

201 e 78



# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

## “ESTUDIOS DE OPERABILIDAD Y ANALISIS DE RIESGOS DE UNA PLANTA DE AGUA PESADA”

### T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE :  
INGENIERO QUIMICO  
P R E S E N T A :  
ALEJANDRO SALINAS ECHEVERRIA

México, D. F.



1 9 8 7

EXAMENES PROFESIONALES  
FAC. DE QUÍMICA



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.

# I N D I C E .

	pag
RESUMEN .....	4
I INTRODUCCION .....	6
II ASPECTOS GENERALES .....	20
III METODOS DE OBTENCION DEL AGUA PESADA .....	47
IV DESCRIPCION DE LA PLANTA .....	66
V ASPECTOS DE LA CONSTRUCCION DE LA PLANTA .....	87
VI EVALUACION DE LOS RIESGOS .....	95
VII CONCLUSIONES .....	125
BIBLIOGRAFIA .....	127

## R E S U M E N .

La nucleoelectricidad puede suministrar en las siguientes décadas, una porción importante de la energía eléctrica que el país necesite. Debido a que es una tecnología compleja, es importante que se adopte un programa nacionalista en el que uno de sus propósitos sea la asimilación y desarrollo de la tecnología más adecuada a los intereses nacionales. Esta opción, la representan los reactores de uranio natural y agua pesada.

Las plantas de producción de agua pesada basadas en el Proceso "GS" proporcionan en la actualidad casi la totalidad de la demanda mundial de este líquido. En México este proceso podría cubrir la necesidades de agua pesada, en caso de que el país adoptara la línea de reactores de uranio natural y agua pesada, debido a que utiliza este proceso como fuente de deuterio el agua natural. Además, el país cuenta con la capacidad suficiente para asimilar en corto tiempo esta tecnología.

La desventaja principal del Proceso "GS" está en tener que manejar grandes volúmenes de H<sub>2</sub>S, una de las sustancias que más riesgos presentan. Sin embargo, con los perfeccionamientos desarrollados en el ámbito nuclear, es posible en la actualidad manejar esos volúmenes de manera segura y confiable, como se demuestra en este trabajo, al aplicar dos de las técnicas más eficaces para identificar y cuantificar los riesgos. Estos métodos son los estudios

de operabilidad y el análisis de riesgos.

Los "Estudios de Operabilidad" son para identificar los riesgos, mediante un estudio exhaustivo de las posibilidades de desvío de las condiciones normales de operación, así como la definición de las causas de estos desvíos y las acciones correctivas correspondientes.

El análisis de riesgos cuantifica los riesgos, tanto la severidad como la probabilidad de que ocurran, para lo cual se utiliza la información obtenida de las experiencias de varias décadas en la operación de las industrias, además de auxiliarse de una técnica de "árbol de fallas" (refs. 20 y 22).

De acuerdo con la aplicación de estas técnicas se encontró que el mayor accidente para una planta de agua pesada que emplea el Proceso "GS", sería una fuga importante de H<sub>2</sub>S en estado gaseoso por una fractura en los componentes mayores de la planta. Este tipo de accidentes tiene una frecuencia de ocurrir una vez cada 84,745 años. La vida útil de una instalación como éstas es de 20 años, cuatro mil doscientos treinta y siete veces menos que el requerido para que un evento similar suceda.

Mediante este estudio se demostró que las plantas de agua pesada con base en el Proceso "GS" son lo suficientemente seguras y confiables, a pesar de los riesgos tan fuertes que representa el manejo del H<sub>2</sub>S.

## CAPITULO I

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

"Cuando la energía nuclear se haya empleado con éxito para producir electricidad, digamos, dentro de un par de decenios, la India no tendrá que recurrir al extranjero para sus expertos, sino que los hallará en el propio país".

DR. HOMI BHABHA.

#### 1.1.- ANTECEDENTES GENERALES

Este trabajo inicia con la sentencia del Dr Bhabha, arquitecto del Programa Nuclear de la India, pronunciada un año antes de la experiencia traumática de la demostración de la fuerza destructiva del átomo en Hiroshima. Tiene como propósito verificar que cuando existe verdadera intención de llevar a cabo algo, por complejo que esto sea, es posible realizarlo. La India cuenta en la actualidad con la independencia tecnológica suficiente para construir sus propios reactores nucleoelectrónicos, el combustible nuclear, el agua pesada y

los demás materiales y equipos estratégicos de estas unidades; lo que además le ha permitido desarrollar una industria de primer orden en campos que confluyen con el nuclear, como son las industrias metal-mecánica, electrónica, cibernética y otras de la misma índole.

En cambio, México se encuentra en pañales en esta materia, a pesar de haberse iniciado pocos años después de que lo hizo la India y teniendo ambas naciones el mismo nivel de desarrollo.

Esta diferencia es todavía menos explicable, si se toma en cuenta que la política energética de México ha tenido aciertos importantes, pues nadie puede negar a la luz de los acontecimientos, las ventajas que representa el hecho de que los energéticos sean exclusividad del estado.

Esta política no es reciente, nace con la Constitución de 1917, al quedar plasmado en el Artículo 27 el dominio de la Nación sobre los recursos naturales, entre los cuales se cuenta los energéticos. Sin embargo, es hasta el acto patriótico de la expropiación petrolera de manos de la empresa inglesa El Aguila, proclamada por otro nacionalista de la talla del Dr. Bhabha, el Gral. Lázaro Cárdenas, cuando empieza a concretarse esta política. Otro hecho, no tan conocido del expresidente Cárdenas, es el de haber creado la Comisión Federal de Electricidad, el cual permitió que años más tarde otro presidente, el Lic. Adolfo López Mateos nacionalizara la industria

eléctrica, mediante la expropiación de las empresas extranjeras Mexican Light & Power, de capital inglés y The American and Foreign Power, de propiedad estadounidense.

Los demás energéticos siempre han sido propiedad de la Nación, por lo que hasta la fecha, el Estado Mexicano es el único administrador de éstos. Desafortunadamente, se ha carecido durante mucho tiempo, de lineamientos generales que orienten la función de las empresas estatales creadas para tal fin y, en cambio, han abundado las medidas que han distorsionado el espíritu nacionalista definido en la Constitución.

Entre los aspectos esenciales que debieran contemplar las empresas estatales del sector energético se encuentra el establecimiento de un programa. Esta carencia, trató de subsanarse en las postrimerías de la administración del presidente José López Portillo, en que fue elaborado y publicado un Programa de Energía. Debido al efímero auge económico que se tuvo en aquellos años del "boom petrolero", era demasiado ambicioso, por lo que muy pronto fue rebasado por la realidad.

En un intento, tal vez de corrección, la administración actual elaboró un nuevo programa de energía para los años de su gestión, 1982-1988, pero con proyecciones a fin de siglo. En este plan se tomó en cuenta la opinión de varios expertos de la materia, la cual fue recogida y obtenida mediante la modalidad que adoptó el



presente régimen de convocar a consultas públicas en varias de las principales ciudades del país sobre los más importantes problemas nacionales.

El resultado, es un programa bastante racional, que si bien puede ser perfectible y ajustarse a circunstancias coyunturales del momento, representa sin lugar a dudas un magnífico punto de partida, como podrá observarse en la breve reseña que de él se presenta.

Sin embargo, es necesario aclarar que este plan no se ha llevado a la práctica, y aunque se tiene el pretexto del agravamiento de la situación económica del país, lo que realmente ha pesado es la falta de voluntad política de emprender su consecución. Uno de tantos ejemplos, es el de la desaparición de la empresa estatal Uranio Mexicano, que era la encargada de producir los combustibles nucleares con que se alimentan las plantas nucleoelectricas, la cual contaba con la infraestructura tecnológica para tal finalidad y que había costado al país varios años de esfuerzo para su consolidación.

En este programa energético se pretende instrumentar una política de ahorro y diversificación de las fuentes de energía. En un primer aspecto, espera reducir las tendencias históricas de demanda de energéticos. Por lo que toca al sector eléctrico, lo que se busca es disminuir su acelerado crecimiento de 10% anual a 7 u 8%, con el objetivo de que la capacidad eléctrica instalada pase de

20,000 MW(e) en 1984 a 53,000 MW(e) a finales de siglo. Para lograr esta meta, sería necesario incrementar la capacidad en este sexenio en otros 7,000 MW(e), que de todos modos significa una expansión importante de este sector clave de la economía, a pesar del recorte que pretende.

Con relación al aspecto de diversificación, el documento planea ir reduciendo el peso excesivo que tienen los hidrocarburos en la demanda de energía, la cual es actualmente de 93% en el consumo global y 61% en la generación de electricidad, para que en el año 2000 queden entre 73 a 78%, para el consumo global y de 42 al 47% para el destinado a la producción de electricidad. Para alcanzar esta meta, plantea darle mayor impulso a las plantas hidroeléctricas, carboeléctricas y geotérmicas y, por otro lado, la entrada en escena de plantas nucleoeeléctricas, destacando su carácter de generación masiva de electricidad, y en menor grado, de plantas que dependan de fuentes "no-convencionales", que por sus características específicas, solo podrán ser aprovechadas en cantidades relativamente pequeñas y en ciertas localidades.

En este marco de la energía para generar electricidad, para emplear la energía nuclear en el presente sexenio, se plantea la terminación de los dos reactores de uranio enriquecido en su isótopo en construcción en Laguna Verde, Veracruz, que, con una capacidad de generación de

654 MW(e) cada uno, representarán en 1988 el 4.8% de la demanda de electricidad que debe de existir si funcionan y se llevan a cabo las medidas de ahorro de energía. Las proyecciones para el año 2000 que hace el documento con respecto al campo nuclear, son de que ésta contribuya con el 10 u 11% de la producción eléctrica esperada. Esto significa que debe existir una capacidad instalada de entre 5300 a 5800 MW(e) por medios nucleares; por lo que el programa estima la iniciación de la construcción de una nueva planta de capacidad similar para finales del actual sexenio y de otras dos o tres más en los primeros años de la próxima administración. Esta antelación tan grande, se debe a que este tipo de instalaciones constituyen proyectos de larga maduración, o sea, que requieren para su construcción de 10 años en promedio.

## 1.2.- EL AGUA PESADA Y LOS REACTORES NUCLEARES

Los reactores nucleares para generación de corriente eléctrica están en su primera generación se les conoce como térmicos porque, para su funcionamiento, requieren que los neutrones que sirven para fisiónar a los átomos del isótopo de uranio 235, estén con la energía interna adecuada para llevar a cabo este fenómeno. Ahora, como los neutrones provienen de la fisión de estos átomos, se necesita de una sustancia que posea dos propiedades. La primera, que les quite, mediante colisiones, la energía

sobrante y, la segunda, que la posibilidad de ser absorbidos por ella, sea mínima, por razones de economía de los neutrones como para que la reacción en cadena se mantenga.

Esta sustancia, conocida como moderador, puede ser el agua pesada. Esta sustancia puede cumplir con estas funciones y, en el caso de los reactores que utilizan uranio natural, resulta indispensable.

Tomando como premisas la independencia y desarrollo tecnológico, sin sacrificar el costo de generación de electricidad, en este trabajo se considera que los reactores de uranio natural son la mejor opción. Esta afirmación se basa en el avance logrado por la India y el que está a punto de lograr Argentina, quienes han podido absorber en relativamente poco tiempo, los aspectos tecnológicos estratégicos de los reactores de uranio natural y agua pesada. Como contraste, se tiene la tecnología de uranio enriquecido y agua natural, que poseen solo un puñado de países del primer mundo y que no están dispuestos a cederla, ya que constituye un secreto militar debido a que con uranio enriquecido es posible construir la bomba atómica.

Además, las plantas que manufacturan los combustibles de uranio enriquecido son bastante más complejas y caras. Esta conclusión se desprende del hecho de que la mayoría de los países de primer orden no la tienen y que algunos se han visto obligados a hacer consorcios que abarcan a tres o

más naciones para construir una planta de producción de uranio enriquecido y, de esta forma, no establecer una dependencia en esta vital industria.

Otro aspecto importante desde el punto de vista tecnológico es el factor de potencia, que es una forma de medir el tiempo efectivo de operación. Los reactores de uranio natural y agua pesada tienen factores de potencia sustancialmente mayores que los de uranio enriquecido y agua natural. En promedio estos valores fluctúan en 80% para los de uranio natural y 60% para los de uranio enriquecido. Esto se debe principalmente a que las recargas de combustible a los reactores de uranio natural se efectúan sin necesidad de detener la operación, lo que no es posible en los que utilizan uranio enriquecido. Además, son más seguros y confiables y presentan un mejor aprovechamiento del uranio.

La única desventaja importante de los reactores cuyo combustible es el uranio natural, es que la inversión inicial es mayor, o sea, son 15% más caras las plantas de uranio natural que las de uranio enriquecido. Esto es compensado por ser más económica su operación, pues las recargas de combustible de uranio natural tienen un costo bastante menor que las respectivas de uranio enriquecido. Las reposiciones anuales de agua pesada son de menos del 1% del inventario que debe tener el reactor, ya que este material no se consume y, por lo tanto, no influye de manera significativa en los costos de producción.

### 1.3.- REQUERIMIENTO DE AGUA PESADA

Los reactores de uranio natural necesitan para su funcionamiento de agua pesada como moderador y como medio de transporte de calor en el sistema de enfriamiento primario, en una relación de aproximadamente 0.8 toneladas de agua pesada por cada megawatt eléctrico instalado; por lo que las plantas nucleoelectricas de dimensiones comerciales, de unos 600 MW(e), deben de llevar de alrededor de 480 toneladas de este líquido, el cual debe estar desde que se inicia el período de prueba y constituye un alto costo de la instalación debido al elevado precio de esta sustancia (15% de la instalación total). Las reposiciones, como se mencionó anteriormente, son anuales y aproximadamente de 4.8 toneladas, para compensar ligeras fugas y degradación que se producen en la operación.

Sin embargo, a pesar del alto costo de la carga inicial del agua pesada, tiene un carácter estratégico, ya que puede evitarse la generación de una dependencia tecnológica con el exterior y la salida cuantiosa de divisas, en virtud de que nuestro país tiene la capacidad suficiente para asimilar esta tecnología y para construir sus propias plantas, las cuales son similares a las instalaciones petroquímicas que PEMEX tiene en sus complejos industriales. En cambio, con la otra opción sí se crea esta dependencia, ya que es necesario recurrir a los servicios de enriquecimiento del uranio en su isótopo 235

de otros países. Esto indica que la opción de uranio natural y agua pesada estaría en el marco del Programa de Energía del actual administración, en lo referente al desarrollo de tecnologías de industrias abastecedoras de bienes de capital y de insumos.

#### 1.4.- PRINCIPALES PROCESOS INDUSTRIALES

La producción mundial de agua pesada a nivel industriales se realiza en la actualidad mediante dos procesos. El paso importante en cada uno de ellos es una reacción de intercambio isotópico específica y por la cual son conocidos. En el primero tiene como base la reacción entre el agua y el ácido sulfhídrico, en la cual se establece una distribución en equilibrio del deuterio presente en ambas sustancias reactantes, el cual varía con la temperatura. Con este proceso se lleva a cabo más del 90% de la producción mundial de agua pesada. En el otro proceso, la reacción fundamental es entre el amoníaco o uno de sus derivados y el hidrógeno, estableciéndose también un equilibrio y una dependencia de éste con respecto a la temperatura.

La reacción de intercambio isotópico constituye la primera etapa de la manufactura del agua pesada, conocida como enriquecimiento, la cual representa el 96% de los costos de producción y el 98% del capital de la inversión inicial.

El deuterio se presenta en la naturaleza en concentraciones muy pobres, entre 130 a 160 ppm. En la primera etapa se concentra hasta alcanzar del 10 al 30%, por lo tanto requiere de equipos de grandes dimensiones que puedan manejar corrientes muy grandes, y que los procesos hayan alcanzado mediante su desarrollo una alta eficiencia.

Las siguientes y últimas etapas de esta manufactura, denominada concentración, es la encargada de incrementar la concentración de entre 10 a 30% a valores que van de 99.7 a 99.9%. Esta etapa es realizada por un proceso sencillo y muy empleado en la industria química, la rectificación a presión reducida. En este caso se aprovecha la diferencia que presentan las presiones de vapor del H<sub>2</sub>O, HDO y D<sub>2</sub>O a distintas temperaturas. La selección de este proceso para cumplir con esta etapa, se debe a que las corrientes de proceso tienen un alto costo, por lo que se da preferencia a criterios de sencillez, flexibilidad y confiabilidad.

#### 1.5.- ASPECTOS DE LOS RIESGOS

De los procesos antes mencionados, el que resulta más interesante para este estudio, es el del intercambio isotópico entre el H<sub>2</sub>O y el H<sub>2</sub>S, el cual es conocido en forma abreviada como "GS" (Gilder-sulfide). La razón, es porque en el se manejan grandes inventarios de ácido sulfhídrico, que es de las sustancias industriales más



tóxicas, corrosivas, explosivas e inflamables. El diseño de las instalaciones y la selección de los materiales para la construcción de los equipos, instrumentos y accesorios revisten la más alta importancia, sobretodo por la posibilidad de fugas del H<sub>2</sub>S en estado gaseoso, que representa un riesgo mayor para la salud y la vida de los habitantes de áreas contiguas a la instalaciones, y de los técnicos y operarios que laboran en ella; así como también por los daños graves y costosos que sufrirían las propias instalaciones, en caso de ocurrir un accidente.

De ahí la importancia de tomar medidas desde el diseño de las instalaciones que hagan poco probable un accidente, y que en caso de que ocurra, éste sea de poca gravedad.

Para este tipo de procesos, en que es imposible eliminar en su totalidad el manejo de riesgos, lo que se debe hacer es minimizar la gravedad y la probabilidad de que sucedan. Una forma adecuada de hacerlo es mediante el sometimiento, desde el diseño del proceso a un estudio de identificación y evaluación de los riesgos, y obviamente, la de realizar las modificaciones que éste arroje. Entre los métodos y técnicas más confiables y completos para calificar y cauntificar los riesgos, están los que se emplearán en el presente trabajo: el de Estudio de la Operabilidad y el de Análisis de Riesgos con base a un "árbol de fallas".

## 1.6.- PRESENTACION DEL TRABAJO

El trabajo se inicia con un resumen de los principales y más importantes considerandos, resultados y conclusiones del estudio; con el propósito de que con una lectura breve se pueda tener una visión global de él.

En el primer capítulo, se dan los antecedentes que dan el marco y las motivaciones del trabajo, así como la explicación de la estructura de éste.

Dado que en estudios de seguridad de este tipo, es muy valioso el conocimiento a fondo de las sustancias y condiciones que maneja el proceso, en el capítulo segundo, se verán los aspectos generales y esenciales de las tres sustancias principales que intervienen en el proceso: El agua pesada, el ácido sulfhídrico, que ya ha sido mencionado, y el dióxido de azufre, cuyo manejo tiene un riesgo casi tan alto como el del H<sub>2</sub>S, que sin formar parte de la reacción base del proceso, sí es necesario que sea generado en forma permanente para que el proceso se lleve con buena eficiencia, y en un momento dado, como una medida clave de seguridad.

En el capítulo tercero se dará la descripción general de los más importantes procesos de obtención de agua pesada. Además, se fundamentará el porqué de la selección del proceso "GS".

En los estudios de seguridad es de sumo valor contar con un amplio conocimiento del proceso, diseño y construcción de la planta; por lo que en el capítulo cuarto se definirá la capacidad y el proceso, y se presentarán los documentos básicos esenciales del proceso. El capítulo quinto se abordarán algunos de los aspectos más sobresalientes de la construcción de los equipos y de la planta.

El capítulo sexto constituye la médula del trabajo, dado que con apoyo en los datos de los capítulos que lo preceden, presenta el estudio de riesgos del proceso "GS". Se aplican las técnicas que emplea el estudio de la operabilidad para identificar los puntos en que los riesgos estén latentes; así como la evaluación de los riesgos más importantes por medio del método de análisis de riesgos.

El séptimo y último capítulo, contendrá las recomendaciones y conclusiones a que llegue el estudio. Al final, se citarán las referencias y bibliografía correspondiente.

## CAPITULO II

### ASPECTOS GENERALES.

#### II.1.- EL AGUA PESADA.

La molécula del agua pesada está formada por dos átomos de deuterio y uno de oxígeno. El deuterio es un isótopo natural y estable del hidrógeno, que contiene en el núcleo un protón y un neutrón, o sea, un neutrón más que el hidrógeno, por lo que su átomo pesa aproximadamente el doble que el de éste. Además existe otro isótopo de este elemento, el tritio, que cuenta con otro neutrón más en el núcleo y tiene, por lo tanto, el triple de masa que el hidrógeno. A veces, el tritio ocurre en forma natural y en concentraciones muy variables y bastante bajas, debido a que no es nuclearmente estable, es decir, es radioactivo.

En cambio, el deuterio siempre está presente en las sustancias que tienen hidrógeno en sus moléculas. Se encuentra en una relación de un átomo de deuterio por cada 6,000 a 9,000 átomos de hidrógeno y, en el caso del agua común, el agua pesada ocurre en concentraciones de 130 a 160 ppm. La explicación en las variaciones de concentración, teniendo en cuenta que no decae radioactivamente y tampoco es producto de un elemento radioactivo, se debe a las ligeras diferencias en la presión de vapor a cualquier temperatura que tienen el agua

ligera, el agua semideuterada y el agua pesada ( $H_2O$ ,  $HDO$  y  $D_2O$ ), siendo siempre la menor la del agua ligera y mayor la del agua pesada. Por esta razón, en los mares que por milenios han estado sujetos a la radiación del sol y se han estado generando evaporaciones de manera permanente, es donde la concentración de  $D_2O$  es mayor, de 155 a 160 ppm. En contraste, en las aguas continentales, en las que la concentración de  $D_2O$  es función de la secuencia de las lluvias, se tienen los valores más bajos. En las zonas interiores de los continentes se encuentran los mínimos. En las áreas costeras, dado que en estas últimas descargan primero las nubes formadas por las evaporaciones del mar, los valores se acercan a las que se encuentran en el mar y alcanzan a ser de 151 ppm.

Por otro lado, el agua ordinaria y los hidrocarburos son las fuentes naturales más abundantes de deuterio, y las únicas con capacidad suficiente para soportar una producción a nivel industrial de agua pesada, siendo solo el caso del agua el que se emplea en forma directa. En el caso de los hidrocarburos, se aprovecha el hidrógeno producido en los diferentes procesos del reformado de éstos, sobre todo en el del gas natural en el proceso de manufactura del amoníaco. Los procesos de obtención del agua pesada en forma directa a partir de los hidrocarburos no son viables económicamente, por el excesivo consumo de energía.

### 11.1.1.- PROPIEDADES.

La característica más sobresaliente del agua pesada para su aprovechamiento y la causa principal por la que se produce, es la propiedad de ser el mejor moderador de los neutrones producidos en los reactores nucleares. Esta propiedad consiste en poder reducir la energía de los neutrones en forma eficiente. Además absorbe una cantidad menor de neutrones; condición que favorece la reacción de fisión del isótopo 235 del uranio, al incrementar la probabilidad de esta reacción (sección eficaz), porque permite tener mayor población de neutrones con la energía para que sea posible la fisión.

La manera de tener una medida de esta propiedad y poder evaluarla, es mediante la relación de moderación. El valor de esta relación en las sustancias que tienen esta propiedad es la siguiente: el agua pesada 1,700, el grafito 220, el berilio 150 y el agua ligera 60. Otras propiedades importantes del agua pesada se citan a continuación en la Tabla 11.1.

Tabla 11.1 Propiedades del D2O.

Peso Molecular, E. Física .....	20.03382	
" " E. Química .....	20.02836	
Densidad Relativa, a 25°C .....	1.10775	
Densidad, a 25°C .....	1.10451	g/cc
Densidad Máxima, a 11.2°C .....	1.10602	"
Punto de Fusión .....	3.81	°C
Punto de Ebullición, a 1 atm .....	101.431	"
Temperatura Crítica .....	371.5	"
Presión Crítica .....	218.6	"
Densidad Crítica .....	0.363	g/cc

Por otro lado, las moléculas de agua semideuterada (HDO) son químicamente más estables que las deuteradas (D<sub>2</sub>O). Por ejemplo, en una concentración del 50 % en mol, un poco más de la mitad de las moléculas estarán como HDO y el resto, como H<sub>2</sub>O y D<sub>2</sub>O. Lo anterior puede apreciarse en la Figura 11.1.

#### 11.1.2.- EVOLUCION DE LA PRODUCCION DEL AGUA PESADA.

El Dr. Harold Clayton Urey y sus colaboradores Brickwedde y Murphy, en el año 1931, mediante evaporaciones sucesivas de hidrógeno en forma fraccionada, lograron separar e identificar por primera vez al deuterio; lo cual les valió el premio Nobel de Química en el año de 1934. De manera paralela, en el año de 1932, el Dr. Lewis produjo en el laboratorio agua pesada de alta concentración, por medio de un método electrolítico que fue propuesto por los Drs. Urey y Washburn. Poco tiempo después, en el año de 1934, tuvo lugar la primera producción de agua pesada en forma industrial, en la empresa Norak Hidro ubicada en la ciudad de Rjukan, Noruega, en la cual se obtuvo el D<sub>2</sub>O como subproducto en la manufactura de hidrógeno mediante un proceso electrolítico; alcanzando una producción de D<sub>2</sub>O de 1.5 ton/año. Esta capacidad fue aumentada a 4.9 ton/año durante la ocupación nazi, en la segunda guerra mundial, aunque la planta fue destruída por los bombardeos llevados a cabo en 1943. Al terminar la guerra, esta planta fue reconstruída con cambios en el proceso y capacidad, la que se incrementó a 20 ton/año y con la cual sigue en operación hasta la fecha.

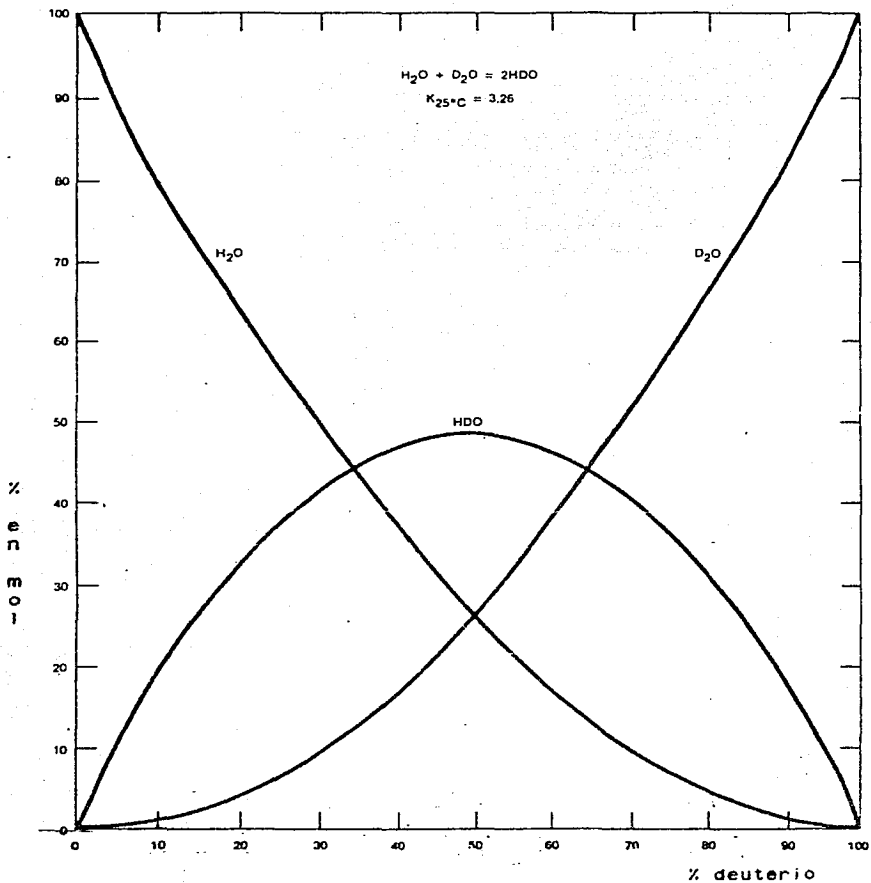


Figura 11.1 Concentraciones en el Equilibrio de H<sub>2</sub>O, HDO y D<sub>2</sub>O (a 25°C.)



Con relación al Proyecto del Distrito de Manhattan, sobre la fabricación de las primeras bombas atómicas, en los albores de la década de los cuarentas, los Estados Unidos de América impulsó vigorosamente y sin menoscabo de los costos, la investigación y desarrollo de procesos de producción de agua pesada a escala industrial. En este marco, Canadá construyó una planta en Trail, B.C., la cual aprovecha el hidrógeno electrolítico obtenido por la Compañía Consolidated Mining and Smelting, y lo combina con el proceso de intercambio isotópico entre el hidrógeno y el agua. Al mismo tiempo, en los Estados Unidos, la Cía. Du Pont construye, con el mismo objetivo, tres plantas que usan el proceso de destilación de agua, las que al terminar la guerra en 1945 son desmanteladas por incosteables para fines comerciales, salvo una de ellas que funciona de 1944 a 1956, lapso en que llega a producir 50 ton.

También con respecto al Proyecto Manhattan, en los años de 1940 a 1943 y en la Universidad de Columbia, un discípulo del Dr. H.C. Urey, el Dr. J.S. Spevack desarrolló en el laboratorio el proceso de intercambio isotópico entre el ácido sulfhídrico y el agua para concentrar agua pesada, conocido más tarde como "GS". Pero como estuvo listo hasta fines de la guerra, al acabar ésta no fue tomado en cuenta en varios años dado que las necesidades para fines bélicos dejaron de existir y el aprovechamiento del átomo en reactores para generación de energía eléctrica, estaba en pañales.

Es hasta el año de 1949, que los Estados Unidos vuelve a

dar impulso a los proyectos de agua pesada, pero ahora con el propósito comercial de usarlo en reactores nucleares. Por tal razón, encarga a la Compañía Hydrocarbon Research Corporation el estudio del proceso de destilación de hidrógeno y a la compañía Gilder Corporation el proceso "GS". Al año siguiente, el gobierno de los Estados Unidos le da la concesión a la empresa Du Pont de diseñar, construir y operar reactores nucleares del tipo de uranio natural y agua pesada, instalaciones de elementos y combustibles nucleares; fábricas de reprocesamiento de combustible irradiado y plantas de producción de agua pesada. Con base en lo anterior, esta empresa construyó dos grandes plantas de agua pesada que tienen como proceso el "GS"; las cuales se instalaron, la primera en Wabash River Ordnance Work, cerca de la ciudad de Dana, Indiana y la segunda en el principal complejo nuclear de Estados Unidos ubicado en Savannah River, S.C.; las cuales utilizan en la fase de enriquecimiento el proceso "GS" y en el de concentración final los procesos de destilación a presión reducida y el de electrólisis.

A. pesar de que las dos plantas son un éxito, alcanzando la primera producción en el año de 1952 y con capacidad cada una de ellas de 500 ton/año, la planta de Dana fue totalmente desmantelada en el año de 1957 y diez años más tarde fueron también parados dos terceras partes de la planta de Savannah River, quedando un tercio que sigue en operación hasta la fecha. La razón de tal viraje, es que los Estados Unidos se inclinan por lo reactores de uranio enriquecido que no requieren agua

pesada para su funcionamiento; seguramente debido a que de todos modos necesitaban uranio enriquecido para fines bélicos.

En la misma época, en otros países se desarrollan y construyen plantas pequeñas y piloto con base en dos procesos. Por el método de destilación de hidrógeno, se erigen instalaciones en la India, Alemania Federal, Francia, La Unión Soviética y Suiza y, por el método de intercambio químico entre el amoníaco y el hidrógeno, se construyen unidades solamente en la India y Francia.

La experiencia que dejó a los Estados Unidos el proceso "GS" en la década de los 50's, es aprovechada por Canadá una década después; pues adopta la línea de uranio natural y agua pesada, tomando la decisión de construir dos plantas de 400 ton/año, cada una, empleando el proceso "GS". A una de ellas, que se instaló en Port Hawkesbury, se le hicieron modificaciones en el diseño de acuerdo a los datos obtenidos durante la operación de las plantas de Dana y Savannah River, y las recomendaciones hechas por el grupo experimentado de ingeniería de procesos de la empresa Du Pont, lo que rindió magníficos resultados al mejorar en forma sustancial el balance termodinámico, mejorar los materiales de construcción de los equipos y aumentar la eficiencia de operación. Esta planta alcanzó su primera producción en el año de 1970 y su diseño constituye la base de las siguientes unidades. En cambio, la otra unidad que se construyó nunca logró operar de acuerdo con su diseño original, aunque no fue lo único que falló.

Por ello se decidió reconstruir y ajustar el diseño del proceso y otros aspectos importantes, al de la planta de Port Hawkesbury.

En virtud de que, con los reactores de uranio natural, se obtienen resultados muy satisfactorios y, aún mejores a los reactores de uranio enriquecido de otros países, Canadá decide y emprende un vasto programa de construcción de plantas nucleoelectricas de uranio natural y de plantas de producción de agua pesada, no solo pensando en el mercado interno sino también para exportar. Sin embargo, al final de la década de los 70's este programa tuvo que ser reducido drásticamente, debido a la crisis y recesión mundial, así como a programas internos de ahorro de energía, lo cual se reflejó de manera espectacular en la disminución del crecimiento de la demanda de energía en los países de primer orden, al pasar de crecimientos en este sector de entre 7 y 8% anual, a decrementos que llegaron a ser del 5% al año; por lo que varios proyectos de reactores y de plantas de agua pesada fueron pospuestos o incluso cancelados.

Por este tiempo, la India construye una planta de 100 ton/año usando el proceso "GS" y otras tres plantas más con capacidad cada una de 70 ton/año, empleando procesos que tienen como fuente de hidrógeno el proveniente del gas de síntesis de plantas de manufactura de amoníaco. Otros países que instalan plantas a nivel industrial, son Rumanía con una planta de 500 ton/año y que utiliza el proceso "GS" y Argentina con una unidad de 250 ton/año y que usa el proceso de intercambio isotópico

entre el hidrógeno y el amoníaco.

### 11.1.3.- USOS.

La producción total de agua pesada es utilizada casi en exclusiva para los reactores nucleares por sus excelentes cualidades de moderación. Sin embargo, una mínima parte es reservada para la preparación de trazadores biológicos y en la manufactura de productos farmacéuticos. En el futuro, serán requeridas cantidades muy pequeñas de deuterio para los reactores de fusión y en este caso, cumpliendo la función de combustible. Además, el deuterio y tritio presentes en las corrientes de los mantos freáticos, son aprovechados como trazadores naturales en el estudio de determinación de las cuencas hidráulicas.

### 11.2.- ACIDO SULFHIDRICO.

La molécula del ácido sulfhídrico está formada por dos átomos de hidrógeno y uno de azufre y, en condiciones normales de presión y temperatura, es un gas ligeramente más denso que el aire, incoloro, con un olor característico a huevos podridos y, desafortunadamente, una de las sustancias que más riesgos presenta su manejo.

En la Naturaleza, ocurre en grandes cantidades acompañando al petróleo y al gas natural, sobre todo a los del tipo

entre el hidrógeno y el amoníaco.

### 11.1.3.- USOS.

La producción total de agua pesada es utilizada casi en exclusiva para los reactores nucleares por sus excelentes cualidades de moderación. Sin embargo, una mínima parte es reservada para la preparación de trazadores biológicos y en la manufactura de productos farmacéuticos. En el futuro, serán requeridas cantidades muy pequeñas de deuterio para los reactores de fusión y en este caso, cumpliendo la función de combustible. Además, el deuterio y tritio presentes en las corrientes de los mantos freáticos, son aprovechados como trazadores naturales en el estudio de determinación de las cuencas hidráulicas.

### 11.2.- ACIDO SULFHIDRICO.

La molécula del ácido sulfhídrico está formada por dos átomos de hidrógeno y uno de azufre y, en condiciones normales de presión y temperatura, es un gas ligeramente más denso que el aire, incoloro, con un olor característico a huevos podridos y, desafortunadamente, una de las sustancias que más riesgos presenta su manejo.

En la Naturaleza, ocurre en grandes cantidades acompañando al petróleo y al gas natural, sobre todo a los del tipo

"amargo", en los cuales llega a tener concentraciones de hasta 5%. También aparece en los tiros y socavones de las minas, en las corrientes de agua sulfurosa y geotermal. En forma no natural, se encuentra en los derivados del petróleo, en las plantas de recuperación de azufre, en los sistemas de drenaje y alcantarillado (en virtud de ser un producto de descomposición de las proteínas animales y vegetales por la acción de las bacterias); en las industrias de rayón viscoso, hules sintéticos, azúcar, tintes y cueros; en las explosiones de pólvora negra y en la atmósfera en calidad de contaminante.

#### 11.2.1.- PROPIEDADES.

El comportamiento químico del  $H_2S$  es el de un ácido bastante corrosivo, sobre todo si está húmedo; es soluble en agua, en alcohol etílico, en solventes orgánicos y en el petróleo crudo. En solución acuosa tiene el carácter de un ácido débil y es lentamente oxidado a azufre y agua, por la acción del oxígeno disuelto. El  $H_2S$  es un agente con carácter reductor en soluciones ácidas y alcalinas; reacciona con soluciones de sales metálicas y especialmente de los pesados, formando los sulfuros metálicos correspondientes. En condiciones de temperatura y presión, reacciona catalíticamente con las ligaduras etilénicas para dar los mercaptanos respectivos. A temperaturas elevadas y en presencia de un catalizador, el  $H_2S$  y el acetileno condensan y forman el tiofeno. En la tabla 11.2 se muestran algunas propiedades del  $H_2S$ .

Tabla 11.2 Propiedades del H2S.

---

Peso Molecular .....	34.08
Presión de Vapor .....	18.4 atm man
Punto de Ebullición .....	-60.3°C
Punto de Fusión a 1 atm .....	-85.5°C
Densidad Relativa, a 15°C y 1 atm .....	1.1895
Densidad, a 0°C y 1 atm .....	1.5392 g/lit
Volumen Específico, a 21°C y 1 atm .....	701 ml/g
Temperatura Crítica .....	100.4°C
Presión Crítica .....	94 atm abs
Densidad Crítica .....	0.349 g/ml
Viscosidad, a 0°C y 1 atm .....	0.01166 cp
Temperatura de Autoignición .....	260°C
Intervalo de Explosión el Aire .....	4.3 a 45% vol
Calor Latente de Vaporización .....	4.463 kcal/mol
Calor Latente de Fusión .....	568 cal/mol
Calor Específico, a 25°C y 1 atm:	
cp .....	0.24 cal/g°C
cv .....	0.18 cal/g°C
Conductividad Térmica a 0°C .....	0.0000305
	cm-cal/seg-cm2

---

### 11.2.2.- RIESGOS.

**TOXICOLOGIA.**- El principal riesgo que presenta el manejo del H2S es la inhalación de sus vapores, que aún a bajas concentraciones y breves exposiciones, produce un cuadro de intoxicación, el cual puede causar la pérdida del conocimiento, el paro del aparato respiratorio e incluso la muerte. Por el olor tan pestilente que tiene a huevos podridos, es fácilmente detectable por medio del sentido del olfato desde concentraciones menores a 1 ppm, pero la acción de este gas a concentraciones pequeñas, en lapsos de 2 a 15 minutos bloquean o matan este sentido; por lo tanto, EL OLFATO NO ES UN MEDIO RECOMENDABLE Y CONFIABLE PARA NOTAR LA PRESENCIA DEL H2S.



El H<sub>2</sub>S posee la doble propiedad de ser irritante y asfixiante. La irritación es debida a que este ácido se combina con el álcali existente en la humedad de los tejidos superficiales y del aparato respiratorio, dando lugar al sulfuro de sodio que tiene carácter cáustico. La primera irritación suele ocurrir en los tejidos de la mucosa de los ojos a concentraciones de 20 a 150 ppm. Cuando aumenta la concentración, afecta la zona superior del sistema respiratorio, llegando a ocasionar edema pulmonar a exposiciones prolongadas. De acuerdo a varios estudios, no hay evidencia de la acumulación de esta sustancia y el cuerpo humano tiende a eliminarla por el intestino, la orina y el aire expirado; sin embargo, no se han hecho estudios para determinar si hay cambios patológicos por exposiciones largas.

Cuando las concentraciones son mayores, los daños se extienden al sistema nervioso. Las exposiciones de 500 ppm durante 30 minutos generan dolores de cabeza, vértigos, mareos, náuseas, diarrea, eructaciones y aliento fétido. A veces estos síntomas son seguidos de rinitis, bronquitis, bronconeumonía. Con pequeñas cantidades se produce un estado de depresión, que cambia en forma radical a un estado de excitación cuando es algo mayor la cantidad, que al alcanzar cierto valor provoca la paralización del centro respiratorio. Las exposiciones en el intervalo de 800 a 1000 ppm durante 30 minutos son fatales, y por encima de estas concentraciones la muerte se puede dar de manera instantánea.

Las exposiciones repetidas a bajas concentraciones han llegado a producir conjuntivitis, fotofobia, daños a la córnea, lagrimeo, dolor de los ojos y visión borrosa. En los casos de envenenamiento crónico por este ácido, los síntomas que se producen son dolor de cabeza, inflamación de los párpados, desórdenes en los ojos, disturbios digestivos, pérdida de peso, debilidad general, bronquitis crónica y la aparición de una línea grisácea en la dentadura. En la intoxicación aguda, los síntomas que predominan son las lesiones en los ojos y la reducción de la agudeza visual (este último síndrome es conocido popularmente entre los trabajadores de los alcantarillados y de la industria de la azúcar como "mal de los ojos").

Por otra parte, el H<sub>2</sub>S es de los gases peligrosos que más atención han recibido por organismos internacionales relacionados con la higiene y seguridad industrial; sobre todo con la de los procesos del petróleo y sus derivados; los cuales han reportado estos estudios y las normas que éstos han arrojado y que casi todos los países siguen. De manera condensada, en las siguientes tablas, se presentan estas recomendaciones y la parte central de un estudio experimental muy ilustrativo de la toxicidad del H<sub>2</sub>S. En este último, los datos de concentraciones mortales, se obtuvieron de experimentos con perros, los que tienen susceptibilidad muy similar a la de los humanos (Tablas 11.3 a 5).

Tabla II.3 Toxicidad de Varios Gases. (a)

S U S T A N C I A	Densidad Relativa (aire=1)	Límite (b) Permitido (ppm)	Exposición Mortal (c) (ppm/hr)	Conc. Mortal (d). (ppm)
Acido Cianhídrico	0.94	10	150	300
Acido Sulhídrico	1.18	10 (e) 20 (f)	250	600
Dióxido de Azufre	2.21	5		1000
Cloro	2.45	1	4	1000
CO	0.97	50	400	1000
CO2	1.52	5000	50000	100000
Metano	0.55	90000		

(a) Tabla de la American Petroleum Institute, API-49 "Recommended Practices for Safe Drilling of Wells Containing Hydrogen Sulfide".

(b) Límite Permitido (TLV). Es la máxima concentración permitida a los trabajadores en su jornada de labor.

(c) Exposición Mortal. Exposición que puede causar la muerte.

(d) Concentración Mortal. Concentración que puede causar la muerte en breve tiempo de exposición.

(e) TLV de acuerdo con Norma de la American Conference of Governmental Industrial Hygienist (1972).

(f) TLV de acuerdo con la A.N.S.I. (1966) y de la O.S.H.A. (1972).

Tabla II.4 Los Efectos Físicos. (g)

CONCENTRACIONES	E F E C T O S .
0.13 ppm	Apenas perceptible al olfato.
4.60 ppm	Detectable fácilmente, olor moderado.
10 ppm	Empieza la irritación en los ojos.
27 ppm	Fuerte olor desagradable, pero tolerable.
100 ppm	Produce tos, irritación de ojos y después de dos a 15 minutos, pérdida del sentido del olfato.
200 a 300 ppm	Produce conjuntivitis e irritación del aparato respiratorio después de una hora de exposición.
500 a 700 ppm	Pérdida del conocimiento y posiblemente la muerte en lapsos de 30 minutos a una hora.
700 a 1000 ppm	Rápida pérdida del conocimiento y paro de la respiración y la muerte.
1000 a 2000 ppm	En pocos minutos, al mismo tiempo causa pérdida del conocimiento, paro de la respiración y la muerte.

(g) A.N.S.I. Z37.2-1972 "Acceptable Concentrations of Hydrogen Sulfide".

A.N.S.I. son las siglas de American National Standards Institute.

O.S.H.A. son las siglas de Occupational Safety and Health Act.

Tabla II.5 Acción Fisiológica del H<sub>2</sub>S. (h)

CONCENTRACION		E F E C T O S .
10 ppm		La exposición máxima permitida para exposiciones prolongadas.
70 a 150 ppm		Síntomas ligeros después de una exposición de varias horas.
400 a 500 ppm		Peligrosas las exposiciones mayores de treinta minutos a una hora.
600 a 800 ppm		Fatales las exposiciones de 30 minutos o menos.

**METABOLISMO Y PATOLOGIA.** - El ácido sulfhídrico tiene una acción tóxica general, inhibe las enzimas esenciales para la respiración óxido citocromo, por el enlace con el fierro, y los procesos de óxido reducción también son bloqueados (la inhibición de estas enzimas puede ser fatal). Esta sustancia tiene, además, una acción de irritación local en las membranas mucosas, pues en contacto con el álcali presente en la humedad, forma los sulfuros correspondientes; lo que puede resultar en una afección del pulmón ya que esta combinación con los álcalis se realiza en el tejido pulmonar. Los reportes de las investigaciones experimentales indican que los sulfuros formados, a veces logran entrar al sistema sanguíneo, produciendo efectos respiratorios como la taquipnea (respiración acelerada), bradipnea (respiración lenta) y la hipertensión;

todo lo anterior debido a su acción en los vasos sensitivos y en las zonas reflexogénicas de los nervios carótido y de Henring.

El examen post-mortem de víctimas de envenenamiento hiperagudo, en ocasiones revela edema pulmonar y congestión de varios órganos. Una de las características que se presentan en las autopsias, es el olor a ácido sulfhídrico que se desprende del cuerpo disectado. Otras evidencias son las hemorragias de la mucosa gástrica, el color grisáceo de las regiones superiores del intestino y frecuentemente del cerebro (Tabla II.6).

Tabla 11.6 Toxicidad del Acido Sulfhídrico (h)

CONCENTRACION		2 a 5 min.	15 a 30 min.	30 a 60 min.
		ppm H <sub>2</sub> S		
50-100				Irritación de ojos y del sistema respiratorio.
100-150	Acceso de tos, irritación de ojos, pérdida sentido de olfato		Respiración alterada, dolor de los ojos e insomnio.	Irritación de la garganta.
150-200	Pérdida del sentido de olfato		Irritación de la garganta y de los ojos.	Irritación de garganta y de los ojos.
250-350	Irritación de los ojos.		Dolorosa secreción de lagrimeo y cansancio.	algo de temor, catarro, dolor ojos y difícil respiración.
350-450	Irritación de ojos, pérdida del sentido del olfato.		Dificultad al respirar, con accesos de tos irritación de ojos.	Incremento de la irritación de del sistema nasal, dolor fuerte de cabeza, cansancio y algo de temor.
500-600	Irritación de ojos, disturbios respiratorios y colapso.		Irritación grave de ojos, palpitaciones del corazón y algunas muertes.	severo dolor de ojos y cabeza, vértigos, temblor en extremidades, fuerte debilidad y muerte.
600-1500	colapso, pérdida del conocimiento y muerte.			

(h) Archibald, Ralph G., "Process sour gas safety", Hydrocarbon Processing, March 1977.

**ACCIDENTE NOTABLE.**- Lamentablemente uno de los accidentes más graves que se ha tenido con el H<sub>2</sub>S, ocurrió en México. Los sucesos tuvieron lugar la madrugada del 24 de noviembre de 1950, en la Cd. Petrolera de Poza Rica, Veracruz; causando la muerte de 22 personas y lesiones serias a más de 200. El evento se originó al apagarse un mechero de uno de los quemadores de gas próximos a esta población y coincidiendo este hecho con la presentación de una inversión térmica, por lo que el ácido sulfhídrico fugado quedó atrapado en el valle que da cabida a esta población.

**INCENDIO Y EXPLOSION.**- El ácido sulfhídrico es un gas inflamable que da una luz azul y mediante esta combustión se produce el dióxido de azufre. Las mezclas de H<sub>2</sub>S y el aire en el intervalo de 4.3 a 46%, explotan de manera violenta. Expuesto al calor se descompone en sus elementos, hidrógeno y azufre, los que son humos tóxicos que en presencia de agentes oxidantes como el ácido nítrico, el trifloruro de cloro y otros, reacciona violentamente y se inflama en forma espontánea. Los agentes de extinción recomendados son el dióxido de carbono, polvos químicos secos y sistemas de agua contra incendios.

**CORROSION Y FRAGILIZACION.**- Los procesos que tienen que manejar ácido sulfhídrico húmedo o en solución, como el caso que nos ocupa, los fenómenos de corrosión y fragilización de los materiales de construcción de los diferentes componentes, representan uno de los problemas mayores



que hay que enfrentar en el diseño, construcción y operación de las plantas.

La experiencia ganada en operación de 34 años en la planta de Savannah River y de 16 años de las plantas de agua pesada en Canadá, permiten minimizar estos riesgos mediante la adecuada selección de los materiales y procedimientos de construcción de dichos componentes.

La corrosión del H<sub>2</sub>S en las placas de acero al carbón, grado fino y especificación ASTM A-516 Grado LI-70 es en toda la superficie expuesta del metal y con una velocidad de penetración de 0.1 pulgadas/año, formando una capa pelicular de sulfuro de hierro, que si no es removida, protege a la placa al disminuir paulatínamente la velocidad de la corrosión, llegando a ser este valor, después de 2,000 horas de exposición, de 0.0001 pulgadas/año. El criterio aplicado con éxito en el diseño de los componentes mayores de la planta de agua pesada, es que la velocidad de los flujos sea menor a 2.3 m/segundo y que no sea turbulento, las cuales son condiciones que evitan el desprendimiento de las capas de sulfuro formadas y permiten el empleo de este material en algunos equipos de estas plantas.

Otro problema que se presenta, es que el sulfuro de hierro es disuelto ligeramente por las corrientes acuosas de menor temperatura del proceso, el cual se deposita en los equipos de intercambio de calor y en los platos del equipo de intercambio isotópico que están a más alta temperatura, dado que el FeS es menos soluble a temperaturas más elevadas; provocando por lo

tanto que la eficiencia de estos equipos baje.

Otra situación difícil que crea la reacción de corrosión, es el hidrógeno atómico que se forma, el cual se difunde en el metal por diminutas cavidades que tiene y al reaccionar con el carbón que contiene, da lugar al fenómeno de fragilización del material (ampollas de hidrógeno o "hydrogen blistering").

Los aceros inoxidable y aleaciones de níquel son los materiales que mejor comportamiento presentan en servicios de H<sub>2</sub>S y en las condiciones en que opera el proceso "GS", teniendo lugar solo corrosiones ocasionales y de manera localizadas, de los tipos de corrosión por esfuerzo de fisura ("stress corrosion cracking") intergranular y transgranular y la corrosión de picadura ("pitting corrosion").

La corrosión por esfuerzo de fisura intergranular ocurre en aceros inoxidable sensibilizados y en aleaciones de níquel, cuando son expuestos a ácidos oxisulfuros como el ácido sulfuroso, formado por las interacciones entre sulfuros, humedad y oxígeno. Los aceros inoxidable pueden ser sensibilizados durante los procesos de soldado y del tratamiento térmico, condición caracterizada por la precipitación de carburo de cromo a lo largo de los límites del grano, y el empobrecimiento de cromo adyacente a los límites del grano; por lo tanto, los aceros inoxidable de bajo contenido de carbón o los que contienen carbón estabilizado, son mas resistentes a la sensibilización porque minimizan la formación de carburo de

cromo intergranular.

La corrosión por esfuerzo de fisura transgranular en servicio de H<sub>2</sub>S es favorecido en presencia de cloruros y oxígeno, aún a temperaturas y presiones ambientales. Además, pruebas realizadas han demostrado que el acero inoxidable 316 trabajado en frío es altamente susceptible a este tipo de corrosión. La manera de evitar este fenómeno, es recociendo los aceros inoxidables de la serie de los austeníticos y evitando el ingreso de aire.

En cuanto a las aleaciones de níquel, hay dos de ellas que son inmunes a ambas clases de corrosión por esfuerzo de fisura. Estas aleaciones son el Inconel 625 y el Hastelloy C-276.

La corrosión de aceros inoxidables del tipo picadura, es más severa en presencia de cloruros y oxígeno, pero disminuye enormemente en ausencia de oxígeno. Nuevamente las aleaciones de níquel Inconel 625 y Hastelloy C-276, han demostrado excelente resistencia a este tipo de corrosión; por lo que son seleccionadas para aplicaciones críticas como en fuelles y diafragmas.

Por otro lado, los aceros de todas las clases con dureza sobre la Rockwell C22 han demostrado ser susceptibles a la corrosión por esfuerzo de fisura, debido a la difusión del hidrógeno atómico en el interior de la estructura cristalina.

### 11.2.3. - USOS.

Además de requerirse en las plantas de producción de agua pesada, en las que el inventario de esta sustancia es de alrededor de 600 toneladas en unidades de una capacidad de 400 toneladas al año de agua pesada, este gas es usado en la producción de varios sulfuros inorgánicos, del ácido sulfúrico y de compuestos orgánicos de azufre como el tiofeno y los mercaptanos. Es ampliamente utilizado en los laboratorios de análisis químico para efectuar separaciones de metales, remoción de impurezas metálicas y preparación de sulfuros metálicos. En la agricultura es usado como un desinfectante.

### 11.3. - DIOXIDO DE AZUFRE.

La molécula del dióxido de azufre está formada por dos átomos de oxígeno y uno de azufre y, en condiciones normales de temperatura y presión, es 2.22 veces más denso que el aire. Es incoloro, no inflamable y tiene un olor picante, debido a que forma con la humedad de las fosas nasales ácido sulfuroso, que lentamente pasa a ácido sulfúrico.

El dióxido de azufre es obtenido de la combustión del ácido sulfhídrico y del azufre, en el tostado de minerales de sulfuros y en la calcinación de sulfatos naturales. Ocurre en la producción de las industrias petrolera y petroquímica, de pulpa de papel, de almidón, de sulfitos y tiosulfatos. Es

producto intermedio en la elaboración del ácido sulfúrico. Es utilizado como agente blanqueador del azúcar, fibras, cueros, colas y licores de azúcar. También es usado para la síntesis orgánica del disulfuro de carbón, tiofeno y sulfanatos. Es aprovechado para preservar materia orgánica en la industria del vino. En combinación con el amoníaco y la humedad atmosférica sirve para proteger cosechas de las heladas nocturnas. Además, tiene usos de fumigante, insecticida y fungicida. También es uno de los contaminantes comunes de la atmósfera y un serio desfoliador.

### 11.3.1.- PROPIEDADES.

Las propiedades más importantes del dióxido de azufre se presentan en forma condensada en la Tabla 11.7.

Tabla 11.7 Propiedades del Dióxido de Azufre.

Peso molecular .....	64.06
Olor .....	Picante
Color .....	Incoloro
Densidad relativa .....	2.22
Densidad, a 0°C y 1 atm .....	2.93 g/lit
Punto de fusión .....	-75.7°C
Punto de ebullición, a 1 atm .....	-10.0°C
Presión de vapor, a 21.1°C .....	3.34 atm

### 11.3.2.- RIESGOS.

**TOXICOLOGIA.-** El dióxido de azufre es de una toxicidad similar a la del ácido sulfhídrico, constituyendo este riesgo el mayor problema que se presenta en los procesos que lo manejan. Este gas también tiene la doble función de ser irritante y sofocante. Por el sabor es posible detectarlo desde concentraciones de 0.3 ppm y por el sentido del olfato de 3 ppm en adelante. El máximo tiempo permitido para las concentraciones de 50 a 100 ppm es de 30 a 60 minutos. Cuando las concentraciones alcanzan a ser de 400 a 500 ppm la vida empieza a correr riesgo. En la Tabla 11.3 antes mencionada, se dan en forma condensada los valores de las concentraciones que recomiendan los organismos internacionales en la materia.

La irritación se presenta a partir de 6 a 12 ppm en la nariz y garganta y cuando llega a 20 ppm alcanza a los ojos. La piel resiste esta acción hasta concentraciones de 10,000 ppm. Una de las características de este fenómeno, es que cuando la exposición no tiene consecuencias fatales, no deja daños permanentes.

**METABOLISMO Y PATOLOGIA.-** La acción irritante del SO<sub>2</sub> se debe a que al contacto con la humedad de la mucosa forma ácido sulfuroso y en menor medida ácido sulfúrico. La vía de entrada al cuerpo humano es el sistema respiratorio o el sistema gastrointestinal por medio de la saliva en que es disuelto. Debido a que es bastante soluble, en poco tiempo es distribuido en todo

el cuerpo causando fuerte acidez en el metabolismo, al reducir la reserva de álcali de la sangre y al eliminar cantidades compensatorias de amoníaco por medio de la orina y el álcali por la saliva. La acción tóxica general es detectada por medio de los desórdenes del metabolismo de las proteínas y carbohidratos, deficiencias de vitaminas B y C e inhibición de la oxidación. En cantidades afecta la hemoglobina. El ácido sulfúrico producido en pequeñas cantidades es metabolizado a sulfatos en la sangre , y en esta forma, se elimina por la orina.

Los envenenamientos agudos son el resultado de la inhalación de cantidades grandes de este gas, caracterizando por irritación intensa de los ojos y de la mucosa de la parte superior del sistema respiratorio. La muerte puede sobrevenir por efectos de sofocación debida al espasmo reflectivo de la faringe, a la súbita detención de la circulación de los pulmones o de un "shock".

## CAPITULO III

### METODOS DE OBTENCION DEL AGUA PESADA.

#### III.1.- COMPARACION DE LOS PROCESOS.

Los procesos mediante los cuales es posible obtener agua pesada y que han sido corroborados a nivel de laboratorio y/o planta piloto, suman en la actualidad varios cientos, por lo que resultaría demasiado laborioso y oficioso hacer una descripción por separado de cada uno de ellos.

El análisis por realizarse, tomará en cuenta solo las alternativas de procesos de la parte de enriquecimiento. La razón de la precisión anterior, es porque la fase del enriquecimiento representa en forma muy significativa los mayores costos de la inversión y de la operación, situándose ambos renglones por encima del 90% del total en cada caso. Asimismo, la primera etapa de la fase de enriquecimiento en unidades de tres etapas, representa más de las tres cuartas partes de la inversión de la planta completa.

Otro aspecto a tomar en cuenta, es que los conceptos a considerar en este capítulo se generan por las concentraciones tan diluidas de deuterio que tienen todas las fuentes potenciales, de aproximadamente 150 ppm; por lo que las relaciones de producto a alimentación son casi de cuatro órdenes de



magnitud. Esto lleva a considerar desde un principio que se trata de procesos que deben manejar alimentaciones de materia prima enormes y que se necesitan de cientos de elementos de transferencia en serie para lograr este objetivo. Estos definen desde el inicio, que los equipos de transferencia que contienen los arreglos de dichos elementos en cascada presentan importantes ventajas con respecto a los que tienen otro tipo de arreglo. Por último, los costos de capital y de operación de las instalaciones para obtener agua pesada son bastante cuantiosos. La Tabla III.1 contiene en forma resumida la información relativa a los procesos más importantes.

Tabla III.1 Posibles Procesos de D2O.

TIPO DE PROCESO	C A R A C T E R I S T I C A S .
Destilación	Dimensiones excesivas de las instalaciones, con excepción de la que procesa hidrógeno (En la fase de concentración es el que más usa)
Intercambio Isotópico	Mediante dos tipos de estos procesos se produce casi la totalidad del agua pesada.
Difusión	Los costos de la energía, de las membranas o de las barreras, son sumamente elevados.
Electrólisis	Excesivo consumo de energía.
Gravitacional	Excesivo consumo de energía.
Adsorción	El adsorbente es mucho y con selectividad baja
Biológico	El tamaño de la instalación y la cantidad de microorganismos demasiado grandes.
Cristalización	No es adecuado a nivel industrial.
Fotoquímico	Con perspectiva cuando se pueda mejorar la selectividad del proceso.

A corto plazo, solo las dos primeras opciones de la Tabla III.1 son viables a nivel industrial.

### III.2.- LOS PROCESOS DE DESTILACION.

Los procesos que tienen su fundamento en la destilación y que pueden ser utilizados en la producción del agua pesada a escala industrial, requieren contar con suficientes volúmenes para la alimentación. Los únicos procesos que cumplen con dicho requisito son cuatro; dos son los que utilizan fuentes naturales y otros corrientes que ocurren en otros procesos y que es viable desviar y regresar a dichos procesos. La Tabla III.2 indica las sustancias empleadas en la destilación, las presiones y temperaturas óptimas de operación y los factores de separación de cada uno de los procesos.

Tabla III.2 Procesos de Destilación.

SUSTANCIA	PRESION atm	TEMPERATURA °K	FACTOR DE SEPARACION
Hidrógeno	2.5	24	1.5000
Metano	1	112	1.0035
Amoniaco	1	239	1.0360
Agua	1.2	378	1.0240

A corto plazo, solo las dos primeras opciones de la Tabla III.1 son viables a nivel industrial.

### III.2.- LOS PROCESOS DE DESTILACION.

Los procesos que tienen su fundamento en la destilación y que pueden ser utilizados en la producción del agua pesada a escala industrial, requieren contar con suficientes volúmenes para la alimentación. Los únicos procesos que cumplen con dicho requisito son cuatro; dos son los que utilizan fuentes naturales y otros corrientes que ocurren en otros procesos y que es viable desviar y regresar a dichos procesos. La Tabla III.2 indica las sustancias empleadas en la destilación, las presiones y temperaturas óptimas de operación y los factores de separación de cada uno de los procesos.

Tabla III.2 Procesos de Destilación.

SUSTANCIA	PRESION atm	TEMPERATURA °K	FACTOR DE SEPARACION
Hidrógeno	2.5	24	1.5000
Metano	1	112	1.0035
Amoníaco	1	239	1.0360
Agua	1.2	378	1.0240

El factor de separación es uno de los parámetros clave en la selección de procesos que involucran separar a una sustancia de otra, pues su valor indica el grado de dificultad de efectuar la operación. Este factor se define como:

$$a = \frac{(D/H)_{enr}}{(D/H)_{emp}}$$

donde los subíndices enr y emp señalan que se trata de los flujos enriquecido y empobrecido, respectivamente, en un mecanismo de separación, pudiendo ser dos fases en equilibrio físico o dos compuestos en equilibrio químico. Por lo tanto, entre mayor sea el factor de separación más transferencia se logra en cada contacto de las corrientes y, por lo mismo, los valores de este parámetro próximos a la unidad, requieren enormes números de iteraciones, como se puede observar en la Tabla 11.2, para los casos del metano, amoníaco y agua.

Otra manera de ver la importancia de este parámetro, es la repercusión que tiene en el tamaño de las torres en que se lleva a cabo el proceso. La expresión que relaciona estos parámetros, señala que el volumen relativo de las torres es proporcional a

$$\frac{1}{TP(a-1)^2}$$

para una velocidad de gas y HETP (altura equivalente a un plato teórico) dadas, donde T es la temperatura, P es la presión, a

es el factor de separación y  $m$  es el número de átomos de hidrógeno por molécula. Claramente se puede observar que

$$(a-1)^2$$

en el denominador es la que domina de modo determinante en la expresión. De acuerdo a esta relación y a los valores de los factores de separación de la Tabla 11.2, los tamaños de las torres de los procesos de destilación de amoníaco, metano y agua resultan entre 3 y 4 órdenes de magnitud más grandes con respecto al hidrógeno; por lo cual no tienen perspectiva de competencia económica con los procesos en producción.

La afirmación anterior, en el caso del agua, es para la fase de enriquecimiento, porque en la fase de concentración la destilación de agua es el método más empleado; en virtud de que se parte de agua con concentraciones de por lo menos 10%, o sea, que las corrientes de proceso que se manejan se han reducido 1000 veces y que el costo de estas corrientes aún en proceso contienen por lo menos el 95% de los costos de producción del agua pesada; por lo que las dimensiones de las instalaciones ya no tienen tanta significación, y en cambio las pérdidas por fugas de este líquido de proceso son muy costosas.

#### III.4.- LOS PROCESOS DE INTERCAMBIO ISOTÓPICO.

Los procesos de intercambio isotópico son los que mejores características poseen y en los que se basa el grueso de la

producción mundial desde 1952, dominando la escena el proceso "GS". La Tabla III.3 muestra esta información.

Tabla III.3 Plantas de Producción de Agua Pesada.

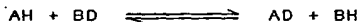
P R O C E S O	P A I S E S	P L A N T A S	
		PARADAS	OPERANDO
Inter. H <sub>2</sub> O/H <sub>2</sub>	Noruega(1) y Canadá.	1	1
Dest. H <sub>2</sub> O	U.S.A.	3	
"GS"	Canadá, U.S.A., India, China y Rumania.	1	8
Dest. H <sub>2</sub>	India, Unión Soviética, Francia, Suiza y Alemania Federal.	3	2
Inter. NH <sub>3</sub> /H <sub>2</sub>	India, Francia y Argentina.	1	4

(1) Esta planta operó hasta 1948 por el método electroiítico y desde esa fecha por el intercambio isotópico entre el agua y el hidrógeno.

De acuerdo con la tabla anterior, las únicas plantas en funcionamiento y que no implican un proceso de intercambio isotópico, son dos plantas de destilación de hidrógeno. La comparación es más contundente en la producción actual, puesto que las instalaciones con procesos de intercambio isotópico producen 3650 ton/año, por solo 14 ton/año de la planta de Kota, India y otra cantidad similar en la planta de la

Unión Soviética. Del total que se produce por métodos de intercambio isotópico, al proceso "GS" le corresponden casi 3,200 ton/año.

Los procesos de intercambio isotópico tienen como fundamento, una reacción reversible entre dos sustancias que contienen hidrógeno y que se pueden representar en forma genérica con la siguiente expresión:



donde A y B corresponden a los radicales aniónicos y H y D son átomos de hidrógeno y deuterio, respectivamente. La preferencia en el sentido del desplazamiento es función de la temperatura; por lo tanto, la composición en el equilibrio será diferente a distintas temperaturas. En la Figura III.1 se puede observar como están relacionados los factores de separación de los principales procesos de intercambio isotópico con la temperatura.

Esto permite que los procesos se lleven a cabo a una sola temperatura o a dos temperaturas diferentes y la selección que se haga de cualquiera de estas dos opciones, define de cuál de las dos sustancias es la materia prima del proceso. Otro aspecto importante, es que los procesos monotérmicos requieren de pocas unidades de transferencia con respecto a los bitérmicos; pero tienen el inconveniente de que necesitan una unidad de conversión de fase líquida a fase gaseosa que consume enormes cantidades de energía, así como que son escasos los métodos

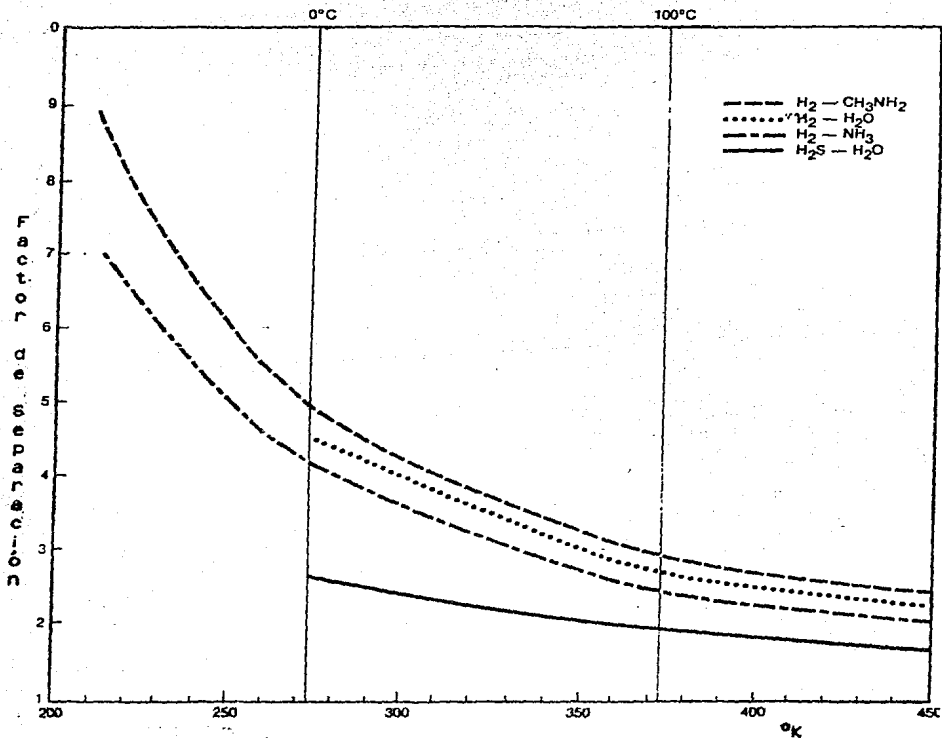


Figura III.1 Los Factores de Separación de Reacciones de Intercambio Isotópico.

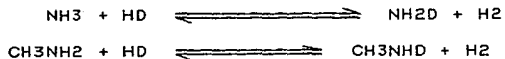


que presentan viabilidad técnica. A la fecha, solo existen dos plantas de intercambio isotópico monotérmico que operan a nivel industrial. Las que existen se basan en el método del amoníaco/hidrógeno, con una capacidad cada una de 70 ton/año y están establecidas en la India.

En cuanto a métodos monotérmicos con perspectivas, hay uno solo en etapa de desarrollo y que es el Proceso "CECE" (Combined Electrolysis Catalytic Exchange), que consiste en el intercambio isotópico entre el hidrógeno y el agua. Sin embargo, se tiene que tomar en cuenta que solo es competitivo económicamente, si está asociado a la producción de hidrógeno electrolítico y el agua pesada se obtiene como un subproducto de éste. Esto se hace con el propósito que los elevados costos de la unidad de conversión y el consumo de energía de la electrólisis, sean repartidos entre ambos productos, en virtud de ser una sección compartida por ambos procesos.

En cuanto a los procesos bitérmicos, los que mayor interés revisten son los intercambios isotópicos del ácido sulfhídrico con el agua y tres más en los que interviene en la reacción el hidrógeno y otra sustancia hidrogenada. Estos últimos métodos son el H<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O, H<sub>2</sub>/NH<sub>3</sub> y H<sub>2</sub>/amina, los cuales tienen su fundamento en las siguientes reacciones:





En estos procesos de intercambio isotópico, incluyendo las versiones monotérmicas, el factor de separación vuelve a ser un parámetro determinante; Sin embargo, no debe ser el único que debe tomarse en cuenta, en virtud de que en los procesos en que interviene una reacción, son fundamentales la velocidad y otros aspectos asociados, que influyen en forma tajante en las dimensiones y complejidad de las unidades de transferencia o equilibrio. Esto es, el factor de separación es importante porque define el número de unidades de transferencia o equilibrio, y a su vez, la velocidad de reacción, define el tamaño de estas unidades. A continuación, en la Tabla III.4, se indican las velocidades de reacción y otros factores asociados de los principales procesos de intercambio isotópico y, en la Tabla III.5, la forma en que repercuten este parámetro y el factor de separación en el tamaño de la planta, así como en el consumo de energía.

Tabla III.4 Velocidad de Reacción de Intercambio Isotópico.

PARAMETRO	GS	AMINA	NH3/H2	H2O/H2
Presión, MPa	2	7	7	10
Temperatura, K	303 400	220 315	230 330	300 440
Catalizador		CH3NHK	NH2K	Pt/C
Cte. Velocidad, 1/seg	5000	130	15	1
Solubilidad Gas, mol/m <sup>3</sup>	830	24	10	8

Tabla III.5 Tamaño y Consumo de Energía de Plantas de D2O(1).

PROCESO	$\frac{\text{GASTO}}{\text{kmol}^2}$ mol D2O	PLATOS TEORICOS	VOLUMEN RELATIVO (2)	CONSUMO RELATIVO (2) .
"GS"	74	27	1	1.00
AMINA	24	10	0.6	0.35
NH3/H2 monotérmico	14	5	0.9	0.65
bitérmico	31	10	4	0.24
CECE (3)	9	4	0.3	0.06

- (1) Los valores de la tabla corresponden a la columna fría de la primera etapa y con un enriquecimiento de 4 veces.
- (2) Los valores relativos de las dos últimas columnas son con respecto al proceso "GS" y el factor de conversión de energía calorífica a eléctrica se tomó como 0.40.

- (3) No se toma en cuenta el consumo de energía que de todos modos se hace para obtener el hidrógeno electrolítico.

#### III.4.- BREVE DESCRIPCIÓN DE LOS MEJORES PROCESOS.

En este punto, la descripción solo abarca a los procesos "GS" y Amina/H<sub>2</sub>. El proceso "GS", se escoge porque en él recae la producción mundial de agua pesada, es factible, técnica y económicamente, utilizarlo en nuestro país, el tamaño de planta y consumo de energía por unidad de agua pesada obtenida está dentro de los marcos de competitividad y, por sí solo, sería capaz de producir toda el agua pesada que demandara el programa nucleoelectrónico más ambicioso que México estableciera.

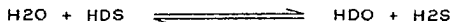
El proceso amina/H<sub>2</sub> está atado a plantas de producción de amoníaco. Su selección se basa en el dominio de la tecnología de producción de amoníaco que han desarrollado las industrias estatales encargadas de su manufactura (PEMEX e INP). Además, el proceso amina/H<sub>2</sub> tiene los mejores valores de todos los procesos en consideración, en los parámetros que tienen mayor peso en la determinación de los costos de inversión y de producción, como son el tamaño de planta y consumo de energía por unidad de agua pesada obtenida; puesto que de acuerdo con la Tabla III.5, el tamaño de ésta es 40% menor y el consumo de energía es de alrededor de un tercio al del proceso "GS". Asimismo, por contar PEMEX con varias plantas de

amoníaco con capacidades de hasta 1,500 ton NH<sub>3</sub>/día, viables para anexarles a cada una de estas plantas una unidad de 100 ton D<sub>2</sub>O/año. El proceso de amina/H<sub>2</sub> podría soportar un programa modesto de demanda de D<sub>2</sub>O para reactores de uranio natural-agua pesada.

El Proceso CECE, aparentemente con los mejores parámetros, no se toma en cuenta por no ser tan válido hacer recaer todo el peso de consumo de energía a la producción de hidrógeno electrolítico al cual está asociado, de alrededor de 500 GJ/kg D<sub>2</sub>O y casi 17 veces más que el "GS" (que es de 30 GJ/kg D<sub>2</sub>O y que equivalen a 5 barriles de petróleo).

#### III.4.1.- BREVE DESCRICION DEL PROCESO "GS".

Este proceso tiene su fundamento en la reacción química de intercambio isotópico entre el ácido sulfhídrico y el agua, a dos temperaturas distintas, dado que las constantes de equilibrio de este método varían con esta variable. La reacción es la siguiente:



La constante de equilibrio distintas, es mayor a una temperatura menor, por lo que la transferencia de deuterio es hacia el agua, o sea, se favorece los productos del lado derecho, cuando la temperatura es menor y, viciversa a temperaturas elevadas.

Esta reacción tienen lugar en enormes columnas de platos perforados (Figura III.2), en las que las sustancias fluyen a contracorriente, el agua en forma líquida desciende por gravedad y el H<sub>2</sub>S en estado gaseoso asciende, alcanzando el equilibrio en cada contacto que efectúan en cada uno de los platos. En la sección superior de la columna, la temperatura es de alrededor de 32 °C, por lo que el agua se enriquece en deuterio a costa del H<sub>2</sub>S en la medida que desciende esta parte. Al llegar a la mitad, la temperatura cambia a 130 °C y el sentido de la reacción se invierte.

El caudal de agua de proceso se alimenta por la parte superior de la columna, teniendo una concentración de aproximadamente de 150 ppm de D<sub>2</sub>O, la cual es incrementada hasta cuatro veces este valor (600 ppm), pero en la parte inferior se empobrece, saliendo de esta columna con una concentración de 120 ppm. El H<sub>2</sub>S está en circuito cerrado y solo se alimentan pequeñas reposiciones debido principalmente a una purga permanente de este gas, con objeto de mantener las impurezas que entran al sistema en un nivel bajo.

El producto de esta primera etapa se saca a la mitad de la columna, donde la concentración de D<sub>2</sub>O tanto en la corriente líquida como en la gaseosa es la más alta; por lo que pueden ser cualquiera de estas dos corrientes o las dos, las que van hacer alimentadas a una segunda etapa donde esta operación se repite. Nuevamente, el producto de esta segunda etapa constituye la alimentación de una tercera etapa de esta fase de

enriquecimiento. El producto de la tercera etapa necesariamente debe ser la corriente de agua, la cual alcanzó una concentración de entre 10 y 30% de D2O y por lo mismo el caudal es tres órdenes de magnitud menor. Esta corriente de agua pesada representa el producto de la fase de enriquecimiento, la cual será alimentada a la fase de concentración a grado nuclear, 99.5-99.9%, pero en columnas en las que el proceso que gobierna es una destilación a presión reducida.

En las columnas del Proceso "GS", la presión de operación es de 21 atm. absolutas, la cual es proporcionada y mantenida por el compresor de alimentación inicial y de reposiciones del H2S. La circulación del gas con el caudal correspondiente es por medio de un soplador que tiene cada una de estas columnas y que van antes de que el H2S se alimente en el fondo de cada columna.

El agua empobrecida que sale de cada una de las tres columnas que constituyen la primera etapa del enriquecimiento, pasa antes por un desgasificador que le quita casi la totalidad del H2S disuelto en ésta.

En la Figura III.2 se muestra el diagrama de bloques del proceso. La transferencia de deuterio entre etapas se efectúa mediante la corriente gaseosa de ácido sulfhídrico. Los caudales manejados en la primera etapa requieren que se disponga de tres columnas en paralelo. El número de platos de la columna de la tercera etapa requiere que ésta se separe en dos columnas en serie.

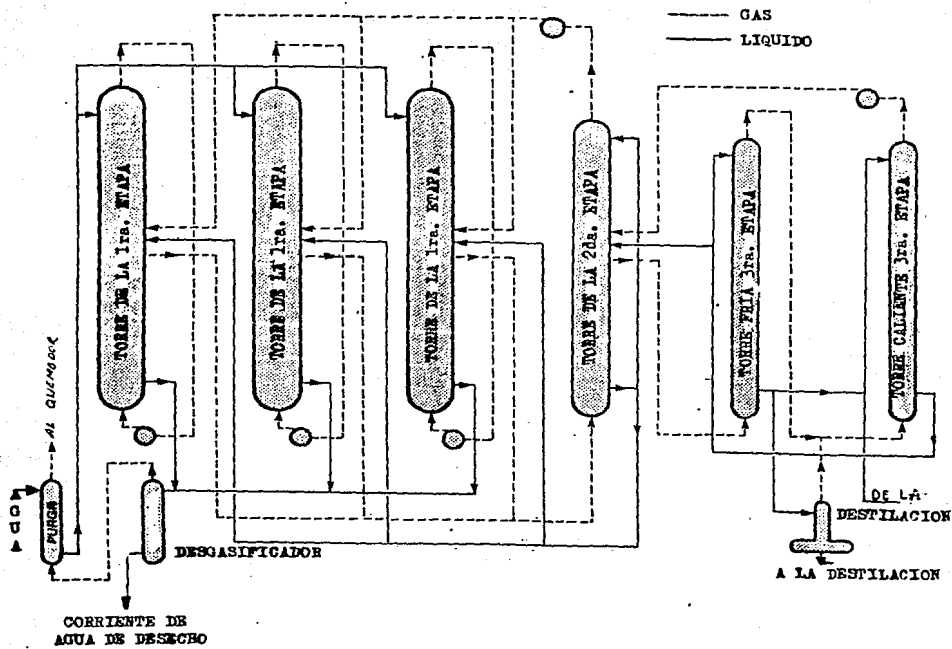
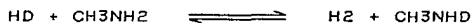


Figura III.2 Diagrama de Bloques del Proceso "GS".



#### 111.4.2.- BREVE DESCRIPCION DEL PROCESO AMINA/H<sub>2</sub>.

Este proceso tiene su fundamento en la reacción química de intercambio isotópico entre el hidrógeno y la metilamina, a dos temperaturas y la utilización de catalizador, la cual está representada por la siguiente expresión:



El H<sub>2</sub> proveniente de una planta de manufactura de amoníaco adjunta, como se podrá observar en la Figura 111.3, es alimentado en el fondo de la columna caliente, en la cual se vá enriqueciendo en deuterio a costa de CH<sub>3</sub>NH<sub>2</sub> en la medida que asciende en esta torre. Al pasar a la columna fría la transferencia de deuterio se invierte, saliendo de esta primera etapa del proceso, para retornar a la planta de amoníaco, por el tope de la torre fría y con una concentración de deuterio más pobre a como entró. El flujo de metilamina en forma líquida es a contracorriente y en circuito cerrado, descendiendo por gravedad.

La concentración del hidrógeno en la alimentación es de alderedor de 135 ppm de D<sub>2</sub>O, la cual es incrementada hasta 20 veces su valor inicial, el que presenta en medio de las dos columnas de la primera etapa. Al salir de la torre fría la concentración llega a ser menor en un 55% a la concentración inicial. La corriente de hidrógeno es alimentada a una segunda

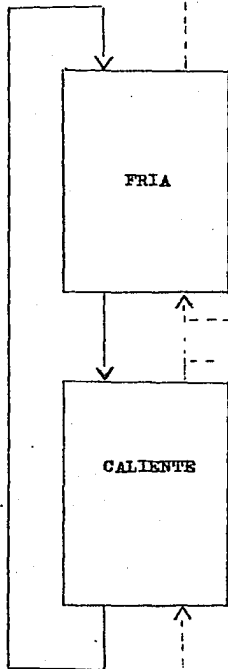
etapa en donde se repiten estas operaciones, alcanzando en ella valores de hasta 300 veces la concentración inicial y con la cual sale de la fase de enriquecimiento. Nuevamente, la destilación a presión reducida es el proceso que se utiliza para darle la concentración de grado reactor.

El catalizador usado en la reacción es el metil amida de potasio,  $\text{CH}_3\text{NHK}$ , pero a pesar de éste la velocidad es muy baja en la torre fría; por lo que se han adaptado en los platos de esta columna unos eyectores para mejorar el contacto entre la fase gaseosa y líquida.

RECIRCULACION  
A LA PLANTA  
DE NH<sub>3</sub>

H<sub>2</sub> POBRE DE D<sub>2</sub>

A  
M  
I  
N  
A  
  
L  
I  
Q  
U  
I  
D  
O



RECIRCULACION  
DE H<sub>2</sub> DE LA 2da.  
STAPA

CORRIENTE DE H<sub>2</sub> ENRIQUECIDO  
EN DEUTERIO A LA 2da. STAPA

----- GAS  
———— LIQUIDO

H<sub>2</sub> DE LA PLANTA DE NH<sub>3</sub>

Figura III.3 Diagrama de Bloques del Proceso Amina-H<sub>2</sub>.

## CAPITULO IV

### DESCRIPCION DE LA PLANTA.

#### IV.1.- EL PROCESO Y LA CAPACIDAD DE LA PLANTA.

Las enormes unidades de producción de agua pesada que posee Canadá, diseñadas para obtener de cada una 400 ton/año y que utilizan el Proceso "GS" en su fase de enriquecimiento; son las que para el estudio que nos ocupa representan mayor interés. Los inventarios de alrededor de 600 toneladas de H<sub>2</sub>S y el costo tan fuerte del producto en proceso, hacen que técnicas de manejo de riesgos como las que se usarán, sean claves en el diseño y construcción de este tipo de instalaciones.

Otro aspecto importante, es que por este proceso es posible soportar, de manera competitiva, la demanda de agua pesada que necesite un programa de plantas nucleoelectricas, por ambicioso que este sea. Además, el país cuenta con la suficiente infraestructura y desarrollo tecnológico, para en relativo poco tiempo asimilar la tecnología de este proceso.

Por lo tanto, una planta con capacidad de 400 ton/año de agua pesada y que aplique el Proceso "GS", será la base sobre la cual se efectúa el presente trabajo.

## IV.2.- BASES DE DISEÑO DEL PROCESO.

### IV.2.1.- GENERALIDADES.

#### FUNCION DEL PROCESO:

Partiendo de agua con la concentración natural de agua pesada de aproximadamente de 148 ppm, el proceso debe enriquecerla en deuterio hasta que la concentración sea entre 20 y 30% en peso, esté en estado líquido, químicamente pura y con las demás características necesarias para que sirva como alimentación a columnas de rectificación a presión reducida, las cuales se logrará concentraciones del 99.9%.

#### TIPO DE PROCESO:

El Proceso "GS" tendrá tres etapas en cascada. En la primera etapa el enriquecimiento alcanzará hasta 600 ppm de D<sub>2</sub>O, en la segunda alcanzará alrededor de 3,600 ppm y en la última entre 20 y 30% en peso. El proceso consiste en un intercambio isotópico de deuterio entre las moléculas de agua y ácido sulfhídrico, los cuales entran en contacto sucesivos al fluir a contracorriente en columnas de platos perforados, estando en la primera y segunda etapas la columna fría (32°C) encima de la columna caliente (130°C). En la tercera etapa estas columnas están separadas. Por los caudales tan grandes que se manejan en la primera etapa, ésta se compone de tres columnas en paralelo.

La corriente de agua es alimentada en la parte superior de la

columna fría y se enriquece en el isótopo deuterio a costa de la corriente de H<sub>2</sub>S, en la medida que desciende esta columna. Al entrar a la columna caliente se invierte el proceso, saliendo la corriente acuosa por el fondo de la torre caliente con una concentración de 120 ppm. La corriente de H<sub>2</sub>S está en circuito cerrado. El producto de la primera etapa, es una porción de la corriente del gas en el punto medio de las columnas fría y caliente, la cual es alimentada a la segunda etapa donde se repite esta operación, para su vez ser alimentada a la tercera y última etapa. La presión en el sistema es de 21 atm. absolutas.

#### IV.2.2.- CAPACIDAD, RENDIMIENTO Y FLEXIBILIDAD.

La capacidad nominal y de diseño es de 400 ton/año de agua pesada de grado reactor, o sea, 99.7 a 99.9% en peso, al salir de las columnas de rectificación a presión reducida. No se considera capacidad mínima. Dado que cuando arranca tarda varios días en alcanzar el régimen estacionario, la planta no se debe parar salvo situaciones de emergencia, por lo que el factor de servicio debe ser de 0.95.

Debido a las condiciones climatológicas del país, en particular a las de la temperatura de bulbo húmedo, que al medio día de los meses de verano tiene un valor alto, arriba de 25°C, las columnas frías operarán arriba de los 32°C previstos, lo que reducirá el rendimiento de operación; aparte de los disturbios que se llegan a presentar en operación, por lo que el rendimiento mínimo esperado será del 75%.

Dado que el valor de la inversión por planta se reduce 32% si en el mismo sitio se instalan cuatro unidades en vez de una, se deben hacer las previsiones para que en el sitio donde se ubique esté preparado para recibir otras tres unidades más.

#### IV.2.3.- ESPECIFICACION DE LAS ALIMENTACIONES.

##### AGUA DE PROCESO:

Caudal .....	30 m <sup>3</sup> /min.
Olor .....	Ninguno
Turbiedad .....	Clara
pH .....	6-8
Sólidos Totales .....	Menor de 10 ppm
Oxígeno disuelto .....	Menor de 1 ppm
Cloro .....	Menor de 1 ppm

##### ACIDO SULFHIDRICO:

Carga Inicial .....	600 ton/año.
Reposiciones .....	Como se necesiten.
Pureza Mínima .....	99.6% vol.
Propano .....	Menor de 810 ppm.
Oxígeno .....	Menor de 30 ppm.
Nitrógeno .....	Menor de 75 ppm.
Propileno .....	Menor de 2700 ppm.
Agua .....	Menor de 35 ppm.
Sulfuro de Dimetil .....	Menor de 35 ppm.

#### IV.2.4.- ESPECIFICACION DEL PRODUCTO.

##### AGUA PESADA:

Caudal .....	45 kg/hora.
Olor .....	Ninguno.
Turbiedad .....	Clara.
Pureza .....	Mayor a 99.75% peso
Conductividad .....	Menor de $1 \times 10^{-4}$ mho/cm <sup>3</sup> a 20 °C
Sólidos Totales .....	Menor de 10 ppm.
Cobre .....	Menor de 0.01 ppm.
Boro .....	Ni trazas.
Cadmio .....	Ni Trazas.
Litio .....	Ni Trazas.
KMnO <sub>4</sub> (Consumo Máximo) .....	$1 \times 10^{-5}$ lb/lb D <sub>2</sub> O
Amoníaco .....	Menor de 1 ppm.
Cloro .....	Menor de 1 ppm.
Nitratos .....	Menor de 5 ppm.
Nitritos .....	Menor de 0.2 ppm.

#### IV.3.- DESCRIPCION DEL PROCESO Y DE LA PLANTA.

##### IV.3.1.- PROCESO DE ENRIQUECIMIENTO.

La operación de enriquecimiento es efectuada por el Proceso "GS", el cual comprende 3 etapas en cascada. En la primera etapa el enriquecimiento es de 4 veces el valor inicial de la concentración de D<sub>2</sub>O, en la segunda es incrementada 6 veces



más y en la tercera 80.

La primera etapa consiste de 3 torres colocadas en paralelo (TQ-101/103), como se puede observar en la Figura IV.1, que representa un diagrama simplificado del flujo de proceso de toda la planta. Cada una de estas torres está compuesta de cuatro secciones: la sección de transferencia de masa fría, la sección de transferencia de masa caliente, la sección de deshumidificación y la sección de humidificación, como se puede observar en la Figura IV.2, que representa un diagrama al detalle del diagrama de flujo del proceso de una de las torres de la primera etapa. La segunda etapa (TQ-104) es una sola torre similar, pero sin tener la sección de humidificación. En la tercera etapa (TQ-105/106) del proceso de enriquecimiento las secciones de transferencia de masa fría y caliente están en torres separadas, debido a limitaciones técnicas de la relación de diámetro a altura. Esta tercera etapa tampoco tiene sección de humidificación.

El líquido es alimentado en el tope de la sección fría de las torres de la primera etapa, por medio de las bombas centrífugas (B-101/103). El agua entonces desciende através de la torre, pasando sobre un número grande de platos del tipo de perforaciones arreglados en serie (65 para cada sección de transferencia de masa y 15 para la deshumidificación y 15 para la humidificación). Todos los platos promueven contacto eficiente entre el agua y el gas  $H_2S$  que fluye a contracorriente e impulsado por un soplador centrífugo por torre (V-101/103).

El deuterio es intercambiado entre el H<sub>2</sub>S y el agua en las secciones de transferencia de masa, debido a las diferentes constantes de equilibrio a las dos temperaturas de operación, 32°C para la fría y 130°C para la caliente. La concentración mayor de deuterio se presenta en la unión de las secciones fría y caliente.

En la sección de deshumidificación, el líquido es calentado a la temperatura de operación de la sección caliente y el gas es enfriado a la temperatura de operación de la sección fría por contacto directo de una recirculación de agua. En la sección de humidificación, el gas H<sub>2</sub>S es calentado a la temperatura de operación de la sección caliente y saturado con vapor de agua por una recirculación de agua. El calor requerido para la sección de humidificación es suministrado en parte por el calor recuperado de la sección de deshumidificación y del líquido efluente de la sección caliente de las torres de la primera etapa. La diferencia de calor es suministrada por medio de vapor.

El flujo de agua efluente de las torres de la primera etapa es evaporada instantáneamente en los recipientes de evaporación instantánea (TQ-107/109) y, de esta manera son alimentados a los desgasificadores (TQ-110/112). Estos desgasificadores deben ser diseñados para reducir la cantidad de H<sub>2</sub>S disuelto en el flujo de agua de desecho a menos de 1 ppm. El calor para la desgasificación es suministrado por vapor sobresaturado proveniente del rehervidor (E-101).

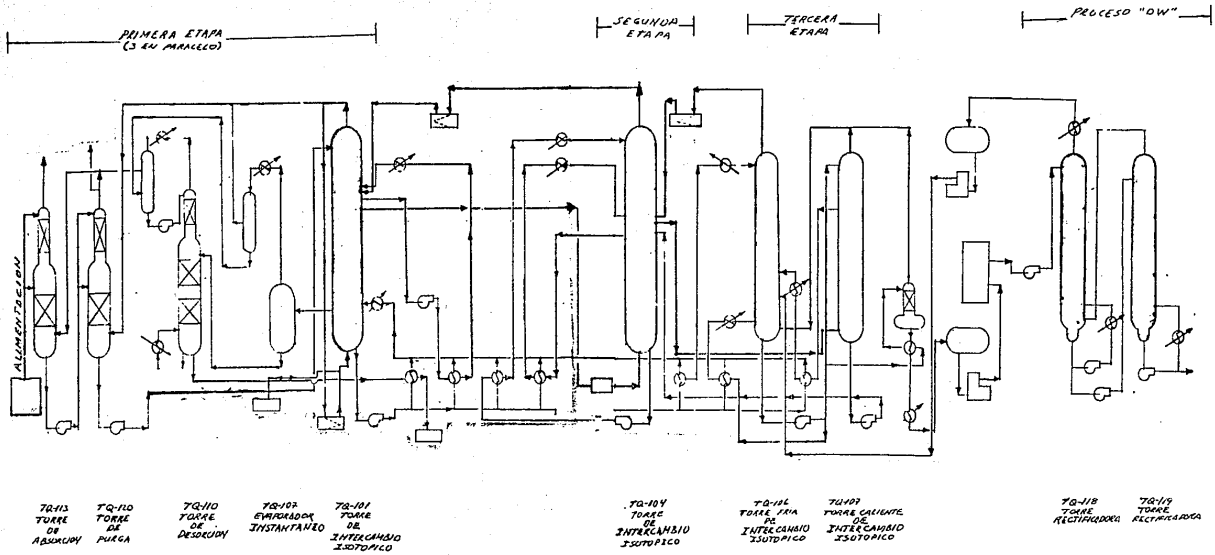


Figura IV.1 Diagrama Simplificado de una Planta de Agua Pesada.

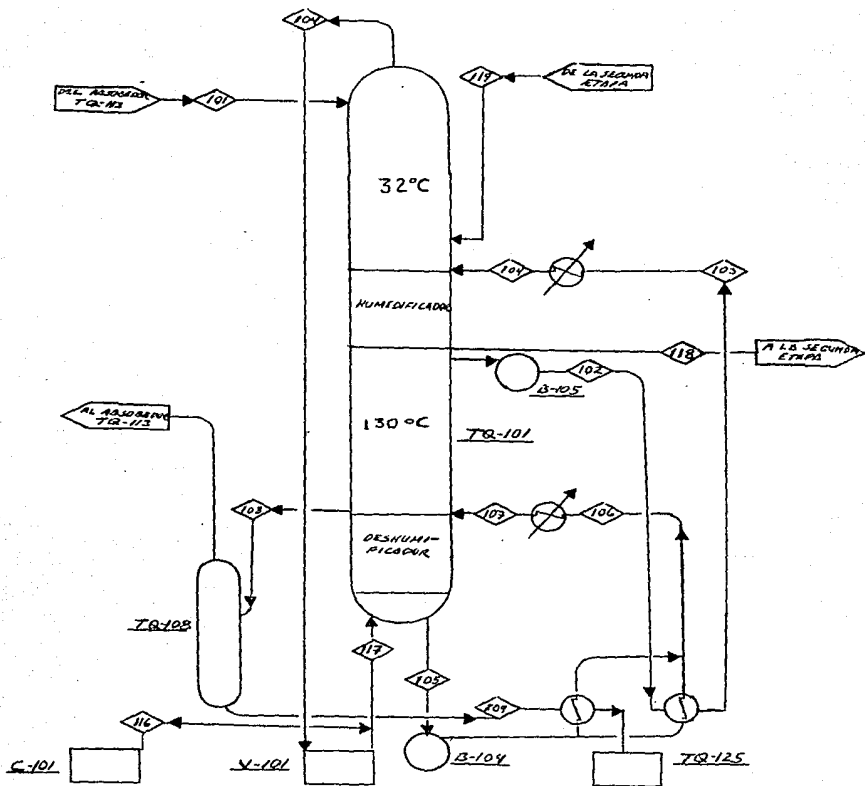


Figura IV.2 Flujo del Proceso "GS" en la Primera Etapa.

## EQUIPOS EN EL DIAGRAMA IV.2

B-104	Bomba de la recirculación del agua para calentar y humedecer el H2S.
B-105	Bomba de la recirculación del agua para enfriar y deshumedecer el H2S.
V-101	Soplador de la alimentación del H2S a una de las torres de la primera etapa.
C-101	Compresor de la alimentación al sistema y retorno del H2S.
TQ-101	Torre de intercambio isotópico de la primera etapa.
TQ-108	Evaporador instantáneo del H2S que satura la corriente acuosa de desecho.
TQ-125	Tanque de almacenamiento momentáneo del agua de desecho.

## CORRIENTES EN EL DIAGRAMA IV.2

LÍNEA	CORRIENTE	GASTO Kg/min	EDO. FISICO	TEMP °C
101	Agua saturada con H2S	10,000	líquido	32
102	Agua saturada con H2S	19,000	líquido	122
103	Agua con H2S disuelto	19,000	líquido	107
104	Agua con H2S disuelto	19,000	líquido	26
105	Agua con H2S disuelto	18,700	líquido	55
106	Agua con H2S disuelto	18,700	líquido	112
107	Agua saturada con H2S	18,700	líquido	204
108	Agua saturada con H2S	10,000	líquido	130
109	Agua de desecho	10,000	líquido	126
114	H2S	19,000	gas	32
116	H2S	hasta 57,000	gas	---
117	H2S	19,000	gas	32
118	H2S	4,750	gas	130
119	H2S	4,750	gas	32

El vapor de arriba es parcialmente condensado y enfriado en un intercambiador de calor y enviado al depósito del agua de desecho desgasificada. El condensado es recirculado al tope del desgasificador como reflujo y el H<sub>2</sub>S es enviado a la torres de absorción (TQ-113/115), donde este gas satura parcialmente el flujo de agua fresca de alimentación a las torres de la primera etapa. El calor de la corriente de desecho es recuperado através de un intercambio de calor con el flujo de la recirculación al humidificador y con el flujo de alimentación. La corriente líquida de desecho es entonces descargada al medio ambiente.

En el fondo de las secciones de deshumidificación, una corriente lateral de H<sub>2</sub>S humidificado, enriquecido en deuterio, es drenada y alimentada al fondo de la torre de la segunda etapa (TQ-104). El H<sub>2</sub>S húmedo asciende através de esta torre poniéndose en contacto con una corriente de agua que está en circuito cerrado y realizando las mismas operaciones que en las torres de la primera etapa. Al llegar al tope de la torre de la segunda etapa, por medio del soplador (V-104), es retornada a la parte superior de las secciones de deshumidificación de la primera etapa.

En forma similar, una parte de la corriente de H<sub>2</sub>S enriquecida en deuterio de la segunda etapa es enviada al fondo de la torre caliente de la tercera etapa (TQ-105) y, posteriormente a el fondo de la torre fría (TQ-106); através de las cuales se pone en contacto con una corriente de agua enriquecida que está en circuito cerrado. La corriente de H<sub>2</sub>S que abandona la parte

superior de la torre fría es retornada a la parte superior de la sección de deshumidificación de la torre de la segunda etapa, mediante un soplador (V-103).

La corriente acuosa entre ambas columnas de la tercera etapa tiene una concentración de 20 a 30% en mol de agua pesada. En este punto se drena una parte para ser enviada a un desgasificador (TQ-117) donde el H<sub>2</sub>S disuelto en el agua reduce su concentración a menos de 1 ppm. Al salir del desgasificador, la corriente líquida es enfriada y enviada como producto del Proceso "GS" a la sección de concentración final de la planta, del Proceso "DW".

#### IV.3.2.- PROCESO DE CONCENTRACION FINAL.

Esta operación se realiza por el Proceso "DW", el cual consiste de dos torres empacadas (TQ-118/119), en las cuales se efectúa la rectificación a presión reducida de la corriente de agua proveniente de la sección de enriquecimiento. El líquido desciende las torres y en contracorriente al vapor de agua que asciende. Los evaporadores y condensadores de cada torre mantienen la relación de reflujo del líquido y vapor en el nivel adecuado. Este proceso de destilación concentra el deuterio en el líquido en el fondo de de la torre. De manera continua, la corriente procedente de la unidad de enriquecimiento es alimentada a esta unidad de concentración final y, la corriente que se empobrece en deuterio es retornada a la unidad de

enriquecimiento. El producto con la concentración de grado reactor es extraído del fondo de la segunda columna de rectificación (TQ-119). Esta corriente final es tratada con permanganato de potasio para eliminarle cualquier impureza orgánica residual, para después enviarse a los tanques de almacenamiento del producto, de donde se transfiere a unos barriles de acero inoxidable, que es como salen de las plantas de agua pesada.

#### IV.3.3.- SISTEMAS AUXILIARES DE H<sub>2</sub>S.

El H<sub>2</sub>S es manejado en la planta utilizando los siguientes sistemas: recepción y almacenamiento, alimentación, quemado, recuperación, retorno, drenado del proceso y aislamiento y descarga de emergencia.

El sistema de recepción y almacenamiento tiene como función descargar el H<sub>2</sub>S en estado líquido de tanques cisternas de vagones de ferrocarril y almacenarlo en recipientes cilíndricos horizontales. Estos recipientes contienen aproximadamente 100 toneladas de H<sub>2</sub>S y, en operación normal, suministran las reposiciones que requiera la unidad de enriquecimiento. La capacidad de almacenamiento remanente es una reserva que permite que el inventario existente en la planta de H<sub>2</sub>S sea retornado cuando así se necesite.

El sistema de alimentación del H<sub>2</sub>S vaporiza el H<sub>2</sub>S en estado líquido de los tanques de almacenamiento y lo carga a la



unidad de enriquecimiento. El sistema de retorno del H<sub>2</sub>S toma este en forma de gas de la unidad de enriquecimiento, lo comprime y condensa el gas y lo retorna al sistema de almacenamiento.

El sistema de quemado consiste de una columna de quemado con un tiro de chimenea de gran diámetro y de una columna de tiro de chimenea de diámetro pequeño. En condiciones normales de operación, una corriente pequeña casi toda compuesta por gases inertes abandona la unidad de enriquecimiento y es descargada en la chimenea de este sistema. De manera descontínua, purgas con gastos mínimos de las operaciones de venteo y drenado también son manejadas por la columna. La chimenea grande está diseñada para suministrar una descarga segura del H<sub>2</sub>S en el evento de operación de una válvula de alivio, debido a una sobrepresión del recipiente o a operación manual de la válvula de vaciado de la torre. El H<sub>2</sub>S que sale a cualquiera de las dos columnas, es convertido a SO<sub>2</sub> por medio de una combustión en los quemadores respectivos.

El sistema de recuperación permite recobrar la mayor parte del H<sub>2</sub>S que sale de la unidad de enriquecimiento, en operación normal, que es enviado a la torre de diámetro pequeño y antes de que sea incinerado. El H<sub>2</sub>S recuperado es retornado a la unidad de enriquecimiento o retenido en los tanques de almacenamiento.

El agua del drenado del proceso y de la evaporación instantánea que contiene H<sub>2</sub>S es manejada en un sistema de drenado del proceso. El agua con H<sub>2</sub>S es coleccionado en un tanque y desgasificada a baja presión en un desgasificador calentado

con vapor. El agua de desecho y con menos de 1 ppm de H<sub>2</sub>S es enviada al sistema de efluente del proceso y el H<sub>2</sub>S de la cabeza del desgasificador es recuperado a través del sistema de recuperación de H<sub>2</sub>S.

En el evento de una emergencia, por ejemplo en una gran fuga de H<sub>2</sub>S como resultado de una falla, cada torre individualmente puede ser rápidamente aislada por el sistema de válvula de aislamiento de emergencia. Esta operación minimiza la cantidad de gas que se escapa. También el contenido de alguna torre puede ser rápidamente despresurizado a través de una válvula de vaciado, la cual envía el gas al quemador de la chimenea grande.

#### IV.3.4.- SERVICIOS AUXILIARES.

##### IV.3.4.1.- SISTEMA DE AGUA.

El suministro de agua es por medio de bombas verticales de turbina localizadas en la caseta de bombeo. El sistema de agua suministra: el agua de enfriamiento (265 m<sup>3</sup>/min), el agua de proceso (30 m<sup>3</sup>/min) y el agua potable (150 l/min). El sistema de agua de enfriamiento puede ser de un solo paso a través del sistema o utilizar un sistema de recirculación, para lo cual sería necesario tener torres de enfriamiento. Cuando es de un solo paso, el flujo de agua de enfriamiento es descargado junto al agua de desecho del proceso. La principal demanda de agua de enfriamiento es en la unidad de enriquecimiento.

---

Para obtener el agua de proceso con la calidad adecuada, el agua cruda primero se introduce a los clarificadores, donde las partículas suspendidas y algunos materiales disueltos son sedimentados. Luego de esta operación, el agua es pasada a través de filtros de arena por gravedad y es donde el nivel de turbiedad adecuado es alcanzado. Después el agua es enviada al depósito de agua clarificada, el cual tiene capacidad suficiente para prevenir períodos cortos de desajustes en los sistemas de tratamiento de agua.

El agua del depósito de agua clarificada es enviada a las torres de desabsorción que operan a presión reducida, con el objeto de eliminar los gases disueltos del agua de alimentación. La alimentación a las torres de desorción pueden ser antes aciduladas para lograr mayor eficiencia en la desgasificación. En este caso, el pH del agua que abandona esta torres debe ser ajustado.

#### IV.3.4.2.- SISTEMA DE VAPOR.

El suministro de vapor a la planta de agua pesada es de 450,000 kg/hora y de una presión de 200 psi. El vapor es distribuido principalmente a los calentadores de vapor de humidificación de la unidad de enriquecimiento y al rehervidor del desgasificador del agua de desecho. Otro uso importante del vapor, es en los rehervidores de las torres de la unidad de concentración final. El vapor condensado de la planta de agua

pesada es recolectado y retornado a la planta de generación de vapor.

Un hervidor de emergencia forma parte del sistema de vapor y provee la potencia de emergencia de los generadores de emergencia, de manera que puedan funcionar en caso de una falla del suministro normal de potencia. Este hervidor de emergencia es capaz de suministrar los requerimientos del sistema que evita la formación de hidruros y, de ser necesario, la operación del degasificador del agua de desecho del proceso, en adición a otras diversas cargas pequeñas, para las cuales el suministro de vapor debe ser mantenido.

#### IV.3.4.3.- NITROGENO.

Este gas es requerido en grandes cantidades durante el período de pruebas y arranque inicial de la planta, en vez del H<sub>2</sub>S. El sistema de suministro de nitrógeno usado en este período, está diseñado para alimentar 100,000 m<sup>3</sup>/día, con el objeto de presurizar completamente una torre de la primera etapa a 300 psi.

Además, para operación normal se tiene en forma permanente una capacidad de suministrar 700 m<sup>3</sup>/hora, para purgar el cabezal del quemador y el tiro de la chimenea en forma continua para purgar la tubería y el equipo que tiene H<sub>2</sub>S para prepararlo para mantenimiento o almacenamiento prolongado.

#### IV.3.4.4.- PROPANO.

El sistema de propano consiste de almacenamiento y de un suministro continuo a los pilotos de los quemadores. El propano puede ser descargado al sistema de almacenamiento tanto por pipas o carro tanques de ferrocarril. Los requerimientos normales de propano son de 55 kg/h. El requerimiento máximo de este gas es de 220 kg/h.

#### IV.3.4.5.- CONSUMO DE QUIMICOS.

Los requerimientos de químicos de una planta de agua pesada son para tratamiento de agua cruda, agua de alimentación, agua de enfriamiento, agua de desecho del proceso y agua de alimentación a la caldera. Cantidades estimadas en el año de estas sustancias son: H<sub>2</sub>S 200 ton, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (93% en peso) 1,400 ton, sosa cáustica (50% en peso) 900 ton, ayuda del coagulante para el clarificador 9 ton, coagulante para el clarificador 1,400 ton, cloro líquido 75 kg, agente antiespumante 14 ton, combustible 3.5 ton, aceite sellador 100 ton.

#### IV.3.5.- PRINCIPALES SISTEMAS DE SEGURIDAD.

##### IV.3.5.1.- SISTEMAS DE DETECCION Y ALARMA.

Este sistema tiene un sistema lógico de interrupción, el

cual es una protección automática de la planta y del personal de operación, en caso de operación anormal o fallas del equipo. La alarma y el sistema de interrupción también suministran información a los operadores de la planta. La planta cuenta con sistemas de monitoreo que avisan cuando la concentración del H<sub>2</sub>S en el aire y en el agua está arriba de los límites permitidos. Los datos meteorológicos también son suministrados en el cuarto de control.

#### IV.3.5.2.- SISTEMAS DE AIRE DE INSTRUMENTOS.

El sistema de aire de instrumentos suministra aire seco, sin aceite, filtrado y comprimido para los diversos instrumentos neumáticos y mecanismos de control de la planta. El aire comprimido requerido para operar las grandes válvulas de aislamiento de la unidad de enriquecimiento, es suministrado por un sistema de aire de interrupción. El sistema de aire de interrupción tienen una capacidad grande de almacenamiento que permite la operación coincidente de varias de las válvulas de aislamiento de la unidad de enriquecimiento.

#### IV.4.- CARACTERISTICAS DE LOS EQUIPOS.

Para los propósitos que tiene el presente estudio, en esta sección abordaremos solo a las torres principales de la primera etapa de la unidad de enriquecimiento; en virtud de que es el

equipo con mayores dimensiones, que maneja más cantidad de H<sub>2</sub>S, es el que tiene sistema más complejo y el que presenta mayores y más grandes riesgos. En las Tablas IV.1 y 2 se presentan las características de estos equipos.

Tabla IV.1 Características de una Torre de la Primera Etapa.

Servicio:	Torre de la 1ra. etapa del enriquecimiento de D2O.	Posición:	Vertical
Tipo de Fluído:	Líquido: H2O saturada con H2S Gas: H2S húmedo	Cudal:	10 m3/min Caudal: 19 T/min
Presión:	Operación: 21 atm abs	Diseño:	5 atm abs
Temperatura:	Mínima: 32 °C Máxima: 130 °C	Diseño:	150 °C
Dimensiones:	Longitud (tang a tang): 90 m Diámetro Int.: 8.5 m		
Tipo de Tapa:	Helicoidal sold. Tipo de Fondo: Helicoidal sold.		
Material:	Acero al Carbón Grano fino (ASTM A-516 Gr. L1-70)		
Espesor:	Cuerpo: 8.8 cm (3.5")	Tapas:	10 cm (4")
Peso:	Vacío: 2,040 ton.	LLeno:	2,200 ton
Internos:	160 Platos Tipo: Perforado	Diámetro:	8.5 m
	Espesor: 0.8 cm (5/16")	Material:	Acero Inox.316
	Boquillas	Principales	
Cant. Servicio	Ubicación	Material	Diámetro Cédula
2 H2S húmedo	En las tapas	Acero Inox. 316	1.3 m(52") 80
2 Agua Sat. H2S	En las tapas	Acero al Carbón	30 cm(12") 40
4 Agua Sat. H2S	En la carcaza	Acero al Carbón	60 cm(24") 40
Pruebas:	Hidrostática para la columna completa.		
	Radiografiadas 100% las soldaduras.		
	Ultrasonido todas las placas de A.C. y A.Inox. para la construcción de las torres.		



Tabla IV.2 Características del Desgasificador de H2O de Desecho.

Servicio:	Desgasificador del Agua de desecho	Posición:	Vertical
Tipo de Fluído:	Líquido: H2O saturada con H2S	Cuadal:	10 m3/min
	Vapor: Vapor de agua con H2S	Caudal:	0.2 T/min
Presión:	Operación: 6 atm abs	Diseño:	8 atm abs
Temperatura:	Operación: 210 °C	Diseño:	230 °C
Dimensiones:	Longitud (tang a tang): 30 m	Diámetro Int.:	2.5 m
Tipo de Tapa:	Helicoidal sold.	Tipo de Fondo:	Helicoidal sold.
Material:	Acero al Carbón Grano fino (ASTM A-516 Gr. L1-70)		
Espesor:	Cuerpo: 2.5 cm (1")	Tapas:	2.5 cm (1")
Peso:	Vacío: 30 ton.	Con Relleno:	40 ton
Internos:	Anillos	Tipo: Raschig	Diámetro: 2.5 cm
	Cédula: 10	Material:	Acero Inox. 316
	Boquillas		Principales
Cant. Servicio	Ubicación	Material	Diámetro Cédula
1 Agua con H2S	En la carcaza	Acero al Carbón	30 cm(12") 40
1 Agua	En el fondo	Acero al Carbón	30 cm(12") 40
1 Vapor con H2S	En la tapa	Acero al Carbón	20 cm(8") 40
1 Vapor	En la carcaza	Acero al Carbón	20 cm(8") 40
Pruebas:	Hidrostática para la columna completa.		
	Radiografiadas 100% las soldaduras.		
	Ultrasonido todas las placas de A.C. y A.Inox. para la construcción de las torres.		

## CAPITULO V

### ASPECTOS DE LA CONSTRUCCION DE LA PLANTA.

#### V.1.- DE LAS TORRES DE INTERCAMBIO ISOTOPICO.

En la construcción de las columnas donde tiene lugar el intercambio isotópico, se emplean gruesas placas de acero al carbón (ASTM A 516 Grado LI-70), con espesor de 8.8 cm (3.5"), de largo 675 cm (270") y de ancho 312 cm (125"); las cuales son roladas y soldadas en el sitio de la construcción de la planta. Para el caso de las torres de la primera etapa, cuatro de estas placas son soldadas para formar cada uno de los anillos que a su vez se van montando y soldando a su sucesor. Estos anillos tienen un peso de 70 toneladas y se requieren de 23 para cada una de las torres de la primera etapa.

Los aspectos claves en la fabricación de las torres son las siguientes:

- a) Empleo de puebas de ultrasonido sobre las placas de acero al carbón, con el propósito de asegurarse de la uniformidad de las mismas.
- b) Adecuada distribución de los platos para facilitar la construcción y minimizar el trabajo de campo.

- c) Técnicas de campo para la erección y la soldadura.
- d) Inspección de las soldaduras claves de campo.
- e) Relevo de esfuerzos de las torres totalmente erectas.
- f) Nivelación de los soportes de los platos y rectificación de las distorsiones ocasionadas por la operación de soldado.
- g) Instalación de los platos para rectificaciones y nivelaciones.

Por ejemplo, una de las soldaduras claves es sin duda alguna la de la tapa del fondo y el anillo más próximo; por lo que la calidad de esta soldadura es fundamental, dado el esfuerzo sobre la soldadura a la temperatura más alta en el ciclo del relevado de esfuerzos y el hecho de que la configuración de la pierna no permite el examen radiográfico de esta soldadura; por lo que es muy importante que el primer paso de soldadura en la raíz de la junta esté libre de desquebrajamientos y que sea ejecutado por soldadores de la más alta calificación. Lo anterior es posible inspeccionarlo mediante el empleo de tintas penetrantes. Después de los pasos manuales, la operación de soldado es completada por equipo de soldado automático hasta que la sección de la soldadura es aproximadamente 146 cm<sup>2</sup> (5 in<sup>2</sup>). Cuando la operación de soldado de la tapa del fondo está completa, ésta es revisada por ultrasonido.

Todas las soldaduras son inspeccionadas 100% por radiografía donde sea posible, cuando la configuración no lo permita, entonces las puebas empleadas son el ultrasonido y la partícula magnética.

El relevo de esfuerzos debido a la operación de soldado, requiere ser meticulosamente planeada y controlada. El calentamiento de las paredes del recipiente principal es realizada por flama luminosa usando combustible en quemadores diseñados especialmente. En virtud, de llevarse a cabo en el mismo campo estas operaciones, es de mucha importancia tener en cuentas los fenómenos meteorológicos que puedan suceder, pues si llega a llover por ejemplo, el control de la temperatura en el relevo de esfuerzos se vuelve muy difícil. En las boquillas, el relevo de esfuerzos de las soldaduras es por medio de mantas de calentamiento eléctrica que son enrolladas alderedor de éstas. Para el control adecuado de la temperatura, en la operación de relevo de esfuerzos se llegan a colocar hasta 72 termopares en cada una de las torres.

Para tener la mayor eficiencia de los platos perforados éstos deben estar bien nivelados, para lo cual se usan soportes que consisten en un anillo soldado en todo el perímetro interno de la carcaza, estando distanciados entre si cada anillo de estos, 45 cm (18"). La tolerancia permitida durante la construcción debe ser 4 mm sobre los 8.5 m de diámetro. Las barras de soporte de los platos requieren de

filones de soldadura de 1.27 cm (1/2") en el tope y en el fondo.

#### V.2.- DE LOS PLATOS DE CONTACTO.

Los platos perforados utilizados para poner en íntimo contacto a los caudales de agua con el ácido sulfhídrico, con el propósito de llevar a cabo la transferencia de deuterio de una de estas sustancias a la otra y para efectuar los intercambios de calor entre ellas. Es fácil de entender que enfrentan condiciones de operación muy difíciles, por el carácter del H<sub>2</sub>S y por las turbulencias que se producen sobre ellos. Por lo tanto, es necesario que el material de construcción de los platos sea acero inoxidable con un límite de dureza máximo de Rockwell C22, el cual no permite que se produzca corrosión por esfuerzo, característico de estas condiciones del servicio de H<sub>2</sub>S.

Los platos para las torres de la primera y segunda etapas tienen de diámetro 8.5 m (28') y 7.5 m (24.5'), respectivamente. Son fabricados mediante la unión por pernos de un número grande de placas en el interior de las torres y dimensionadas y niveladas dentro de tolerancias permitidas muy estrictas.

Las operaciones más importantes para la fabricación de las partes, salvo las de corte que se efectúan por medio de un haz de plasma, todas involucran considerable trabajo en

frío, por lo que por medio de alguna forma de tratamiento térmico los esfuerzos generados en el trabajo frío son relevados. Los materiales seleccionados son aceros inoxidables de la serie de los 300, entre estos el 304, 304L, 316 y 316L.

### V.3. - DE LOS INTERCAMBIADORES DE CALOR.

Los perfeccionamientos que ha tenido el Proceso "GS", un buen número de éstos han sido en el mejoramiento del balance energético del mismo, por medio de una serie de recuperaciones de energía que anteriormente eran desechadas; lo cual ha hecho que exista una cantidad considerable de intercambiadores de calor. En estos equipos, además de las fatigas térmicas ocasionadas por los choques térmicos característicos de estos dispositivos, habrá que sumar que están en servicio de H<sub>2</sub>S húmedo o agua con el H<sub>2</sub>S disuelto, por lo que la selección de los materiales de construcción y los métodos de manufactura cobran gran importancia.

En donde hay problemas de turbulencia, se usan en las carcazas y canales recubrimientos de acero inoxidable. Un requerimiento para todas las boquillas, tanto para intercambiadores, recipientes, tubería, etc., es que las bridas deben ser maquinadas para una adecuado asentamiento del empaque para que el sellado sea completo. El empaque

usado es de teflón y los pernos deben ser apretados ha una presión máxima de 40,000 psi.

La fabricación del tubo con recubrimiento de acero inoxidable exige mucho cuidado. La dureza del acero al carbón del tubo en el cual el acero inoxidable está rolado debe ser duro, con objeto de que resista las expansiones del acero inoxidable; así como el acero inoxidable debe ser tan blando como sea posible, para evitar que se produzca corrosión.

#### V.4.- DEL SISTEMA DE TUBERIAS.

En el diseño del sistema de tuberías de las plantas de agua pesada es conveniente tomar en cuenta los siguientes factores clave:

- a) El uso del menor número de bridas, sin que la remoción de equipos y la inspección del sistema sea evitado.
- b) El uso de material en base aleaciones donde la turbulencia no pueda ser evitada.
- c) El acortamiento de las líneas sin que el mantenimiento y la operación sean impedidas.
- d) Adecuado arreglo y diseño de los soportes de la tubería con el propósito de minimizar los esfuerzos

bajo operación de temperaturas y presiones.

Además, hay tres características interesantes en la construcción del sistema de tuberías. La primera, es el cuidado con el cual todas las líneas deben ser cargadas para suministrar el mínimo esfuerzo para prevenir la corrosión y el drenaje correcto que impida que queden pequeñas cantidades de agua estancada, donde la formación de hidratos puedan ocurrir cuando la planta esté fuera de servicio por mantenimiento. La segunda, es el cuidado que se debe tener en el alineamiento de las bridas y en el torque de sus pernos (no mayor de 40,000 psi). La tercera y última es concerniente al aislamiento, con el propósito de poder bloquear algún equipo o sección de la planta donde alguna fuga pudiese ocurrir, o bien, para llevar a cabo funciones de mantenimiento regulares.



## CAPITULO VI

### LA EVALUACION DE LOS RIESGOS.

En trabajos de esta índole se aplican técnicas que de acuerdo a la función que llevan a cabo, se subdividen en métodos para identificar los riesgos y en métodos para cuantificar la gravedad y la probabilidad de que éstos ocurran. Para el caso que nos ocupa, en que el manejo de grandes riesgos es inevitable, es necesario utilizar procedimientos muy completos y sistemáticos para que el funcionamiento de la planta pueda ser bastante confiable.

#### VI.1 ESTUDIOS DE OPERABILIDAD.

El método que aplicaremos en la fase de identificar los riesgos que tiene el Proceso "GS", es una técnica desarrollada en Inglaterra por un grupo de expertos de seguridad de reconocido prestigio mundial, el cual tiene la cualidad de poderse efectuar desde la etapa de diseño de planta, lo que hace viable hacer las modificaciones que arroje el estudio desde esta etapa, con las consiguientes ventajas en materia de seguridad.

El método se le conoce como "Estudios de Operabilidad", en virtud de que tiene como fundamento analizar y estudiar con la profundidad que exija el proceso

en cuestión, todas las desviaciones que sean factibles de ocurrir con respecto a la operación normal de la planta, todas las posibles causas y sus respectivas consecuencias; así como definir las medidas más convenientes para minimizar o evitar los riesgos que tengan alguna probabilidad de suceder.

El procedimiento sistemático que pone en práctica esta técnica consiste, en su parte inicial, en investigar las posibles desviaciones a la operación normal del proceso, mediante el sometimiento a seis cuestionamientos claves a los puntos de interés de la instalación. El primero de estos cuestionamientos está relacionado con el parámetro de transporte flujo, el cual consiste en preguntarse todas las posibles causas que podrían provocar para que el flujo dejara de ocurrir o bien lo hiciera en sentido opuesto al normal, las consecuencias que fueran viables de suceder y las acciones que serían convenientes de instrumentarse.

El segundo y el tercero de los cuestionamientos, son con respecto a desviaciones de las condiciones de operación del proceso, cambios tales como en la presión, en la temperatura, en el flujo, en la viscosidad, etc.; buscando encontrar las causas posibles que pudieran ocasionar que éstas aumentaran o disminuyeran del valor que deben tener en funcionamiento normal; e igualmente todas las consecuencias viables de ocurrir y las medidas más

adecuadas que se podrían tomar.

La cuarta pregunta clave, es con el propósito de investigar las causas que podrían generar una alteración en la concentración de una sustancia o en la relación de la composición de una mezcla. La quinta, es para determinar las causas que podrían provocar que se introdujera una sustancia y/o un estado físico extra. La sexta y última pregunta, es para ver las causas por las cuales se debe iniciar la operación, interrumpir ésta, o ser sometida a un mantenimiento y otras de la misma especie. Igual que en los casos anteriores, también se deben definir en cada uno de ellos las consecuencias que se inducen por estas desviaciones y las acciones que sería adecuado poner en práctica.

## VI.2 IDENTIFICACION DE LOS RIESGOS.

Las secciones de la planta que abarca el presente estudio, se limita a una de las tres torres que componen la primera etapa del Proceso "GS". Lo que se defina en una de ellas es válido para las otras dos columnas de esta primera etapa por ser idénticas y, también para la única torre de la segunda etapa que es muy similar. Además, por las dimensiones de estas cuatro torres, es en la primera etapa donde está casi todo el inventario de ácido sulfhídrico. Con respecto a la probabilidad de que los

accidentes ocurran, ésta es similar para cualquiera de las torres de las tres etapas.

Otro aspecto es que estos trabajos se efectúan sobre las líneas que llegan o salen de los equipos, y no en el equipo mismo. En el presente caso, cualquier falla en una torre se refleja en por lo menos en una de estas líneas. En cambio, una anomalía en una de las líneas no necesariamente se detecta en la columna.

Por otro lado, el documento que servirá de base para hacer la identificación de los riesgos por medio de un estudio de la operabilidad de la torre, es el diagrama de flujo del proceso de esta columna y que anteriormente se representó en la Figura IV.2 (Desafortunadamente no se pudo disponer del diagrama de tuberías e instrumentos, que hubiera sido más indicado). Por lo anterior, fue necesario suponer que la instrumentación de la planta es la adecuada, lo cual seguramente es cierto, como lo prueba el alto grado de eficiencia y confiabilidad con que operan este tipo de instalaciones. En la siguiente tabla se presenta el estudio de operabilidad de una torre de la primera etapa.

En esta tabla, por problemas de espacio, en la primera columna donde se indican las desviaciones de la operación normal del proceso, se señalan dichas desviaciones en forma escueta y a veces escritas verticalmente, e incluso, empleándose los signos de "+" y "-" para indicar más o mayor y menos o menor, respectivamente.

Tabla VI.1 Estudio de la Operabilidad de una Torre de la  
Primera Etapa del Proceso "GS".

LÍNEA (101) DE ALIMENTACION DE AGUA A UNA TORRE DE LA PRIMERA ETAPA

DESV.	POSIBLES CAUSAS	CONSECUENCIAS	ACCIONES REQUERIDAS
N O F L U J O	(1) La bomba de alim. de agua no funciona o no tiene la potencia suficiente	Golpe de ariete por flujo en reversa	(a) Alarma y aviso respectivos en el tablero de control. (b) Sistema de protección para la bomba.
J O	(2) Fractura en la línea	Vaporización instantánea y fuga del H <sub>2</sub> S que satura al agua de alim.	Idem (a) (c) Parar la bomba de alim. de agua a la tra. etapa. (d) Cerrar las válvulas de aislamiento entre la torre y esta línea
	(3) Cerrada la válv. de admisión a la torre de la tra. etapa	Aumento de presión en la línea	Idem (a) Idem (c)
FLUJO EN REVERSA	Este punto está cubierto por las consideraciones que se hacen en los casos de los puntos (1), (2)		
MAYOR FLUJO	Este punto está cubierto por las consideraciones que se hacen en el caso del punto (2).		
MAYOR PRESION	Este punto está cubierto por las consideraciones que se hacen para el caso del punto (3).		
+ T E M P.	(4) Disminuye el Flujo	Sin riesgos, pero serios problemas en el proceso	Idem (a)
- F L U J O	(5) Deficiente funcionamiento de la bomba de alim. de agua a la tra. etapa	Sin riesgos, pero serios problemas en el proceso	Idem (a)

Continúa.

LINEA (101) DE ALIMENTACION DE AGUA A UNA TORRE DE LA PRIMERA ETAPA

DESV. POSIBLES CAUSAS	CONSECUENCIAS	ACCIONES REQUERIDAS
<b>MENOR PRESION</b>	Este punto esta cubierto por las consideraciones que se hacen en el punto (6).	
- (6) Fallas en las operaciones de precalentamiento y saturacion del agua con el P. H2S.	Sin riesgos, pero serios problemas en el proceso.	Idem (a)
<b>MENOR CONC. H2S</b>	Este punto está cubierto por las consideraciones que se hacen en el punto (6).	
+ (7) Fallan las operaciones de tratamiento del agua del proceso.	Sin riesgos, pero serios problemas en el proceso	Idem (a)
<b>ZAS</b>		
+ (8) Presencia de H2S gaseoso debido a una disminucion de la presion o un aumento de temperatura	Sin riesgos fuerte, pero serios problemas en el proceso	Idem (a)
<b>S</b>		
O (9) Mantenimiento de la bomba de agua de alim. por estar fallando	Sin riesgos, pero serios problemas en el proceso	Idem (a) (f) Tener bombas de relevo y las derivaciones correspondientes (by pass).
<b>S</b>		

LINEAS (102), (103) Y (104) DE LA RECIRCULACION DE AGUA PARA EL ENFRIAMIENTO DEL H2S QUE ENTRA A LA SECCION FRIA DE UNA DE LAS TORRES DE LA PRIMERA ETAPA.

DESV.	POSIBLES CAUSAS	CONSECUENCIAS	ACCIONES REQUERIDAS
N O F L U J O	(1)Obstrucción parcial o total entrada o salida de esta recirculación a la torre o en la propia línea	Aumento de la temperatura en el sistema	(a)Alarma y aviso respectivos en el tablero de control. (b)Parar la alimentación de vapor a la planta.
O	(2)Fractura de la línea	Vaporización instantánea y fuga del H2S que satura el agua	Idem (a) (b)Cerrar las válvulas de aislamiento de esta recirculación.
<b>FLUJO EN REVERSA</b>	Este punto está cubierto por las consideraciones que se hacen para el caso del punto (2).		
+ F L U J O	(3)Fallas en el control de la bomba de esta recirculación	Sin riesgos, pero serios problemas en el proceso	Idem (a) (e)Verificar si es necesario incrementar el control de flujo de esta recirculación
<b>MAYOR PRESION</b>	Este punto está cubierto por las consideraciones que se hacen en el punto (1).		
+ E M P.	(4)Fallas en la línea de agua de enfriamiento	Sin riesgos, pero serios problemas en el proceso	Idem (a) (f)Verificar si es necesario incrementar el control de flujo y temperatura de la corriente de enfriamiento.
<b>MENOR FLUJO</b>	Este punto está cubierto por las consideraciones que se hacen para el caso de la desviación del proceso "no fluye".		
<b>ENOR PRESION</b>	Este punto está cubierto por las consideraciones que se hacen en el caso del punto (2).		
- T E M P.	(5)Fallas en el sistema del agua de enfriamiento.	Sin riesgos, pero serios problemas en el proceso	Idem (a) Idem (f)

Continúa

LÍNEAS (102), (103) Y (104) DE LA RECIRCULACION DE AGUA PARA EL ENFRÍAMIENTO DEL H<sub>2</sub>S QUE ENTRA A LA SECCION FRIA DE UNA DE LAS TORRES DE LA PRIMERA ETAPA.

DESV.	POSIBLES CAUSAS	CONSECUENCIAS	ACCIONES REQUERIDAS
- D Z O	(6)Fractura en los tubos interiores del economizador entre las dos recirculaciones	Sin riesgos, pero serios problemas en el proceso.	Idem (a) Idem (c) (g)Cerrar las válvulas de aislamiento de las dos recirculaciones.
+ F A S E S	(7)Presencia de H <sub>2</sub> S gaseoso, debido a que aumenta la temperatura o disminuye la presión.	La erosión aumenta e incluso puede fracturarse la línea	Idem (a) Idem (e) Idem (f)
OTROS	No se aplica en esta línea.		

LÍNEAS (105), (106) Y (107) DE LA RECIRCULACION DE AGUA PARA CALENTAR EL H<sub>2</sub>S QUE ENTRA A LA SECCION CALIENTE DE UNA LAS TORRES DE LA PRIMERA ETAPA.

DESV.	POSIBLES CAUSAS	CONSECUENCIAS	ACCIONES REQUERIDAS
N O F L U J O	(1)Obstrucción parcial o total en la entrada o salida a la torre de esta recirculación o en la propia línea	Aumento en la temperatura y presión en la recirculación y en el riesgo de una fractura	(a)Alarma y aviso respectivo en el tablero de control. (b)Parar la alimentación de vapor. (c)Cerrar las válvulas que aíslan esta recirculación.
	(2)Fractura de la línea	Vaporización instantánea y fuga del H <sub>2</sub> S que satura esta corriente	Idem (a) Idem (c) (d)Parar la bomba de alimentación al proceso.
FLUJO EN REVERSA	Este punto está cubierto por las consideraciones que se hacen para el caso del punto (2)		



LINEAS (105), (106) Y (107) DE LA RECIRCULACION DE AGUA PARA CALENTAR EL H2S QUE ENTRA A LA SECCION CALIENTE DE UNA LAS TORRES DE LA PRIMERA ETAPA.

DESV. POSIBLES CAUSAS	CONSECUENCIAS	ACCIONES REQUERIDAS
-----------------------	---------------	---------------------

+ (3) Fallas en el control de flujo de la bomba de esta recirculación	Sin riesgos, pero serios problemas en el proceso	Idem (a) (e) Verificar si es necesario incrementar el control de flujo de esta recirculación
---	--	---

<b>MAYOR PRESION</b>	Este punto está cubierto por las consideraciones que se hacen en el punto (1).	
----------------------	--	--

+ (4) Fallas en las líneas de alimentación de vapor	Mayor erosión en las líneas de esta recirculación por la presencia de H2S gaseoso	Idem (a) Idem (b) Idem (c) (f) Verificar si es necesario más control de la alimentación de vapor.
---	---	--

<b>ENOR FLUJO</b>	Este punto está cubierto por las consideraciones que se hacen para el caso de la desviación del proceso "no flujo".	
-------------------	---	--

<b>ENOR PRESION</b>	Este punto está cubierto por las consideraciones que se hacen en el caso del punto (2).	
---------------------	---	--

- (5) Fallas en el sistema de alimentación de vapor	Sin riesgos, pero serios problemas en el proceso	Idem (a) Idem (f)
---	--	----------------------

+ (6) Fractura en los tubos interiores del economizador entre las dos recirculaciones	Sin riesgos, pero serios problemas en el proceso.	Idem (a) Idem (c) (g) Cerrar las válvulas de aislamiento de las dos recirculaciones.
---	---	--

+ (7) Presencia de H2S gaseoso, debido a que aumenta la temperatura o disminuye la presión.	La erosión aumenta e incluso puede fracturarse la línea	Idem (a) Idem (e) Idem (f)
---	---	----------------------------------

<b>OTROS</b>	No se aplica en esta línea.	
--------------	-----------------------------	--

LINEA (108) DE LA CORRIENTE DE AGUA DE DESECHO SATURADA CON H2S Y QUE SALE DE UNA DE LAS TORRES DE LA PRIMERA ETAPA

DESV. POSIBLES CAUSAS CONSECUENCIAS ACCIONES REQUERIDAS

N (1)Obstruída la salida de la torre o la entrada al evaporador instantáneo o la propia línea

O Sin riesgo, pero serios problemas en el proceso

F (a)Alarma y avisos respectivos en el table--

L de control.

U

J (2)Fractura en la línea

O Vaporización instantánea y fuga del H2S que satura el agua de desecho.

Idem (a)

(b)Cerrar las válvulas que aíslan esta línea.

(c)Parar las bombas de alim. de agua al proceso.

FLUJO EN REVERSA Este punto está cubierto por las consideraciones que se hacen en el caso del punto (2).

MAYOR FLUJO Este punto está cubierto por las consideraciones que se hacen en el caso del punto (1).

MAYOR PRESION Este punto está cubierto por las consideraciones que se hacen para el caso del punto (1).

+ (3)Alim. mayor de vapor en el desgasificador del agua de desecho y/o en la recirculación del fondo

Sin riesgos, pero serios problemas en el proceso

Idem (a)

MENOR FLUJO Este punto está cubierto por las consideraciones que se hacen para el caso de "no flujo".

MENOR PRESION Este punto está cubierto por las consideraciones que se hacen en el punto (2).

- (4)Menor la alimentación de vapor en el desgasificador y/o en la recirculación del fondo

A la corriente de desecho sale con más concentración H2S.

Idem (a)

(b)Neutralizar a la salida el exceso de H2S.

MAYOR CONC. H2S Este punto está cubierto por las consideraciones que se hacen en el punto (4).

Continúa

LINEA (108) DE LA CORRIENTE DE AGUA DE DESECHO SATURADA CON H2S Y QUE SALE DE UNA DE LAS TORRES DE LA PRIMERA ETAPA

DESV.	POSIBLES CAUSAS	CONSECUENCIAS	ACCIONES REQUERIDAS
+ F A S E S	(5) Presencia de H2S gaseoso debido a una disminución de la presión o un aumento de temperatura	Sin riesgos fuerte, pero serios problemas en el proceso	Idem (a)

OTROS No se aplica en esta línea.

LINEA (114) DE SALIDA DEL H2S DE UNA DE LAS TORRES DE LA PRIMERA ETAPA.

DESV.	POSIBLES CAUSAS	CONSECUENCIAS	ACCIONES REQUERIDAS
N O F L U J O	(1) Por estar bloqueada la válvula en el tope de la torre	Aumento de la presión y de la probabilidad de una fractura	(a) Alarma y aviso respectivos en el table de control. (b) Parar el ventilador, el compresor y bomba de alimentación a la columna.
	(2) Fractura en la línea o torre	Fuga importante de gas de H2S.	Idem (a) Idem (b) (c) Bloquear la sección donde está la fuga. (d) Descargar el gas de la sección afectada al quemador. (e) Retornar el gas de las secciones no afectadas a sus depósitos de almacenamiento.

FLUJO EN REVERSA Este punto está cubierto por las consideraciones que se hacen en los casos de los puntos (1), (2)

Continúa.

LINEA (114) DE SALIDA DEL H2S DE UNA DE LAS TORRES DE LA PRIMERA ETAPA.

DESV.	POSIBLES CAUSAS	CONSECUENCIAS	ACCIONES REQUERIDAS
<b>MAYOR FLUJO</b>	Este punto está cubierto por las consideraciones que se hacen en el caso del punto (2).		
<b>+ P R E S I O N</b>	(3) Por estar bloqueada la línea	Aumento de la presión en la línea y de la fractura	Idem (a) Idem (b)
<b>I O N</b>	(4) Fallas en el agua de enfriamiento	Idem (2)	Idem (a) Idem (b)
	(5) Incendio	Aumento de la presión y de la posibilidad de una fractura y de explosión	Idem (a) Idem (b) Idem (e)
<b>MAYOR TEMP.</b>	Este punto está cubierto por las consideraciones que se hacen para el caso del punto (5).		
<b>MENOR FLUJO</b>	Este punto está cubierto por las consideraciones que se hacen para el caso de la desviación del proceso "no flujo".		
<b>MENOR PRESION</b>	Este punto está cubierto por las consideraciones que se hacen en el punto (2).		
<b>MENOR TEMP.</b>	Este punto está cubierto por las consideraciones que se hacen en el punto (2).		
<b>+ F A S E S</b>	(6) Condensa parte del agua que satura el gas, debido a un aumento en la presión del sistema	Aumenta la probabilidad de una falla en los equipos.	(f) Verificar si es necesario mejorar el control de la presión del sistema.
<b>O T R O S</b>	(7) Mantenimiento de el ventilador o del compresor	Sin riesgos, pero serios problemas en el proceso	Idem (a) Idem (b)

**LÍNEA (117) DE ALIMENTACION DEL H<sub>2</sub>S A UNA DE LAS TORRES DE LA PRIMERA ETAPA.**

DESV.	POSIBLES CAUSAS	CONSECUENCIAS	ACCIONES REQUERIDAS
-------	-----------------	---------------	---------------------

N O  F L U J O	(1) Por estar bloqueada la válvula en el fondo de la torre	Aumento de la presión y de la probabilidad de una fractura	(a) Alarma y aviso respectivos en el tablero de control. (b) Parar el ventilador, el compresor y bomba de alimentación a la columna.
-------------------------------------	--	--	---

	(2) Fractura en la línea o torre	Fuga importante de gas de H <sub>2</sub> S.	Idem (a) Idem (b) (c) Bloquear la sección donde está la fuga. (d) Descargar el gas de la sección afectada al quemador. (e) Retornar el gas de las secciones no afectadas a sus depósitos de almacenamiento.
--	----------------------------------	---	---

	(3) No funciona el ventilador o tiene menor potencia	Sin riesgos, pero serios problemas de el proceso	Idem (a)
--	--	--	----------

<b>FLUJO EN REVERSA</b>	No se aplica en esta línea.		
-------------------------	-----------------------------	--	--

<b>MAYOR FLUJO</b>	Este punto está cubierto por las consideraciones que se hacen en el caso del punto (2).		
--------------------	---	--	--

+ P R E S I O N	(4) Por estar bloqueada la línea	Aumento de la presión en la línea y de la fractura	Idem (a) Idem (b)
--------------------------------------	----------------------------------	--	----------------------

	(5) Fallas en el agua de enfriamiento	Idem (2)	Idem (a) Idem (b)
--	---------------------------------------	----------	----------------------

	(6) Incendio	Aumento de la presión y de la probabilidad de una fractura y de explosión	Idem (a) Idem (b) Idem (c)
--	--------------	---	----------------------------------

Continúa.

---

LINEA (117) DE ALIMENTACION DEL H2S A UNA DE LAS TORRES DE LA PRIMERA ETAPA.

---

DESV. POSIBLES CAUSAS	CONSECUENCIAS	ACCIONES REQUERIDAS
MAYOR TEMP.	Este punto está cubierto por las consideraciones que se hacen para el caso del punto (6).	
MENOR FLUJO	Este punto está cubierto por las consideraciones que se hacen para el caso de la desviación del proceso "no flujo".	
MENOR PRESION	Este punto está cubierto por las consideraciones que se hacen en el punto (2).	
MENOR TEMP.	No se aplica en esta línea.	
+ F A S E S (7) Condensa parte del agua que satura el gas, debido a un aumento en la presión del sistema	Aumenta la probabilidad de una falla en los equipos.	(f) Verificar si es necesario mejorar el control de la presión del sistema.
O T R O S (8) Mantenimiento de el ventilador o del compresor	Sin riesgos, pero serios problemas en el proceso	Idem (a) Idem (b)

---

LINEA (118) DE ALIMENTACION DEL H2S A LA TORRE DE LA SEGUNDA ETAPA.

DESV.	POSIBLES CAUSAS	CONSECUENCIAS	ACCIONES REQUERIDAS
N O F L U J O	(1) Por estar cerrada la válvula de admisión a la torre de la 2da. etapa.	Aumento de la presión y de la probabilidad de una fractura	(a) Alarma y aviso respectivos en el table de control. (b) Parar el ventilador respectivo y el compresor de alimentación.
	(2) Fractura en la línea o torre	Fuga importante de gas de H2S.	Idem (a) Idem (b) (c) Bloquear la sección donde está la fuga. (d) Descargar el gas de la sección afectada al quemador. (e) Retornar el gas de las secciones no afectadas a sus depósitos de almacenamiento.
	(3) No funciona el ventilador o tiene menor potencia	Idem (1)	Idem (a) Idem (b)
<b>FLUJO EN REVERSA</b>	No se aplica en esta línea.		
<b>HAYOR FLUJO</b>	Este punto está cubierto por las consideraciones que se hacen en el caso del punto (2).		
+ P R E S I O N	(4) Por estar bloqueada la línea	Aumento de la presión en la línea y de una fractura	Idem (a) Idem (b)
	(5) Fallas en el agua de enfriamiento	Idem (2)	Idem (a) Idem (b)
	(6) Incendio	Aumento de la presión y de la probabilidad de una fractura y de explosión	Idem (a) Idem (b) Idem (e)

Continúa.

LÍNEA (118) DE ALIMENTACION DEL H<sub>2</sub>S A LA TORRE DE LA SEGUNDA ETAPA.

DESV.	POSIBLES CAUSAS	CONSECUENCIAS	ACCIONES REQUERIDAS
MAYOR TEMP.	Este punto está cubierto por las consideraciones que se hacen para el caso "mayor presión".		
MENOR FLUJO	Este punto está cubierto por las consideraciones que se hacen para el caso de la desviación del proceso "no flujo".		
MENOR PRESION	Este punto está cubierto por las consideraciones que se hacen en el punto (2).		
MENOR TEMP.	No se aplica en esta línea.		
+ F A S E S	(7) Condensa parte del agua que satura el gas, debido a un aumento en la presión del sistema	Aumenta la probabilidad de una falla en los equipos.	(f) Verificar si es necesario mejorar el control de la presión del sistema.
O T R O S	(8) Mantenimiento de el ventilador de alimentación a la torre de la 2da. etapa	Sin riesgos, pero serios problemas en el proceso	Idem (a) Idem (b)



LINEA (119) DE RETORNO DEL H2S A UNA DE LAS TORRES DE LA PRIMERA ETAPA.

DESV.	POSIBLES CAUSAS	CONSECUENCIAS	ACCIONES REQUERIDAS
N O F L U J O	(1) Por estar cerrada la válvula de admisión a la torre de la 2da. etapa.	Aumento de la presión y de la probabilidad de una fractura	(a) Alarma y avisos respectivos en el tablero de control. (b) Parar el ventilador respectivo y el compresor de alimentación.
	(2) Fractura en la línea o torre	Fuga importante de gas de H2S.	Idem (a) Idem (b) (c) Bloquear la sección donde está la fuga. (d) Descargar el gas de la sección afectada al quemador. (e) Retornar el gas de las secciones no afectadas a sus depósitos de almacenamiento.
	(3) No funciona el ventilador o tiene menor potencia	Idem (1)	Idem (a) Idem (b)
<b>FLUJO EN REVERSA</b>	No se aplica en esta línea.		
<b>MAYOR FLUJO</b>	Este punto está cubierto por las consideraciones que se hacen en el caso del punto (2).		
+ P R E S I O N	(4) Por estar bloqueada la línea	Aumento de la presión en la línea y de una fractura	Idem (a) Idem (b)
	(5) Fallas en el agua de enfriamiento	Idem (2)	Idem (a) Idem (b)
	(6) Incendio	Aumento de la presión y de la probabilidad de una fractura y de explosión	Idem (a) Idem (b) Idem (e)

Continúa.

LINEA (119) DE RETORNO DEL H<sub>2</sub>S A UNA DE LAS TORRES DE LA PRIMERA ETAPA.

DESV.	POSIBLES CAUSAS	CONSECUENCIAS	ACCIONES REQUERIDAS
MAYOR TEMP.	Este punto está cubierto por las consideraciones que se hacen para el caso "mayor presión".		
MENOR FLUJO	Este punto está cubierto por las consideraciones que se hacen para el caso de la desviación del proceso "no flujo".		
MENOR PRESION	Este punto está cubierto por las consideraciones que se hacen en el punto (2).		
MENOR TEMP.	No se aplica en esta línea.		
+ F A S E S	(7) Condensa parte del agua que satura el gas, debido a un aumento en la presión del sistema	Aumenta la probabilidad de una falla en los equipos.	(f) Verificar si es necesario mejorar el control de la presión del sistema.
O T R O S	(8) Mantenimiento de el ventilador de retorno del H <sub>2</sub> S a la torre de la 1ra. etapa.	Sin riesgos, pero serios problemas en el proceso	Idem (a) Idem (b)

### VI.3 EL ANALISIS DE RIESGOS MEDIANTE UN ARBOL DE FALLAS

#### VI.3.1 CONSIDERACIONES INICIALES

Los factores que es necesario tener en cuenta para realizar la evaluación de los riesgos en las plantas industriales son, por un lado, la severidad o la gravedad del daño que causaría en caso de ocurrir el accidente y, por el otro, la frecuencia o la probabilidad que tiene de suceder

dicho evento. Por lo tanto, en este trabajo se define el tamaño de riesgo como el producto de estos parámetros, con el propósito de tener una forma cuantitativa y objetiva de medir o comparar los riesgos en un proceso o de una planta funcionando.

Sin embargo, para el caso que se está analizando, teniendo en cuenta los riesgos tan fuertes que posee el manejo de grandes volúmenes de H<sub>2</sub>S y los datos que arrojó el estudio de operabilidad aplicado, es posible establecer muy claramente cuales riesgos del Proceso "GS" son los de mayor tamaño y a los cuales debe enfocarse el presente trabajo.

Evidentemente, se está haciendo referencia a los riesgos de una fuga mayor de H<sub>2</sub>S, debida a una fisura o fractura en los equipos y líneas de dimensiones más grandes, o sea, en las 3 torres que componen la primera etapa, en la torre de la segunda etapa y en las líneas de recirculación del gas en estas dos etapas. Lo anterior es por las siguientes razones: (1) En estos equipos y líneas está casi la totalidad del inventario de proceso del H<sub>2</sub>S y, (2) Las condiciones son más propicias para que se de una fuga de este tipo, dado que este ácido es un agresivo agente corrosivo y a que las sustancias en estado gaseoso pueden más fácil y rápidamente generar una sobrepresión y/o escaparse de algún confinamiento presurizado.

Por otro lado, los valores de probabilidad de falla que se utilizan en este trabajo para el cálculo de los riesgos, son tomados de la literatura en la materia y corresponden a datos estadísticos observados en instalaciones similares. Esta información esta contenida en la Tabla VI.2, y corresponden a los valores más conservadores de las referencias que se mencionan.

**Tabla VI.2 Probabilidades de Falla de los Componentes Industriales.**

REF.	COMPONENTE	PROBABILIDAD (veces/año)
(a)	Falla bomba centrífuga en línea .....	0.40
"	" " " " horizontal .....	0.47
"	" " " " vertical .....	0.50
(b)	" de bomba centrífugas .....	0.01
"	" de válvula de control .....	0.01
"	" en componentes de la instrumentación (transmisor, transductor, etc).....	0.001
"	" Switche a presión, válv. selenoide, etc.	0.001
"	" motor eléctrico .....	0.0001
"	" del operador .....	0.01
"	" Interrupción de Servicios .....	0.01
(c)	" Fuga en una bomba .....	4
"	" Sobrellenado de un tanque .....	5
"	" No abre una válvula de alivio a la presión a que debe hacerlo .....	0.01
(d)	" Falla de válvula de control de nivel .....	0.5
"	" " " " " " presión .....	0.2
"	" " " " " " manual .....	0.1
"	" " " " " " humana .....	0.2
"	" " " " " " de una alarma .....	0.2
(e)	" de un sistema de interrupción de los equipos que causan el problema (trip) ..	0.3
"	" del sistema de interrupción del suministro de vapor .....	0.75
"	" del sistema de paro de una bomba .....	0.08
(f)	" Ruptura válv., bridas, juntas expansión, etc.	0.0009
"	" de recipientes .....	0.000001
"	" de tubería/10 m .....	0.0000005

- (a) Turney, B. "Learn from equipment failure". Hydrocarbon Processing, NOV. 1977.
- (b) Browning, R.L. "Analyze losses by diagram". Hydrocarbon Processing, Sept. 1975.
- (c) Kletz, T. "Evaluate risk in plant design". Hydrocarbon Processing, May 1977.
- (d) Lawley, H.G. "Operability Studies and Hazard Analysis" Chem. Eng. Progress, April 1974.
- (e) Lawley, H.G. "High-Pressure-Trip System for Vessel Protection". Chem. Eng., May 12, 1975.
- (f) Atallah, S. "Assessing and managing industrial risk". Chem. Eng. Sept. 8, 1980.

### VI.3.2 EVALUACION DE LOS RIESGOS MAYORES DE LA PLANTA.

En base a lo anterior, el principal riesgo del Proceso "GS", es la fisura o fractura en algunas de las columnas o líneas mayores de la planta. El siguiente paso será la determinación de la probabilidad de que dicho evento ocurra.

Para el caso de una torre, la fractura podrá ocurrir cuando se presente por lo menos una de las condiciones siguientes: (a) La corrosión en uno o varios puntos de la carcasa de la columna y, (b) La generación de una sobrepresión incontrolable en el sistema. (No se consideran fenómenos extraños al proceso, como los meteorológicos, geológicos, sociales, etc.; por salir del objetivo de este estudio).

En el caso de la ruptura por corrosión en una columna, el dato que que viene en la tabla VI.2, es que puede ocurrir 0.000001 veces al año, pero como son 4 recipientes y las

rupturas de éstas son eventos independientes entre sí, la probabilidad de que falle por lo menos una torre será de

$$4 \times 0.000001 \text{ veces/año} = 0.000004 \text{ veces/año.}$$

De manera independiente, la columna puede fallar por una sobrepresión y, al mismo tiempo, fallen los mecanismos y los dispositivos que la corrigen o que la alivian. No se debe dejar de tener en cuenta, que en las plantas de producción de agua pesada dichos mecanismos o dispositivos están mínimamente duplicados. Estas fallas pueden ser por dos secuencias distintas e independientes. Una de estas secuencias, será que fallen los dos sistemas de paro del compresor, de las alarmas que avisan de una presión superior a la normal y que las válvulas de alivio no abran a la presión a que deben hacerlo. En este caso habrá que considerar que se trata de cuatro recipientes y que en cada uno puede generarse el problema en forma independiente. Los eventos en cada secuencia por definición no son independientes entre sí.

Teniendo en cuenta estas precisiones y tomando los valores correspondientes, se tiene que la ruptura por sobrepresión de por lo menos una columna debida a esta secuencia, será (en veces/año)

$$(0.3 \times 0.3 \times 0.2 \times 0.2 \times 0.01 \times 0.01) \times 4 = 0.00000144$$

La otra secuencia es similar a la anterior, solo que en vez de una falla en los mecanismos de la alarma, se tiene en los dos operadores de la planta y, como tienen la misma probabilidad de falla la alarma que el operador, la ruptura de por lo menos una torre debida a esta segunda secuencia tendrá el mismo valor. Por lo tanto, la probabilidad de que ocurra por lo menos una ruptura en una de las torres debida a corrosión o a una sobrepresión, es (en veces/año)

$$0.000004 + (2 \times 0.0000144) = 0.000069$$

Para el caso de una fisura o fractura en una de las líneas de recirculación del gas, tenemos que puede suceder por los mismas causas. Para una falla por corrosión el valor que nos reporta la tabla es 0.00000005 veces por año y por metro de tubo y que cada recirculación tiene aproximadamente 100 metros de longitud, por lo que, la probabilidad de que por lo menos una línea de recirculación tenga una fractura es

$$4 \times 0.00000005 \text{ veces/año-m} \times 100 \text{ m} = 0.000002 \text{ veces/año}$$

y en el caso de una sobrepresión se repiten las dos secuencias, por lo que el valor de la probabilidad será el mismo, o sea 0.0000029 veces/año. Ahora, la probabilidad de que pueda haber por lo menos una fractura en las líneas de recirculación del gas de las dos primeras etapas es

$$(0.000002 + 0.000029) \text{ veces/año} = 0.000049 \text{ veces/año}$$

En virtud de que las fracturas en las columnas y en las líneas son eventos independientes entre si, la probabilidad de que pueda ocurrir una fractura en por lo menos una torre o una línea de recirculación del gas de las dos primeras etapas del Proceso "GS" es

$$(0.0000069 + 0.0000049) \text{ veces/año} = 0.0000118 \text{ veces/año}$$

lo que es equivalente a decir que cada 84,745 años puede darse un accidente de una fuga mayor en una planta de agua pesada en base al Proceso "GS", las cuales están diseñadas para operar 20 años, que es un lapso de tiempo 4,237 veces menor del que se requiere para que un accidente ocurra. En las Figuras VI.1 y 2 están los "árboles de falla" de estos eventos.

El otro aspecto que debe tenerse en cuenta, es las consecuencias del accidente, para lo cual hay que tener presente, que estas plantas están diseñadas para que en caso de que llegara a ocurrir una fuga mayor, los daños que pudiera provocar en la periferia de la instalación no tendrían efectos permanentes, para lo cual hay que recordar que existe una área de exclusión de un km de diámetro, y que alrededor de la planta están colocados quemadores de gas combustible que encenderían en caso de una fuga de H<sub>2</sub>S, que asegurarían una adecuada dispersión y disminución de la concentración del gas que lograra fugarse.



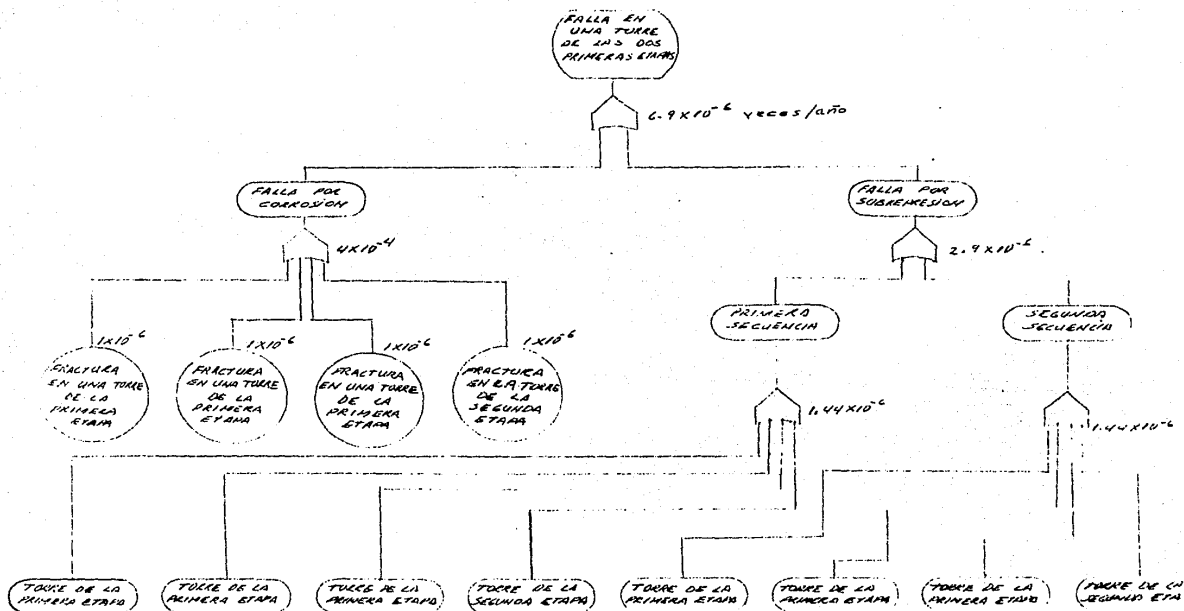


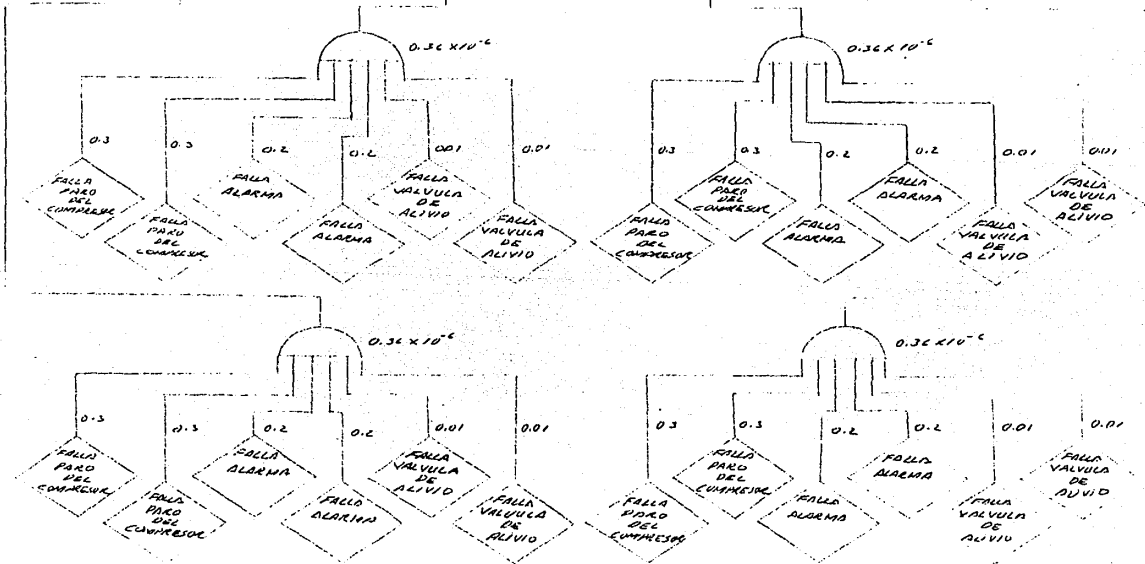
Figura VI.1 Arbol de Fallas en una de las Torres

TORRE DE LA PRIMERA ETAPA

TORRE DE LA SEGUNDA ETAPA

TORRE DE LA TERCERA ETAPA

TORRE DE LA CUARTA ETAPA

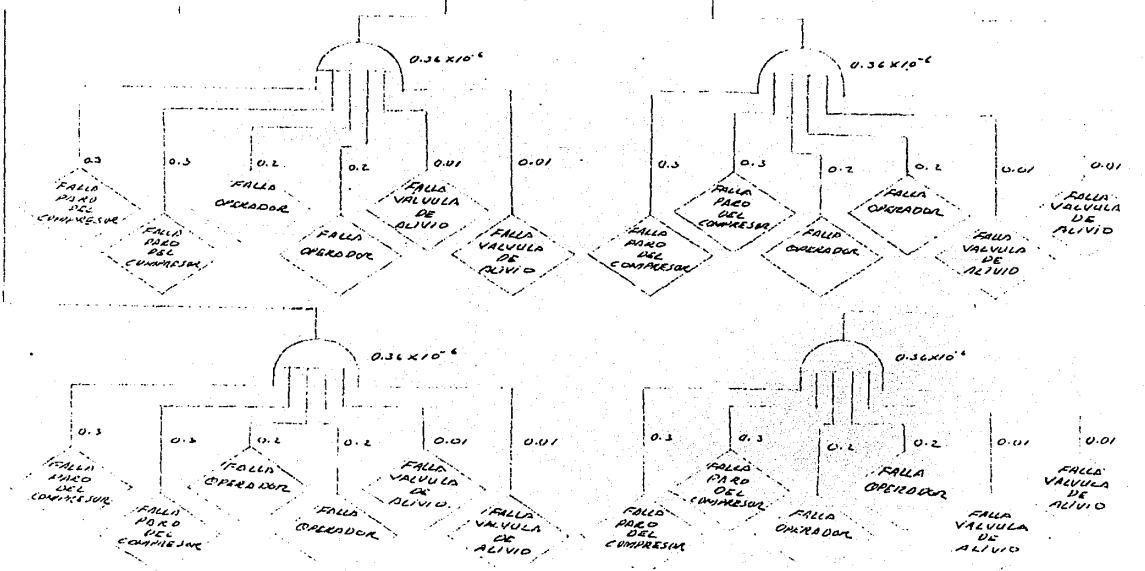


TARJETA DE LA PRIMERA ETAPA

TARJETA DE LA PRIMERA ETAPA

TARJETA DE LA PRIMERA ETAPA

TARJETA DE LA SEGUNDA ETAPA



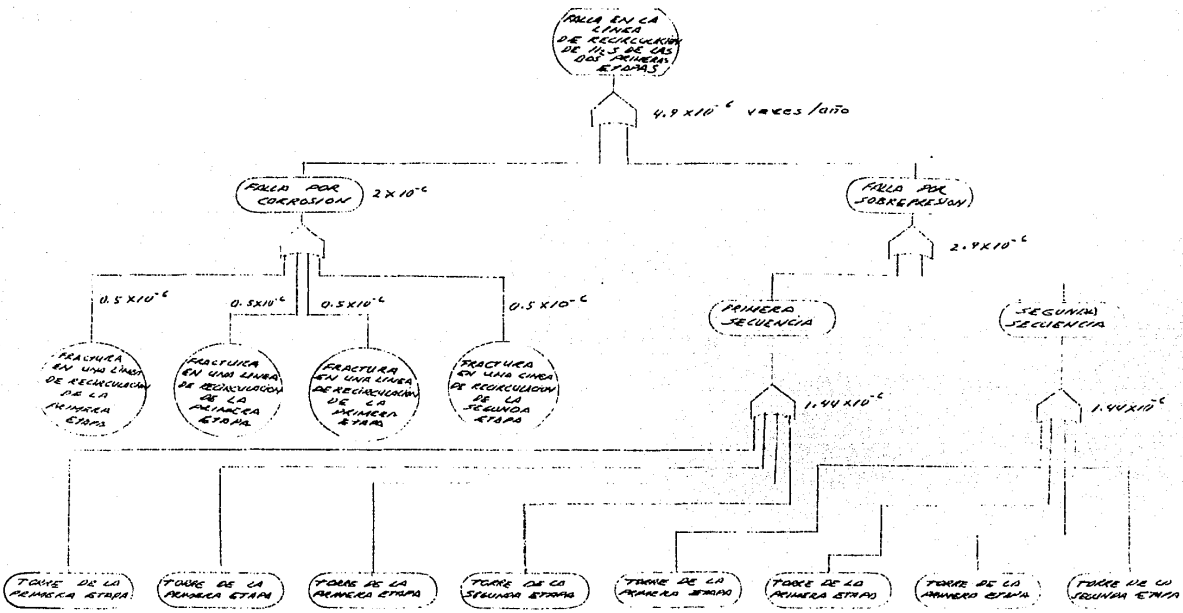


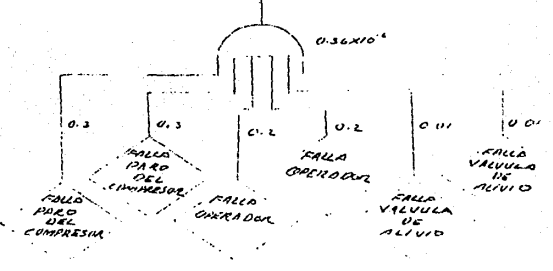
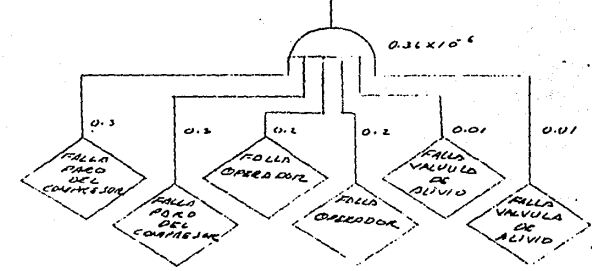
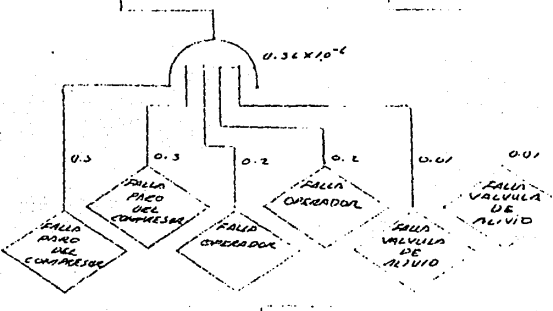
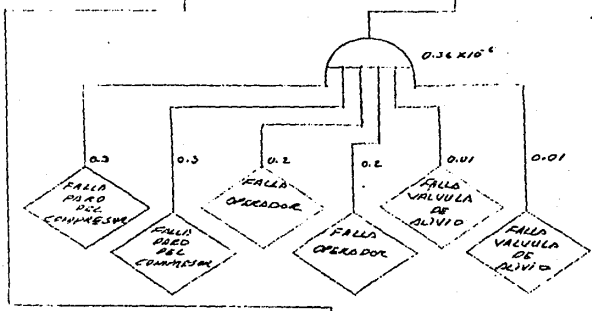
Figura VI.2 Arbol de Fallas en una de las Líneas de Recirculación de H<sub>2</sub>S

TORNE DE LA PRIMERA ERROTA

TORNE DE LA PRIMERA ERROTA

TORNE DE LA PRIMERA ERROTA

TORNE DE LA SEGUNDA ERROTA

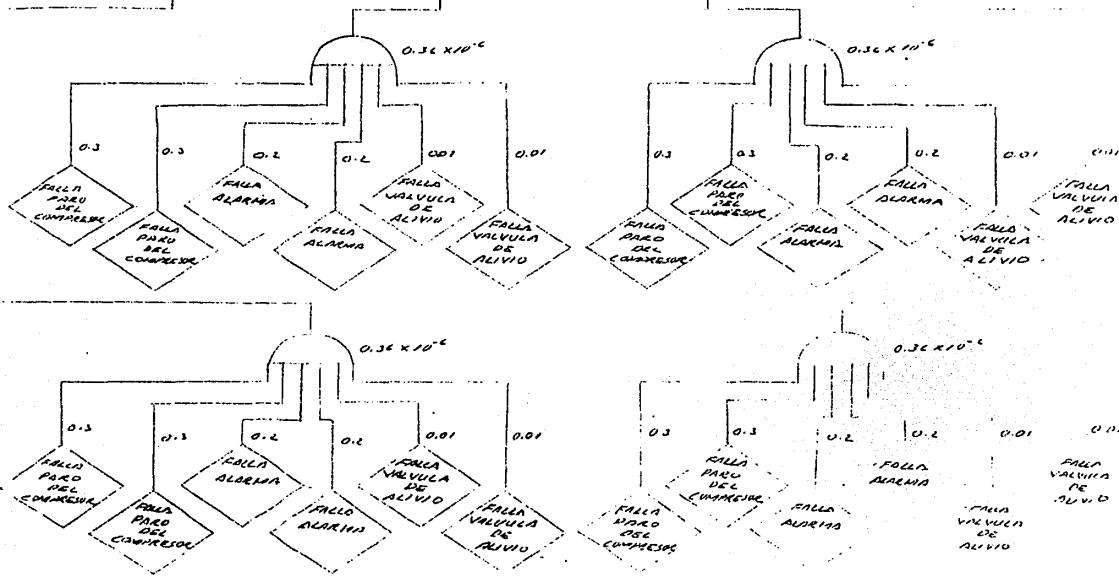


TORRE DE LA  
HUMEDAD ESTADIA

TORRE DE LA  
HUMEDAD ESTADIA

TORRE DE LA  
HUMEDAD ESTADIA

TORRE DE LA  
HUMEDAD ESTADIA



FALLA PARED DEL COMPRESOR

FALLA PARED DEL COMPRESOR

FALLA ALARMA

FALLA ALARMA

FALLA VALVULA DE ALIVIO

FALLA VALVULA DE ALIVIO

FALLA PARED DEL COMPRESOR

FALLA PARED DEL COMPRESOR

FALLA ALARMA

FALLA ALARMA

FALLA VALVULA DE ALIVIO

FALLA VALVULA DE ALIVIO

## CAPITULO VII

### LAS CONCLUSIONES

- PRIMERA** La generación de electricidad por medios nucleares en el país, cubrirá en las próximas décadas una parte importante de la demanda, de acuerdo a como lo señala el Programa de Energía actual y a que es la única fuente masiva de generación de fluido eléctrico capaz de aliviar el peso que actualmente tienen los hidrocarburos.
- SEGUNDA** De acuerdo al nivel de desarrollo del país, los reactores nucleoelectrónicos que utilizan uranio natural y agua pesada, son la opción que mayores ventajas presenta, dado que la mayoría de su tecnología puede ser absorbida y, por lo mismo, el que menor grado de dependencia tecnológica con el exterior establecería.
- TERCERA** En la producción de agua pesada, el Proceso "GS" es una de las opciones factibles técnicamente, puesto que su grado de complejidad tecnológico es similar al de la industria petroquímica del país.

**CUARTA** La desventaja mayor del Proceso "GS", es el tener que manejar los fuertes riesgos que tienen las grandes cantidades de H<sub>2</sub>S. Sin embargo, la utilización de las técnicas de Estudios de Operabilidad para identificar los riesgos y de Análisis de Riesgos para cuantificar éstos, son fundamentales para saber que tan confiables y seguros son procesos como el objeto de este estudio.

**QUINTA** La aplicación de la técnicas antes aludidas, permitió definir que los riesgos mayores del Proceso "GS" son las posibles fugas por una fractura en las torres y líneas de recirculación del gas de las dos primeras etapas, pero que con un adecuado diseño del sistema de instrumentación y seguridad, como los que tienen las plantas en operación, las probabilidades de accidentes son de que una fuga mayor del H<sub>2</sub>S puede ocurrir cada 84,745 años, o sea, 4,237 veces la vida de dichas plantas.

**SEXTA** En el presente trabajo, se desprende que los Estudios de Operabilidad y los Análisis de Riesgos pueden ser de gran utilidad, para diseñar o perfeccionar los procesos, los sistemas de instrumentación y control y los sistemas de servicios auxiliares.



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

- (1) Archibald, R.G. "Process sour gas safety". Hydrocarbon Processing, March 1977, pp 219-232.
- (2) Atallah, S. "Assessing and managing industrial risk". Chem. Eng., Sept. 8, 1980, pp 94-103.
- (3) Bebbington, W.P., Thayer, V.R. and Proctor, J.F. "Production of Heavy Water-Savannah River and Dana Plants-Technical Manual". USAEC Report DP-400, Office Tech. Services, U.S. Dept.-Commerce (1959).
- (4) Browning, R.L. "Analyze losses by diagram". Hydrocarbon Processing, Sept. 1975, pp 253-260.
- (5) "CANDU 600 Diseño de Central" PP-28 may, 1976.
- (6) CRANE "Flow of Fluids Trough Valves, Fittings and Pipe". Tech. Paper No. 410 (1965).
- (7) Crocker, S & King, R.C. "Piping Handbook". McGraw-Hill Book Co., 5th. Ed. (1967).
- (8) Dunclee, A.E. "The Heavy Water System of the Process Development Pile". DP-567 Reactor Technology (TID-4500, 16th. Ed.), June 1961.
- (9) Ecabert, R. "Planta de Producción de Agua Pesada en Arroyito, Argentina". Revista Técnica Sulzer. No. 3/4, 1984, pp 9-12.

- (10) ESSE International, Inc. "The Killer H2S". Manual.
- (11) Galley, M.R. & Bancroft, A.R. "Canadian Heavy Water Production -1970 to 1980-". Second World Congress of Chemical Engineering. AECL-7429 (1981).
- (12) Garving, R.G. & Norton, E.R. "Performance of Sieve Tray Under GS Heavy Water Process Conditions-Part II- High Pressure Operation". USAEC Report DP-1025-11 (1967)
- (13) Gibson, S.B. "Risk Criteria in Hazard Analysis". Chem. Eng. Processing. Feb. 1976, pp 59-62.
- (14) Glasstone, S. & Sesonke, A. "Nuclear Reactor" Engineering". D. Van Nostrand Co. Inc., 2th. Ed. (1963).
- (15) Huber, M. y Sperandio, A. "Instalaciones de Rectificación de Agua Pesada". Revista Técnica Sulzer, No. 3, 1970.
- (16) Karassik, I.J., Krutzsch, W.C. & Fraser, W.H. "Pump Handbook". McGraw-Hill Book Co. (1976).
- (17) Kletz, T.A. "Are safety valve old-hat". Chem. Processing Sept. 1974, pp 77-81.
- (18) Kletz, T.A. "Accidents Caused by Reverse Flow". Hydrocarbon Processing, March 1976, pp 187-194.
- (19) Kletz, T.A. "Evaluate Risk in Plant Design". Hydrocarbon Processing, May 1977, pp 297-326.
- (20) Kletz, T.A. "Feature Report". Chem. Eng., April 1, 1985 pp 48-68.

- (21) "La Energía Nuclear en México". Memorias, Feb. 1978.
- (22) Lawley, H.G. "Operability Studies and Hazard Analysis". Chem. Eng. Progress, April 1974, pp 45-56.
- (23) Lawley, H.G. & Kletz, T.A. "High-Pressure-Trip Systems for Vessel Protection". Chem. Eng., May 12, 1975, pp 81-88.
- (24) Lawley, H.G. "Size up plant hazard this way". Hydrocarbon Processing, April 1976, pp 247-261.
- (25) Matheson Gas Products "Hydrogen Sulfide". Manual, pp 319-325.
- (26) Nuclear Engineering International "Survey of Canada". June 1974.
- (27) Occupational Health and Safety International Labour Office, Geneva, 1972, pp 698- 699, 1369-1370.
- (28) Ozog, H. "Hazard Identification Analysis and Control" Chem. Eng., Feb. 18, 1985, pp 161-170.
- (29) Perry, H.H. "Chemical Engineers' Handbook". McGraw-Hill Book, Co., 4th. Ed., Tokyo (1963).
- (30) Petróleos Mexicanos "Reglas Básicas de Seguridad para el Manejo del Acido Sulfhídrico". Boletín de Seguridad Industrial No. 10, México (1978).
- (31) Pilz, V. "Fault tree analysis: how useful". Hydrocarbon Processing, May 1980, pp 275-283.
- (32) Programa de Energía 1982-1988. Diario Oficial.

- (33) Rae, H.K. "Separation of Hydrogen Isotopes". ACS Symposium Series, 68, American Chemical Society (1978).
- (34) Rase, H.F. y Barrow, M.H. "Ingeniería de Proyectos para Plantas de Proceso". CECSA, 7a.Ed., México (1981)
- (35) Sethna, H.N. "El Programa de la Energía Atómica de la India -Pasado y Futuro-". OIEA Boletín Vol. 21 no. 5, pp 2-11.
- (36) Spray, P.H.G. "Fabrication and Construction Experience Bruce and Port Hawkesbury Heavy Water Plants". Tecnica ed Economica della Produzione di Acqua Pesante, Torino, Symposium, 1970 October, Comitato Nazionale Energia Nucleare, Report (1970).
- (37) Texas Analytical Controls, Inc. "H2S Safety Handbook" (1978).
- (38) Turner, B. "Learn from Equipment Failure". Hydrocarbon Processing, Nov. 1977, pp 317-320.
- (39) Verde, L. & Levy, G. "Safety Strategy for Plant Design". Hydrocarbon Processing, March 1979, pp 215-220.
- (40) Vervalin, C>H> "Hazard Evaluation". Hydrocarbon Processing, Dec. 1986, pp 35-40.
- (41) Zmasek, R. "Instalación de Rectificación Sulzer para el Enriquecimiento de Agua Pesada". Revista Técnica Sulzer No. 4, 1972, pp 211-218.