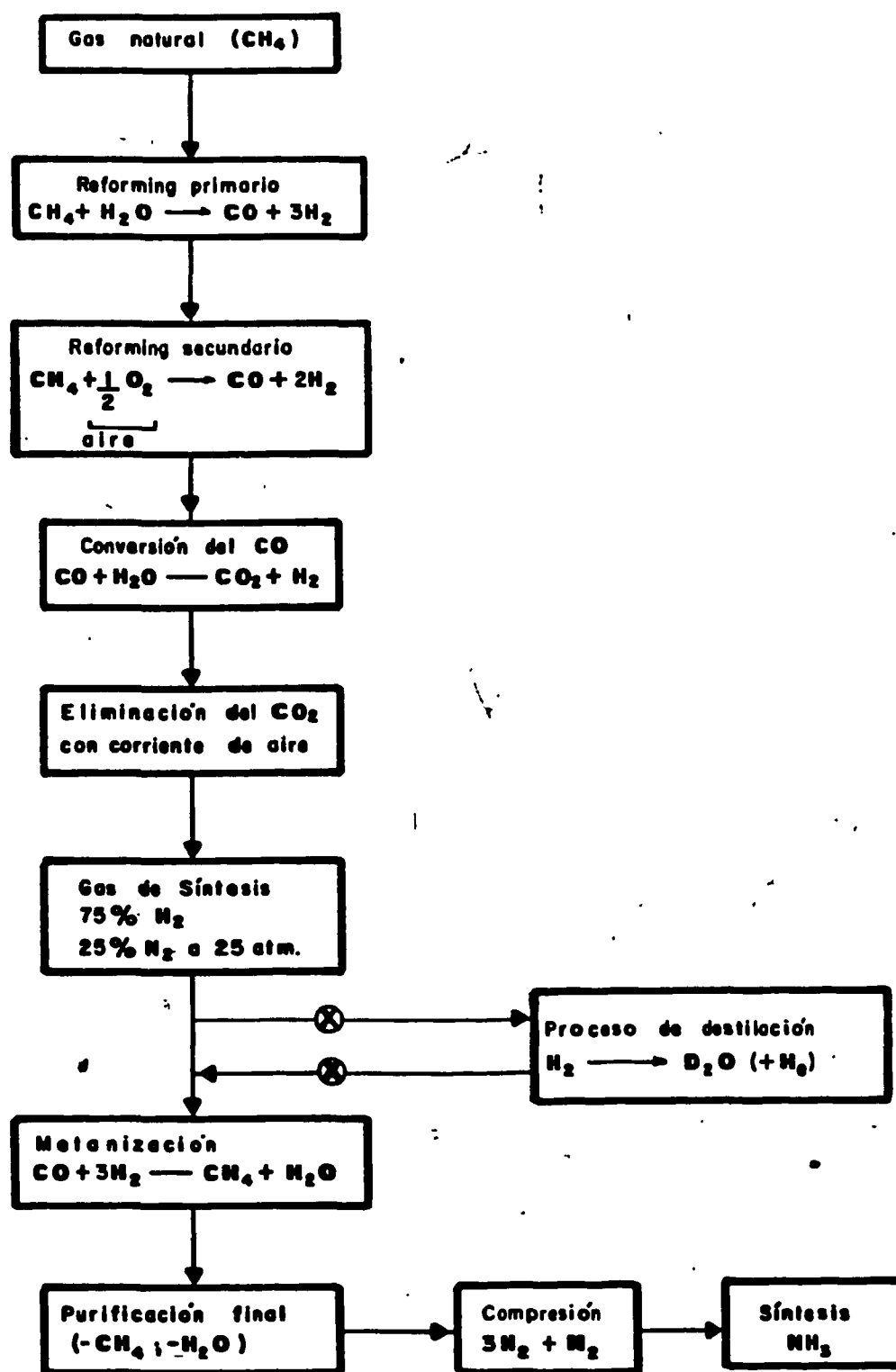


Fig.6.-PRINCIPALES PASOS DEL REFORMING Y ACOPLAMIENTO CON UNA PLANTA DE DESTILACION DE H<sub>2</sub>

**.5. DESTILACION DE AMONIACO.**

En general funciona como una destilación de hidrógeno, y aunque su factor de separación es menor trabaja a temperaturas mayores : --  
-33.3°C, lo que ofrece ventajas para el trabajo de ingeniería.

Este método presenta superioridad sobre la destilación de agua en -  
cuanto al mayor calor latente del amoniaco, mayor factor de separación a presiones de una atm. y superiores, mayor porcentaje de hidrógeno en el amoniaco que en el agua. Estas ventajas físico-químicas se traducen en ahorro de energía y por lo tanto los gastos disminuyen.

Ahora bien, los costos de materia prima son mayores en el caso de -  
destilación de amoniaco \*, además de que la destilación de agua resulta muy conveniente por ser un proceso independiente, cosa que no sucede con el  $NH_3$ .

\* Cuando se usa el proceso " Destilación de  $H_2O$  ", el único costo de la materia prima (agua) es su extracción y purificación.

## 1.6. ELECTROLISIS.

Aunque es el método con mayor factor de separación y que usa agua como materia prima, resulta costoso debido al alto consumo de energía eléctrica que ocasiona \*, esto trae como consecuencia que el hidrógeno producido sea muy caro, cosa que solo se justifica si ese producto va a ser usado posteriormente en síntesis de amoníaco, por ejemplo.

La más desarrollada de las técnicas de electrólisis es la del agua o soluciones acuosas diluidas, pero también se ha sugerido la de amoníaco o de sales amoniacales.

Los peligros principales de este proceso derivan del uso de altos voltajes de corriente continua (hasta 600 V), en algunos casos mediante el uso de conductores desnudos, además de que se manipulan mezclas explosivas de  $H_2$  y  $O_2$ .

En general este método puede ser atractivo para zonas donde el costo de la corriente eléctrica sea bajo, siempre que exista un mercado suficiente para el hidrógeno producido, lo que limita los volúmenes de producción de agua pesada.

\* 127000 KWh por Kg/ $O_2$  producido.

## 1.7. METODOS POTENCIALES EN DESARROLLO

### 1.7.1. METODOS A PARTIR DE GAS NATURAL.

La información sobre la posibilidad de utilizar gas natural, como fuente de deuterio, no es escasa, pero no hay datos concretos sobre su aplicabilidad industrial inmediata.

La Comisión Nacional de Energía Atómica Argentina ha elaborado estudios al respecto que incluyen proporciones, fundamentos teóricos y algunos datos experimentales.

Algunas de las características notables que aventajan el uso del metano son las siguientes :

- 1) Disponibilidad como fuente natural.
- 2) Su empobrecimiento en deuterio no disminuye sus múltiples aplicaciones.
- 3) Posee un alto contenido en deuterio (25% p/p).
- 4) Los procesos de obtención a partir de gas natural, aunque hasta ahora no alcanzan un rendimiento aceptable, no son imposibles.

Los métodos propuestos a partir de gas natural son : destilación; absorción ó cromatografía; Intercambio Metano/ Hidrógeno, y Metano/ Agua.

### 1.7.2. EXCITACION OPTICA.

El fundamento teórico de este sistema se basa en la excitación selectiva de las moléculas de  $D_2O$  y  $HDO$  presentes en el agua natural, mediante radiaciones ópticas, que ocupan en el espectro la zo



na comprendida desde el ultravioleta y el infrarrojo, y que se generan por medio de rayos láser.

Aunque este método todavía se encuentra en una etapa de desarrollo incipiente, vale la pena mencionarlo por la ventaja económica que representa debido a la escasa demanda energética que requiere, y a los altos factores de separación que han sido reportados, según se establece en la serie N° 68 de Simposios de la American Chemical Society.

	PRODUCCION	ETAPA DE UTILIZACION	FACTOR DE SEPARACION	CARACTERISTICAS	VENTAJAS	DESVENTAJAS	OTRAS OBSERVACIONES.
ión	Ilimitada	Concentración final	1.024 (120kPa)	Tamaño excesivamente grande. Alimentación con agua.	Método independiente Confiable. Operación Simple	Alto consumo de vapor por tonelada de agua pesada producida.	No presenta problemas de corrosión ni de toxicidad.
ión	Limitada	Concentración final	1.036 (100kPa)	Tamaño excesivamente grande Alimentación con amoníaco.	Es un método confiable. Operación simple.	Alto consumo energético por tonelada de agua pesada producida. Método dependiente.	No presenta problemas de corrosión ni de toxicidad.
ión	Limitada	Concentración final	1.5 (250kPa)	Tamaño: Pequeño. Alimentación con hidrógeno.	Muy confiable Técnicamente perfecto Costos de instalación relativamente bajos.	Dependiente Alto consumo de energía eléctrica específica: 0.39W/s Su funcionamiento es muy complejo.	Resulta menos económico que los procesos de intercambio químico debido a los costos de energía eléctrica. No presenta problemas de toxicidad Un problema en los materiales es la resistencia al STRESS a muy bajas temperaturas.
bio	Ilimitada	Pre-enriquecimiento (hasta concentración del 20%)	2.35 (30°C)	Tamaño: Pequeño Alimentado con agua Proceso bitérmico.	Independiente No requiere del uso de catalizadores. Muy confiable.	Baja eficiencia de extracción de deuterio Presenta grandes problemas de corrosión. Alto consumo de energía térmica específica: 0.8W	Solo resulta económico cuando se construyen plantas de gran tamaño (algunos cientos de Ton D <sub>2</sub> O/a) La toxicidad de esta planta puede ser muy grande si no se controla adecuadamente. Debido a su corrosividad se utiliza acero inoxidable como material de construcción.
bio	Limitada	Pre-enriquecimiento (hasta concentración cercanas al 10%)	5.9(-40°C) 2.8(70°C)	Tamaño: Pequeño Se trabaja con las dos variantes del proceso: - Proceso monotérmico - Proceso bitérmico Alimentación con H <sub>2</sub>	Utilizado de forma muy confiable a nivel industrial. Alta eficiencia de extracción de deuterio. Consumo de energía térmica específica relativamente baja: 0.3807W	Método dependiente Requiere el uso de un catalizador.	Para una capacidad de planta de alrededor de 60ton/a se obtienen buenos costos de producción de D <sub>2</sub> O. El proceso puede estar acoplado a una planta productora de amoníaco.
bio	Si se alimenta con H <sub>2</sub> es ilimitada. Si se alimenta con N <sub>2</sub> es limitada.	Pre-enriquecimiento	3.4 (50°C)	Tamaño: Medio Puede ser alimentada con H <sub>2</sub> O ó con H <sub>2</sub>	Si se alimenta con H <sub>2</sub> se puede convertir en un sistema independiente.	Requiere el uso de un catalizador. La eficiencia de extracción de D es muy baja.	De las diversas variantes del proceso solo una alcanzó la etapa industrial y fue cerrada en 1956 por antieconómica.
bio	Ilimitada si se alimenta con H <sub>2</sub>	Pre-enriquecimiento		podría ser un proceso de transferencia independiente a uno dependiente.	Simple Comprobado y aprobado No requiere del uso de un catalizador Baja de transferencia de deuterio relativamente alta.		Resulta económico si se combina con un proceso N <sub>2</sub> /H <sub>2</sub>
bio Quí	Limitada	Pre-enriquecimiento	7.1(-40°C) 3.7(40°C)	Tamaño: Pequeño Alimentación con H <sub>2</sub>	La energía térmica específica consumida es relativamente baja: 0.3W Buena eficiencia en la extracción de deuterio	Es un método dependiente. Requiere el uso de un catalizador. No es un método confiable hasta el momento.	Solo ha alcanzado la etapa de planta piloto. Las otras observaciones iguales al caso de intercambio N <sub>2</sub> /N <sub>3</sub>
bio de	Limitada	Pre-enriquecimiento Enriquecimiento final	7.5-8(150°C)	Alimentado con H <sub>2</sub> O	Alto factor de separación.	Utilización de altos voltajes de corriente continua. Manipulación de mezclas explosivas de O <sub>2</sub> e H <sub>2</sub>	La etapa de pre-enriquecimiento necesita energía eléctrica barata y abundante. Por esto normalmente se usa en la etapa de enriquecimiento final. Su Producción está limitada por el H <sub>2</sub> producido y no por la alimentación.
ión foto	Limitada		Muy alto	Uso de rayos ultravioleta e infrarrojos.	Alto factor de separación.	Método dependiente Técnicamente inmadura. Alto consumo de energía específica. Requiere el uso de catalizadores.	No ha alcanzado la etapa de planta piloto.

refiere al volumen de la planta y no a la capacidad de producción.

Este valor corresponde al intercambio monotérmico.

Pa es una unidad de presión equivalente a 101.9716 Kp/m<sup>2</sup>

## OBSERVACIONES

En la introducción de este informe se explicaron las motivaciones principales que hacen pensar en la factibilidad de producción de agua pesada en Venezuela, basándose principalmente en la disponibilidad de las materias primas principales, la experiencia dada por la Industria Petrolera y Petroquímica y el mercado existente en un futuro cercano.

Paralelas a estas circunstancias que a primera vista resultan tan favorables, surgen situaciones que convierten en tentadora la idea de un estudio más detallado y profundo del problema. Son ellas :

1. La experiencia vivida por otros países en cuanto a los procesos utilizados, ya que de las diversas tecnologías existentes para extracción de agua pesada, se encuentran dos como las más usadas :

- Proceso de ácido sulfhídrico/agua, con una gran experiencia de operación acumulada y usada en plantas de gran capacidad productora (hasta 800 ton/a).
- Proceso de intercambio químico amoníaco/hidrógeno, establecido recientemente \* y que tiene la facultad de su fácil acoplamiento a plantas de amoníaco.

La capacidad óptima (económicamente) de producción para este tipo de planta es de 60 a 70 ton  $D_2O/a$ , ya que de esta forma los costos de materia prima pueden ser recargados a la producción de amoníaco.

\* La primera planta Industrial de este tipo fué la de Harzingarbe, Francia que comenzó a operar en 1967. Debido a un accidente en la planta de síntesis de  $NH_3$  a que estaba acoplada dejó de funcionar en 1972.

2. Otro proceso muy utilizado en la obtención de agua pesada es el de electrólisis el cual requiere de energía eléctrica barata y en grandes cantidades. Venezuela cumple con el primer requisito, pero dado que no dispone de cantidades muy abundantes habría que estudiar la factibilidad del empleo de este método en las etapas de concentración final. Este estudio compararía, económicamente, otros métodos destinados para este fin, como son destilación de  $H_2O$ ,  $H_2$  y  $NH_3$ .

3. El precio de  $D_2O$  en el mercado internacional está en el orden de - los 200\$/Kg; por otro lado los precios del amoníaco y el azufre (producto obtenido a partir de  $H_2S$ ) están alrededor de 150\$/ ton.  $NH_3$  y 100\$/ ton S.

Por supuesto que estos datos no configuran una base sólida sobre la que pueda hacerse una comparación de posibles márgenes de ganancias, pero como ya se dijo, incitan a seguir un estudio detallado de factibilidad de producción de agua pesada.

4. El costo de capital de una planta de agua pesada es menor al 5% del costo de capital total de la central de potencia para la cual se obtendría esa agua pesada.

5. Los costos de producción de agua pesada pueden repartirse entre tres componentes : capital; energía; operación y mantenimiento.

Ahora bien la distribución de estos costos depende del año de construcción, de los costos unitarios de energía, y del tipo de proceso empleado. Es por ésto que los costos de producción de agua pesada varían considerablemente de una planta a otra, incluso dentro del mismo país y empleando el mismo proceso.

En este caso nuestro país cuenta con costos de energías baratos (tanto eléctrica como térmica) por tanto la partida " Energía " contaría con un porcentaje de participación relativamente bajo. Ahora bien

nuestra mano de obra es muy costosa lo que hace que las partidas "capital", "operación y mantenimiento" cuenten con porcentajes de participación mayores, si se comparan con otros países.

6. El precio de agua pesada está afectado notablemente por el tipo de financiamiento que se otorgue para la construcción de la planta. Por ejemplo; financiamiento de débito simple (típico de Gobiernos y Agencias Gubernamentales) procuran precios bajos al agua pesada comparados con los obtenidos de aquel que financia esperando una aceptable tasa de retorno del capital arriesgado (sector financiero privado).
7. La infraestructura necesaria para el seguimiento de un programa de producción de agua pesada es, en muchos casos, similar a la requerida por plantas petroquímicas y otros tipos de plantas; como ejemplo pueden citarse las unidades de producción de amoníaco.

Esta infraestructura comprende :

- Precisión en el suministro de vapor y energía eléctrica.
- Fabricación especializada y controlada (al máximo) de las vasijas necesarias en el proceso.
- El diseño y manufactura de los equipos y accesorios en general, debe ser de calidad óptima, ya que algunos de los procesos utilizan corrientes tóxicas y corrosivas.
- Vialidad acorde con los requerimientos de transporte para ciertos equipos que puedan ser de gran tamaño.
- Personal técnico especializado en el manejo de este tipo de plantas.

De los puntos señalados se desprende que Venezuela cuenta con casi -

la totalidad de los requerimientos de Infraestructura, aunque en muchos casos de forma incipiente, pero con la probabilidad de preparación para el momento en que se tome una decisión definitiva sobre el asunto. Por tanto se recomienda hacer un estudio de factibilidad de producción de agua pesada en el país, en el que se revise la situación actual de nuestra Infraestructura en este campo y como puede mejorarse.

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

1. CANADIAN HEAVY WATER PRODUCTION REPORT  
Proceso G.S.  
AECL- 5710  
Mayo 1.977
2. FOLLETO DE KRAFTWERK UNION  
Octubre 1.979
3. FOLLETO DE SULZER  
Descripción de Plantas de agua pesada  
Proceso  $\text{NH}_3 / \text{H}_2$   
Año 1.973.
4. INDUSTRIAL ELECTROCHEMICAL PROCESSES  
A. T. Kuhn  
Año 1.971.
5. INFCE  
Report of Working Group 1  
Enero 1.980
6. INIS- mf- 4232  
INTEGRACION DE UNA INDUSTRIA DE AGUA PESADA  
A LA INDUSTRIA NACIONAL DEL  $\text{NH}_3$   
Universidad Nacional de México.  
Año 1.977.
7. HEAVY WATER  
G. Uásuru; D. Ursu; A. Miháilá; P. Szentgyorgyi  
Año 1.975.
8. NATIONAL NUCLEAR CORPORATION LIMITED REPORT  
Año 1.978

## ANEXO

### PRODUCCION DE AGUA PESADA EN VENEZUELA

#### INTRODUCCION

Como parte del seguimiento que debemos hacer de las distintas tecnologías de reactores nucleares conocidas hasta el momento, vemos la necesidad de adelantar estudios, análisis y ensayos, acerca de los métodos de obtención de agua pesada existentes, y compararlos, a la vez que realizar un muestreo del enriquecimiento en deuterio de las aguas superficiales de nuestro país, de manera de determinar aquellos que sean aplicables en Venezuela, teniendo en cuenta los grados de recuperación, concentración a la que debe ser llevada para su utilización, los volúmenes requeridos, así como también el tipo de industrias existentes en el país (petroquímicas, refinerías, fertilizantes, etc).

Este estudio además de indicarnos la tecnología más adecuada nos orientará en lo que respecta a la mejor manera de desarrollar la tecnología seleccionada, además que nos proporcionará la información necesaria para establecer el orden de magnitud de satisfacción de la demanda futura de agua pesada, en caso de que el tipo de reactores nucleares seleccionado la utilice como moderador.

#### Objeto del Estudio

El estudio deberá llevarnos a la obtención de los siguientes aspectos fundamentales.

- La demanda de agua pesada en el país: basados en los programas de expansión a mediano y largo plazo donde se contempla a la energía nuclear como complemento térmico de la generación



de electricidad, se establecerá el módulo de producción necesario para satisfacer la demanda, teniendo en cuenta que serán necesarias - 0,7 T/MW instalado, además de unas 40 Tn para suplir pérdidas en operación y/o accidente.  
(Reactor 700 MW (e))

- Establecimiento del método de producción más conveniente al país:
- Selección del emplazamiento adecuado para la instalación de las plantas de agua pesada.
- Grado de participación nacional en un programa de desarrollo de producción de agua pesada.

#### Métodos de producción de agua pesada

Todos aquellos compuestos que poseen hidrógeno, serán potenciales fuentes de obtención de agua pesada, como ya sabemos, aprovechando las diferencias existentes entre el deuterio y el hidrógeno, es que obtendremos el agua pesada, y observando los grados de recuperación de los diferentes métodos, las concentraciones a la que deben ser llevados, así como los volúmenes necesarios y las capacidades existentes en el país, es que podremos determinar cuál de ellos resultará el más conveniente a Venezuela.

Entre los diferentes métodos habrán unos que serán dependientes y otros independientes, los primeros tendrán que utilizar o ser acoplados a otro tipo de planta industrial por la necesidad de proveerse de la materia prima principal derivada de ellas.

Si observamos la forma de operación para la producción del  $D_2O$  podremos clasificarlos como siguen:

Intercambio isotópico (pre-enriquecimiento).

- ácido sulfhídrico/agua. (independiente)
- amoníaco/hidrógeno. (dependiente)
- amina/hidrógeno. (dependiente)
- hidrógeno/agua. (independiente)

Destilación (normalmente utilizado para enriquecimiento final)

- agua (independiente)
- hidrógeno (dependiente)
- amoníaco (dependiente)

Electrolisis (dependiente)

Métodos en fase de desarrollo (alrededor de 100)

- excitación por láser
- electromigración a partir del metano
- proceso de adsorción y difusión
- etc.

Países productores de agua pesada:

NORUEGA

Método electrolítico, en combinación con intercambio químico de vapor de agua/hidrógeno, produce aproximadamente 20 T/A.

E.E.U.U.

Utiliza el método intercambio químico  $H_2S/H_2O$  combinado con destilación produce aproximadamente 180 T/A (capacidad para 450 T/A).

INDIA

Utiliza los métodos, de intercambio químico -  $NH_3/H_2$  y de intercambio químico  $H_2S/H_2O$  combinado con destilación de  $H_2$  producen aproximadamente 300 T/A.

Las plantas de  $NH_3/H_2$  se encuentran acopladas a plantas de fertilizantes y productoras de amoníaco.

CANADA

Utiliza el método  $H_2S/H_2O$  con una producción aproximada de 4.800 T/A.

ARGENTINA

(En contratación planta de intercambio químico  $H_2O/NH_3$  con la compañía Sulzer - Suiza).

Formas de obtención de los principales compuestos químicos por los países productores de agua pesada.

Acido Sulfídrico  $H_2S$  (99,5 moles%)

Los países que utilizan éste método de obtención de agua pesada lo obtienen de plantas químicas o de refinerías de petróleo que lo -

producen como sub-producto, plantas químicas - de producción de rayon, celofan, etc.

Puede ser obtenido también haciendo reaccionar hidrógeno con vapores de azufre a determinadas temperaturas y en presencia de catalizadores.

### Amoniaco ( $\text{NH}_3$ )

Los países que lo han utilizado lo obtienen de plantas productoras de amoniaco o de fertilizantes, a la que se acoplará la planta productora de agua pesada.

### Hidrógeno ( $\text{H}_2$ )

Los países que utilizan el método intercambio isotópico  $\text{NH}_3/\text{H}_2$ , viendo lo antieconómico que sería la producción de hidrógeno solo para obtener el deuterio que contiene, han optado por satisfacer los requerimientos de él para producción del agua pesada, a través de plantas productoras de amoniaco para fertilizantes. Para satisfacer demandas de agua pesada de unas 400 T/A serían necesarias plantas productoras de amoniaco del orden de las 5.000 T/D.