



**Universidad Nacional Autónoma de México**  
**FACULTAD DE QUIMICA**

**INSTALACION Y OPERACION DE UN  
LICUEFACTOR DE HIELO/HIDROGENO**

372

**T E S I S**

Que para obtener el título de

**INGENIERO QUIMICO**

**P R E S E N T A**

**JUAN AURELIO RAMIREZ SALDIVAR**

México, D. F.

1976



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

CLAS. 1051  
ADQ. 1976  
FECHA \_\_\_\_\_  
PROC. 145

357

H. JURADO:

|               |                              |
|---------------|------------------------------|
| PRESIDENTE    | Ing. Hector Sierra Elizondo  |
| VOCAL         | Ing. Antonio Frías Mendoza   |
| SECRETARIO    | Ing. Jorge A. Castañares A.  |
| 1er. SÚPLENTE | Ing. Alejandro Carpy Guillén |
| 2do. SUPLENTE | Ing. Rafael García Nava      |

Sitio donde se desarrolló:

CENTRO DE INVESTIGACION DE MATERIALES

Sustentante:

Juan Aurelio Ramírez Saldivar

Asesor del tema:

Ing. Antonio Frías Mendoza

Agradezco al CENTRO DE INVESTIGACION DE MATERIALES por la valiosa ayuda que me proporcionaron para el desarrollo -- del tema.

Agradezco al Dr. Juan Antonio Careaga V. por la confianza depositada en mi persona para el desarrollo del trabajo.

Agradezco al Dr. Manuel Martínez por la asesoría técnica en el desarrollo del trabajo.

Con todo el cariño y la admiración que se merecen  
a mis Padres:

Juan Ramírez Villanueva (Q.E.P.D.)  
Idolina Saldivar de Ramírez

Que con sus consejos y amor supieron guarme por el  
buen camino y obtener uno de mis grandes anhelos.

A mi Hermana M. Leticia Ramírez Saldivar

Que con su valiosa ayuda moral y económica  
hizo posible la culminación de mi carrera.

Con respeto a mis queridos Hermanos:

Delia  
Ma. Leticia  
Ma. del Refugio  
Margarito Rafael  
Gloria Elena  
Leonor  
Luis Xavier

Con todo mi amor a mi querida Esposa

Bertha Isabel.

## I N D I C E

Pág.

|             |   |  |
|-------------|---|--|
| Capítulo 1. | INTRODUCCION .....  |  |
| Capítulo 2. | TECNICAS DE LICUEFACCION .....                            |  |
| 2.1         | Introducción.....   |  |
| 2.2         | Principios de la licuefacción...                          |  |
| Capítulo 3. | METODO COLLINS .....                                      |  |
| 3.1         | Introducción.....   |  |
| 3.2         | Principio del método.....                                 |  |
| 3.3         | Sistema de recuperación.....                              |  |
| 3.4         | Componentes principales<br>del sistema.....               |  |
| Capítulo 4. | OPERACION DEL LICUEFACTOR .....                           |  |
| Capítulo 5. | ACONDICIONAMIENTO DE AREA Y<br>SERVICIOS AUXILIARES ..... |  |
| Capítulo 6. | EJEMPLO DE OPERACION .....                                |  |
| Capítulo 7. | CONCLUSIONES Y COSTOS .....                               |  |

C A P I T U L O     1

INTRODUCCION (1) (3)

El Helio fue descubierto por el astrónomo francés Pierre J.C. Janssen. Durante el eclipse solar de 1868 notó una nueva línea en el espectro solar. Llamó al elemento Helio, según el nombre del dios del sol en la mitología griega.

El Helio es el segundo elemento más ligero en la tabla periódica; no tiene olor, ni color y además no es tóxico. No forma compuestos químicos con ningún otro elemento conocido y tiene la más baja solubilidad en agua que cualquier gas. Su punto de ebullición es a 4.2 K (-452 F, -268.9 C), siendo el más bajo de todos los elementos conocidos.

Hace tres décadas el uso de Helio líquido era restringido a pocos laboratorios. Esta situación ha cambiado completamente, habiendo un incremento en la producción y uso del líquido.

El Helio líquido fue producido por primera vez en Leiden por el físico holandés Kamerlingh Onnes, en 1908. Aunque algunos científicos estuvieron intrigados con sus propiedades, en los siguientes cuarenta años sólo se construyeron media docena de laboratorios criogénicos. Para el diseño y construcción de los primeros licuefactores se requirió de un gran esfuerzo y desembolso de dinero y pocas veces se obtuvieron buenos resultados.

En 1946, el profesor Samuel C. Collins, del Instituto Tecnológico de Massachusetts, completó un licuefactor de Helio, al cual le llamó "Crióstatato de Helio"; su diseño fue más simple y eficiente que

cualquier otro liquefactor previamente construido.

Cuando el gas Helio se licúa, su volumen es reducido aproximadamente por 1/700 en condiciones estándar (temperatura y presión estándar: 25°C y 760 mm Hg ). Se puede visualizar esta reducción con el siguiente ejemplo:

Se tiene 1 m<sup>3</sup> de Helio en un balón y se aplica un refrigerante para enfriarlo, su presión decrecerá debido al decremento en la velocidad de las moléculas del gas. Si se quiere conservar el balón a la presión y volumen inicial, se debe bombear mas gas hacia su interior. Si se continúa enfriándolo, primero, hasta que el Helio alcance su temperatura de licuefacción y después, hasta que todo el gas sea licuado, se habrá bombeado casi 700 m<sup>3</sup> de gas dentro del balón para retener 1 m<sup>3</sup> de volumen a una atmósfera de presión. Es decir, partiendo de temperatura y presión estandar (STP), 700 unidades cúbicas de gas Helio se necesitan para rproducir 1 unidad cúbica de Helio líquido.

Debido a que en el laboratorio rara vez se tienen las condiciones STP, es necesario aplicar la siguiente fórmula, para hacer una aproximación:

$$0.765 \times \frac{273 + \text{temp. } (^\circ\text{C})}{298} \times \frac{760}{\text{presión barométrica (mmHg)}} = \text{m}^3 \text{ de gas necesarios para producir 1 lt. de liquido.}$$

El pensar en las necesidades por las cuales atraviesan algunos centros de trabajo (investigación) y la importancia que tiene para la investigación pura y aplicada del conocimiento, han propiciado el estudio -

para la obtención y manejo de los fluidos criogénicos, como son el Helio y el Hidrógeno líquidos.

El primero aparece en las propiedades de los superfluidos y también como un refrigerante en fenómenos de superconducción; el segundo es también importante como fluido criogénico, pero con otras aplicaciones más enfocadas para su empleo en las ramas de la ingeniería nuclear e ingeniería espacial.

C A P I T U L O    2

TECNICAS DE LICUEFACCION

## 2.1 Introducción

Hace tres décadas, el uso de helio e hidrógeno era restringido comparativamente a pocos laboratorios. Esta situación ha cambiado completamente, habiendo un incremento en el uso de ambos líquidos.

Antes de 1939, para licuar ambos gases, los licuefactores estaban basados sobre el efecto Joule-Thompson y baños de pre-enfriamiento (Linde, Simon, etc.), habiendo una notable excepción: el de Kapitza, que utiliza una máquina de expansión.

El uso de máquinas de expansión acarrea muchas dificultades y solamente pocos laboratorios de universidades pudieron dominar esta tecnología.

No fue sino hasta los años de 1940, cuando Jacobs y Collins registraron la construcción y uso de máquinas de expansión para la licuefacción de helio, las cuales dieron un gran avance en estas técnicas.

## 2.2 Principios de la licuefacción (técnicas)

### A) Método de Simon (2)

Este método se ha usado en una forma extensiva; su diseño se muestra esquemáticamente en la Fig. 2-1.

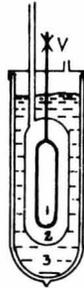


FIG. 2.1

El principio consiste en que el helio gas se comprime isotérmicamente en el interior de la cámara 1, a una presión de 100 atm y manteniendo una temperatura de  $15^{\circ}\text{K}$ , existiendo una transferencia de calor por medio del gas (He) de intercambio en el espacio 2, a un baño de hidrógeno líquido que está a una presión reducida en el recipiente 3.

La temperatura inicial puede bajarse a  $10^{\circ}\text{K}$ , reduciendo aún más la presión sobre el hidrógeno líquido, o sea, abajo de la presión de su punto triple. Entonces, el gas de intercambio es removido de la cámara 2 y el helio comprimido de la cámara 1 es expandido al abrir la válvula V, hasta alcanzar la presión de 1 atm. De esta forma, el gas que permanece en la cámara se enfría adiabáticamente a la temperatura final  $T_c$  (igual a la temperatura de licuefacción).

B) Método Joule-Thomson (2)

Este método se emplea en un licuefactor cuyo diagrama esquemático se muestra en la Fig. 2-2. Las partes principales de éste son los intercambiadores de calor, los baños de pre-enfriamiento y la válvula J-T.

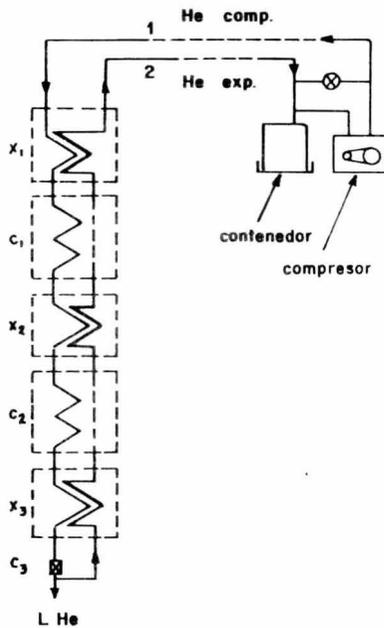


FIG. 2.2

Diagrama de flujo.-

El gas helio, al ser comprimido en el compresor, se alimenta al licuefactor a través de la línea 1, pasando por el primer intercambiador de calor ( $x^1$ ),

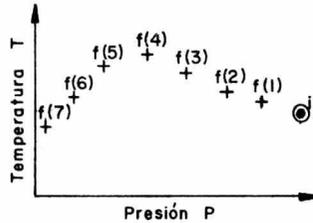
Después llega el baño de pre-enfriamiento ( $C_1$ ), pudiendo ser el contenido de éste, aire, nitrógeno u oxígeno líquidos. En esta etapa sufre un abatimiento en la temperatura, que es igual a la temperatura del líquido con que se lleva a cabo el enfriamiento. Posteriormente, el gas helio pasa al segundo intercambiador ( $X_2$ ), en donde su temperatura bajará un poco más, al contacto térmico con los vapores que salen del segundo baño de pre-enfriamiento ( $C_2$ ), que contiene hidrógeno líquido. Al pasar por  $C_2$ , el gas se volverá a enfriar hasta la temperatura a la cual se encuentre el hidrógeno líquido.

Por último, el gas helio pasa por la válvula Joule-Thomson al recipiente donde se recogerá el helio líquido. Como las temperaturas a las que se puede encontrar el hidrógeno líquido son menores que la temperatura de inversión del helio, el gas se enfriará debido al efecto Joule-Thomson. Todo este proceso se repetirá hasta que la temperatura del gas, a la salida de la válvula J-T sea 4.2 K, instante en el que se obtiene helio líquido.

El proceso que se lleva a cabo en la válvula J-T se conoce como Efecto Joule-Thomson.(4) Este consiste en hacer pasar un gas a través de un tapón poroso (válvula J-T) de un recipiente de alta presión a otro recipiente de menor presión, donde el gas sufre un estrangulamiento. Dichas presiones se mantienen constantes por medio de una bomba.

El proceso se repite varias veces, conservando  $P_i$  y  $T_i$  su mismo valor y modificando  $P_f$  se obtendrán sus  $T_f$  respectivas en cada caso. Los resultados pro

veen un conjunto de puntos, los cuales se muestran en la Fig. 2-3, que representa un diagrama T-P.



ESTADOS ISENTALPICOS DE UN GAS

FIG. 2.3

La curva formada no se refiere a un gas en particular, es típica de muchos gases. Se puede observar que si un proceso de estrangulamiento toma lugar entre los estados  $P_i$   $T_i$  y  $P_f$   $T_f$ , hay una caída en la temperatura. En general, el cambio de temperatura de un gas pasando a través de un tapón poroso depende de las tres cantidades  $P_i$ ,  $T_i$  y  $P_f$ , y puede haber un incremento o decremento, o no podrá haber cambio en  $T_f$ .

Los ocho puntos graficados representan los estados de equilibrio de algunas masas constantes del gas, en el cual el gas tiene la misma entalpía, y por eso las curvas obtenidas son llamadas curvas isentálpicas. Todos los estados de equilibrio del gas correspondientes a esta entalpía pueden situarse sobre la curva, y es razonable asumir que esta curva puede ser obtenida trazando una curva contínua a través de los puntos discretos. Se designa por Temperatura de Inversión a la que está definida por el má-

en la curva de la Fig. 3-3.

C) Método Linde (1)

El principio de operación de este método está basado en el efecto Joule-Thomson y dos etapas de pre-enfriamiento (las cuales son de hidrógeno líquido (LH<sub>2</sub>) y nitrógeno líquido (LN<sub>2</sub>)). El diagrama esquemático de un licuefactor empleando este método se muestra en la Fig. 2-4.

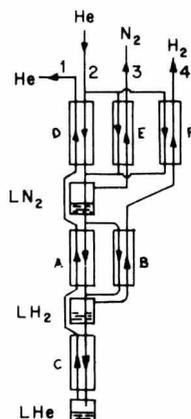


FIG. 2.4

Las etapas de pre-enfriamiento son necesarias para llevar el gas de alta presión a la temperatura de inversión correspondiente a la presión usada.

Las Tablas 1 y 2 del Apéndice dan la entalpía y entropía del helio en función de la temperatura y presión. Con estos valores han sido construidas las Figs. 2-5 y 2-6, las cuales dan curvas para la variación de la presión óptima y el coeficiente de licue-

facción en función de la temperatura del baño de pre-enfriamiento, respectivamente.

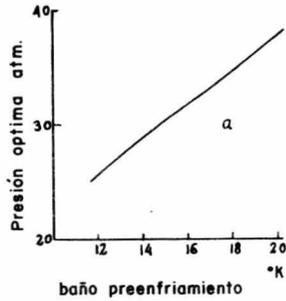


FIG. 2.5

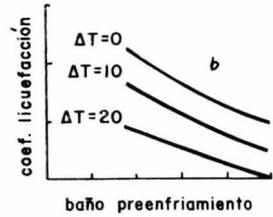


FIG. 2.6

El sistema de cambiadores de calor sobre los baños de pre-enfriamiento son necesarios para efectuar una economía razonable.

#### Diagrama de flujo.-

Según el esquema que se muestra en la Fig. 3-4, la alimentación de gas helio de alta presión se hace por medio del tubo (2), el cual se ramifica para pasar por los intercambiadores (D,E,F), y aprovechar un intercambio térmico con los vapores tanto de nitrógeno, como de hidrógeno y helio.

Posteriormente, esta ramificación se une para pasar a través del baño de pre-enfriamiento con LN<sub>2</sub> para bajar la temperatura del gas a 78 K.

A continuación, el camino de dicho gas se vuelve a ramificar para pasar por los intercambiadores de calor (A,B) y ser enfriado por los vapores de hidrógeno y helio. La tubería se vuelve a unir para que el gas se enfríe a una temperatura de 20 K, al pasar

por el baño de pre-enfriamiento con  $\text{LH}_2$ .

Finalmente, el gas pasa por el último intercambiador (C) para reducir aún más su temperatura, al intercambiar calor con los vapores de helio. Dichos vapores provienen del gas de entrada, después de haber pasado por la válvula Joule-Thomson que se localiza a la entrada del recipiente (H).

Este proceso se repite hasta que la temperatura del gas que sale de la válvula Joule-Thomson sea  $4.2^\circ\text{K}$ , momento en el que se comienza a recolectar helio líquido en el recipiente (H).

#### D) Método Kapitza (2)

Lo más importante de este método es el empleo de una máquina de expansión, que viene a sustituir a la etapa de enfriamiento con  $\text{LH}_2$ .

El diagrama de flujo se muestra en la Fig. 2-7, donde el recipiente (N) contiene  $\text{LN}_2$ . El helio se alimenta a una presión de 30 atm por el tubo (1), pasando por el intercambiador de calor (A) que es enfriado por los vapores de  $\text{LN}_2$ . A continuación, el gas pasa a través del baño de pre-enfriamiento de  $\text{LN}_2$  (N), para llegar a la máquina de expansión (E) por medio del intercambiador de calor (B). En la máquina de expansión, el gas efectúa un trabajo disminuyendo su energía interna y, por lo tanto, bajando su temperatura. El gas que sale de dicha máquina enfría al gas de entrada de alta presión en los intercambiadores (C) y (B). Finalmente, el gas pasa por una válvula Joule-Thomson (4), abatiéndose su temperatura si

se ha alcanzado la temperatura de inversión. Dicho gas sirve para enfriar al de alta presión en el intercambiador (D).

El proceso se repite hasta que la temperatura del gas de salida de la válvula Joule-Thomson sea de 4.2 K, momento en el cual el helio líquido se recoge en el recipiente (E). Las válvulas (6) y (7) sirven para regular la presión del gas en el intercambiador de calor (D) y para transferir el helio líquido, respectivamente.

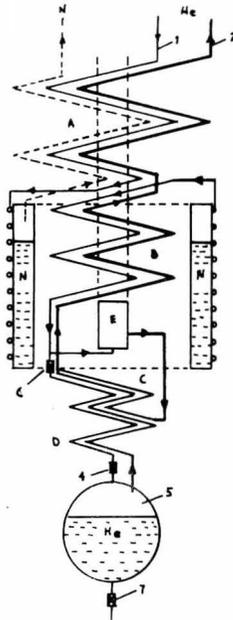


FIG. 2.7

C A P I T U L O        3

METODO COLLINS (3)



El regulador de presión (2) a la salida del múltiple reduce la presión de alimentación de los cilindros a 250 psig. antes que el gas entre al absorbedor criogénico.

El gas helio llega al licuefactor (6), como sea requerido, del contenedor por medio de los compresores (5). El gas que aún no ha sido licuado regresa al contenedor por la línea de retorno de baja presión para reciclarlo.

### 3.2 Proceso de licuefacción

El helio dentro del licuefactor ADL-Collins se enfria en tres caminos:

- 1) por intercambio de calor
- 2) por el trabajo realizado por las máquinas de expansión
- 3) por el efecto Joule-Thomson de enfriamiento

Como se muestra en la Fig. 3-2, el gas caliente de entrada es primero enfriado progresivamente dentro del intercambiador de calor principal, por intercambio de calor con el gas más frío que está saliendo.

Normalmente el nitrógeno líquido se usa para un enfriamiento previo; éste entra por una bobina que está colocada en el extremo anterior al intercambiador de calor principal. Después que el gas ha sido

pre-enfriado, toma uno de los tres caminos: dos de esos caminos conducen a las máquinas de expansión, en cada máquina el gas se expande por desplazamiento del pistón, cada pistón es conectado a una carga que resiste el desplazamiento; puesto que el gas efectúa un trabajo sobre el sistema, el nivel de energía y la temperatura del gas son reducidos de acuerdo con el trabajo desarrollado.

Cuando el gas pasa a través de las máquinas de expansión, su presión es reducida de 210 psig aproximadamente, hasta una presión ligeramente mayor que la atmosférica.

Después de dejar las máquinas de expansión, el gas frío junto al gas que fluye saliendo del intercambiador ayuda al gas que está entrando.

El tercer paso conduce vía cambiador Joule-Thomson a la válvula Joule-Thomson. Ahora, aproximándose a esta válvula, la temperatura del helio ha sido reducida a la temperatura de inversión (aproximadamente 37 K). El gas se expande a través de la válvula sin ningún decremento en la temperatura. Sin embargo, después que la temperatura del gas ha sido llevada aproximadamente por abajo de la temperatura de inversión, en este momento se produce un efecto de enfriamiento (efecto de enfriamiento Joule-Thomson) durante la expansión.

Como el enfriamiento del equipo continúa, la temperatura del gas aproximándose a la válvula J-T viene bajándose más, hasta que una porción del gas se licúa. La temperatura resultante de la mezcla,

tanto del gas como del líquido, es aproximadamente 4.2 K. Esta temperatura permanecerá constante después de esto, previendo que la presión en el otro lado de la corriente de la válvula permanezca constante.

Después se inicia la producción de LHe; sin embargo, la proporción relativa de líquido en las dos fases se incrementa hasta que un estado estable sea alcanzado.

En tales condiciones, cierta cantidad del gas pasa a través de la válvula J-T y es licuada, pudiendo colectarse dentro del Dewar interno. El licuefactor está provisto de un tubo para remover este líquido (RDT). Este tiene en su extremo más lejano una válvula J-T que puede ser usada (a opción del operador) en lugar de la J-T interna. Cuando se emplea este tubo (RDT) y además la válvula J-T externa, el líquido se podrá colectar en un Dewar externo.

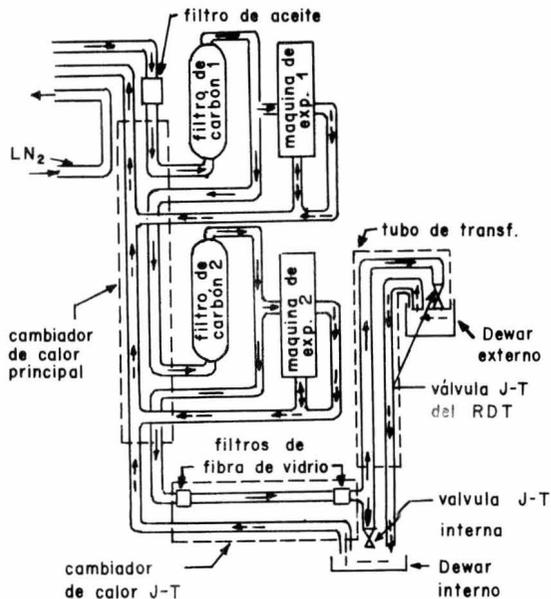


FIG. 3.2

### 3.3 Técnica para licuar hidrógeno en el licuefactor ADL-Collins

Flujo de gas dentro del sistema.-

El hidrógeno se alimenta del banco de cilindros (1) y pasa a través del regulador de presión (2), - en el cual la presión se reduce aproximadamente a 20 psig. Entonces el hidrógeno se alimenta al sistema - de purificación (accesorios opcionales). Aquí, cualquier cantidad de oxígeno que entre combinado con hidrógeno y en presencia de un catalizador, forma vapor de agua. Este vapor de agua más el que está presente en la alimentación de gas, es después removido de la corriente de gas por el adsorbedor criogénico (3), - incluido en el sistema de repurificación.

El hidrógeno entra al licuefactor a través de una brida espaciadora, instalada entre la brida 2 y la brida 3. En el licuefactor el gas fluye hacia el interior a través de un tubo entre el cambiador de calor principal y la pared del dewar interno. En esta etapa existe un intercambio de calor en el intercambiador de calor principal con el gas Helio que se está reciclando, según se muestra en la figura 3-5.

El sistema Joule-Thomson queda aislado cerrándose la válvula J-T interna, y el gas que sale de la máquina de expansión No. 2 se recicla por la línea de - baja presión. Cuando se alcance una temperatura de - 18 °K y se mantenga constante, se podrá licuar hidrógeno, el cual se colectará en el Dewar interno.

La válvula "check" entre el espacio de licuefacción y la línea de regreso de baja presión del circuito de Helio se abrirá siempre y cuando la presión del Dewar interno caiga abajo de la presión de la - -



Recuperación externa.-

Cuando se va a recuperar helio, ya sea de los equipos de los laboratorios, como son: Dewar, criostatos, o del mismo licuefactor cuando sea parado por una mala función, la etapa comenzará como se muestra en la Fig. 3-5.

El gas a través de la línea de recuperación (1) entra a la bolsa de gas (2), la cual al llenarse a su capacidad hará actuar al compresor (5) por medio de un alambre (3) colocado en la parte superior de la bolsa de gas, que acciona al interruptor automático (4) del compresor. El compresor introducirá al gas en los cilindros que están conectados en el banco de cilindros impuros (6).

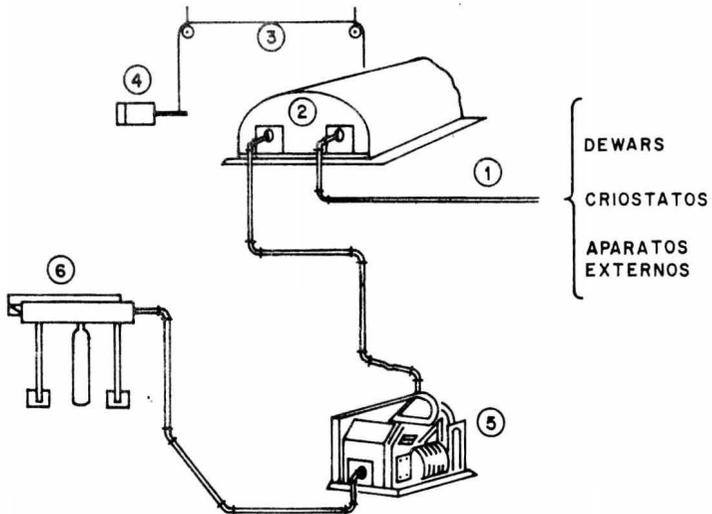


FIG. 3.5

### Recuperación interna o reciclaje.-

Esta se lleva a cabo cuando el gas que no ha sido licuado regresa al contenedor por la línea de baja presión, siendo posteriormente reintroducido al licuefactor por los compresores.

## 3.5 Componentes del sistema

### 3.5.1 Recuperación externa.-

1) Bolsas para gas.- La presión normal de operación para estas bolsas es menor que 1 pulgada de agua (2.5 cm de agua). Estos tienen una válvula diseñada para abrirse a una presión de 4 pulgs. de agua y sirve para protegerlas de posibles rupturas.

2) Control para las bolsas.- Este simple control está conectado a las bolsas por un alambre de diámetro pequeño; cuando las bolsas están llenas o vacías, el control enciende o para el compresor como sea requerido.

3) Compresor.- Este equipo se muestra en la Fig. 3-6. Es un compresor estándar de aire, el cual ha sido modificado de la siguiente manera:

a) El tubo de escape del cigüeñal ha sido conectado en la entrada de la primera etapa. Esta conexión permite al gas que escape pasar por los anillos del pistón y regresar a la caja del cigüeñal para recomprimirse.

b) El interruptor de vacío en la entrada de la primera etapa parará al compresor siempre que



- 1- Válvula de control  
(para almacenar gas impuro)
- 2- Válvula de control  
(para repurificar)
- 3- Válvula solenoide alimentación  
de gas impuro
- 4- Interruptor de temperatura  
(tercera etapa)
- 5- Interruptor de temperatura  
(primera etapa)
- 6- Válvulas para drenar  
condensados
- 7- Interruptor para altas  
presiones
- 8- Arrancador del motor
- 9- Interruptor de vacío
- 10- Filtros de descarga  
(5- Micron)

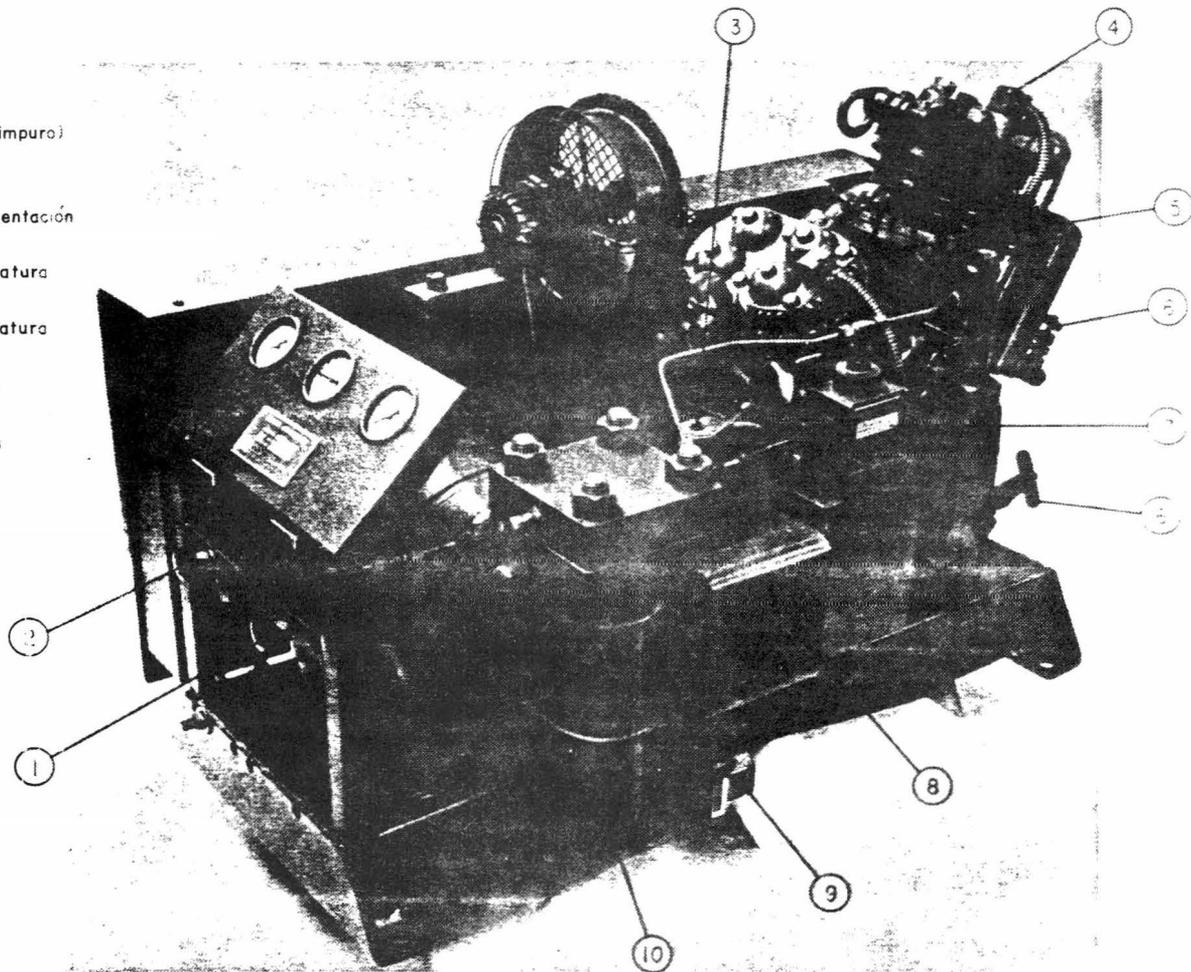


FIG 3.6

### 3.52 Sistema de alimentación de helio.-

El diagrama de flujo se muestra en la Fig. 3-7.

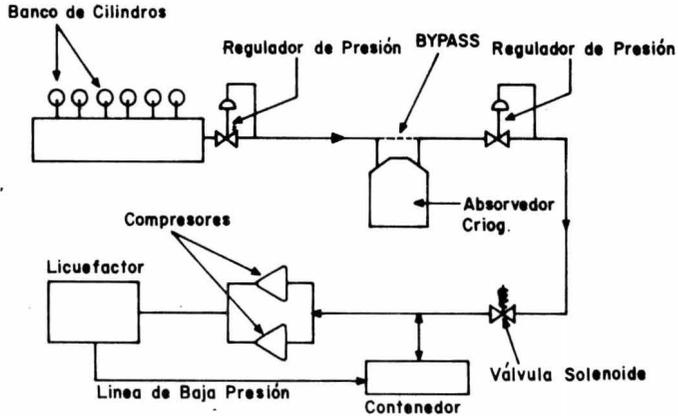


FIG. 3.7

Sus componentes principales son:

A) Banco de cilindros.- Este banco puede constar de 6, 18 ó 24 unidades, las cuales cada una tiene capacidad para  $6.5 \text{ m}^3$  de gas. Además, tiene un regulador de presión el cual puede ajustarse a una presión de salida de acuerdo a los requisitos del sistema.

B) Absorbedor criogénico.- Este equipo es conocido como una "trampa". Aquí el nitrógeno y todas las impurezas que poseen un punto de congelamiento más alto que la temperatura del nitrógeno líquido, son removidas de la corriente del gas. El casco del absorbedor es de acero, excepto la cabeza, la cual es de acero inoxidable. Las partes de las que está

constituido se indican en la Fig. 3-8.

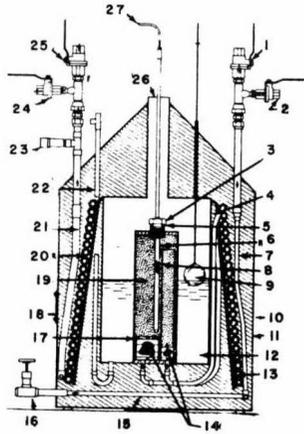


FIG. 3.8

- 1- VALVULA DE ALIMENTACION
- 2- VALVULA DE ENTRADA
- 3- TAPON DE LLENADO DE CARBON
- 4- RECIPIENTE PARA LN<sub>2</sub>
- 5- RONDANA DE ALUMINIO
- 6- FUNDA DEL REGENERADOR DE CALOR
- 7- LINEA DE ALIMENTACION
- 8- REGENERADOR DE CALOR
- 9- FLOTADOR DE NIVEL DEL LN<sub>2</sub>
- 10- CORAZA
- 11- AISLAMIENTO
- 12- LN<sub>2</sub>
- 13- EJE DE SOPORTE
- 14- FILTROS DE FIBRA DE VIDRIO
- 15- LINEA DE PURGA
- 16- VALVULA DE PURGA
- 17- ELEMENTO
- 18- DISCO DE RUPTURA
- 19- CARBON ACTIVADO
- 20- CAMBIADOR DE CALOR A CONTRA CORRIENTE
- 21- LINEA DE RETORNO
- 22- LINEA DE DRENAJE DE LN<sub>2</sub>
- 23- VALVULA DE ALIVIO
- 24- VALVULA DE SALIDA
- 25- VALVULA DE RETORNO DE LA TRAMPA
- 26- ABERTURA DE LA TRAMPA
- 27- CONEXION PARA REGENERADOR DE CALOR

Las características principales del absorbedor son:

El recipiente de acero inoxidable para nitrógeno líquido que forma la pared interna de la trampa tiene a su alrededor enrollado un tubo de alimentación y la línea de retorno que constituye un intercambiador de calor a contra-corriente.

El espacio entre las paredes está lleno de un aislante para reducir la transmisión de calor por el recipiente de nitrógeno líquido. Contiene un disco de ruptura para protección de las paredes cuando suceda una anomalía, ya sea baja o alta presión en el espacio aislado.

El elemento de la trampa es un carbón activado especial. Posee filtros de fibra de vidrio, ambos a la entrada y salida del contenedor de acero inoxidable, que reducen la migración de partículas de carbón.

C) Contenedor.- Después que el gas de alimentación sale del absorbedor criogénico, la presión es reducida a 12 psig por el regulador de presión y entra al contenedor, cuya operación automática es controlada por la válvula de solenoide.

Sus tres funciones principales son:

- 1) Mantener una presión de retroceso uniforme sobre el sistema;
- 2) Proveer un espacio de almacenamiento para el gas expandido; y
- 3) Proveer el gas (purificado) para el sistema a la velocidad requerida.

Además, se puede utilizar para detectar la existencia de fugas en el sistema y para la medición de la razón de licuefacción del helio.

Las partes principales de que está constituido se muestran en la Fig. 3-9.

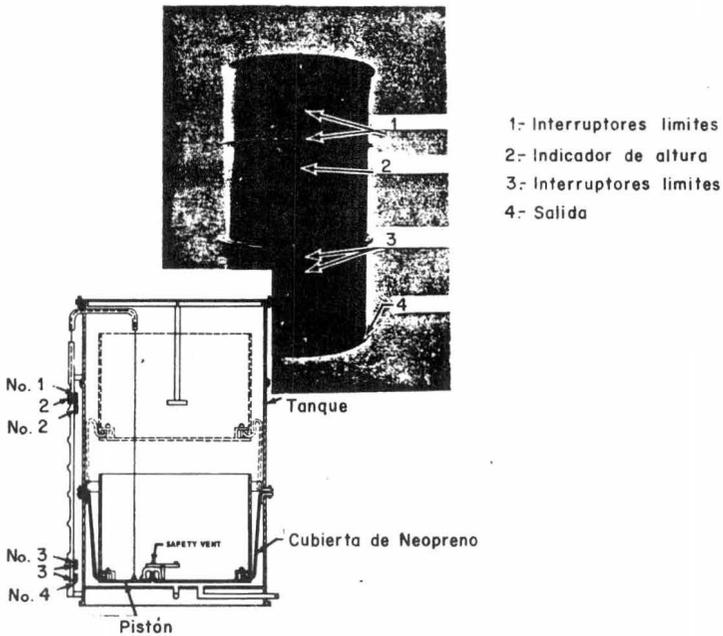


FIG. 3.9

D) Compresores de helio.- Estos tienen tres funciones principales:

i) Proveen gas helio comprimido para el licuefactor.

ii) Actúan como una bomba de vacío para remover impurezas del sistema antes de empezar la operación de licuefacción.

iii) Reducen la presión de vapor sobre el helio líquido almacenado en el interior del licuefactor.

Dichos compresores constan de dos bombas de doble paso; éstas están conectadas en serie y son

puestas en movimiento por un motor de 15 HP y 3 fases.

Como se muestra en la Fig. 3-10, la unidad conteniendo el 1er. y 3er. pasos son ligeramente más grandes que las que contienen las etapas 2a. y 4a.

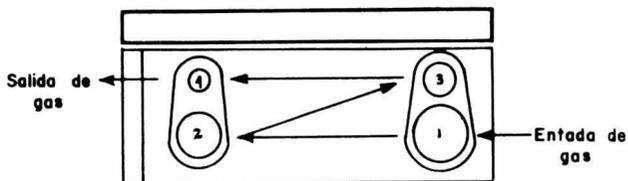


DIAGRAMA DE PASOS COMPRESOR

FIG. 3.10

La presión de helio en la entrada del compresor es mantenida ligeramente arriba de la presión atmosférica por el contenedor.

El gas es comprimido en la cuarta etapa, aproximadamente a 250 psig. El radio de compresión es relativamente bajo en cada etapa y el calor de compresión es correspondientemente bajo. El sistema de enfriamiento se hace por medio de agua, la cual también enfría al gas que deja cada etapa.

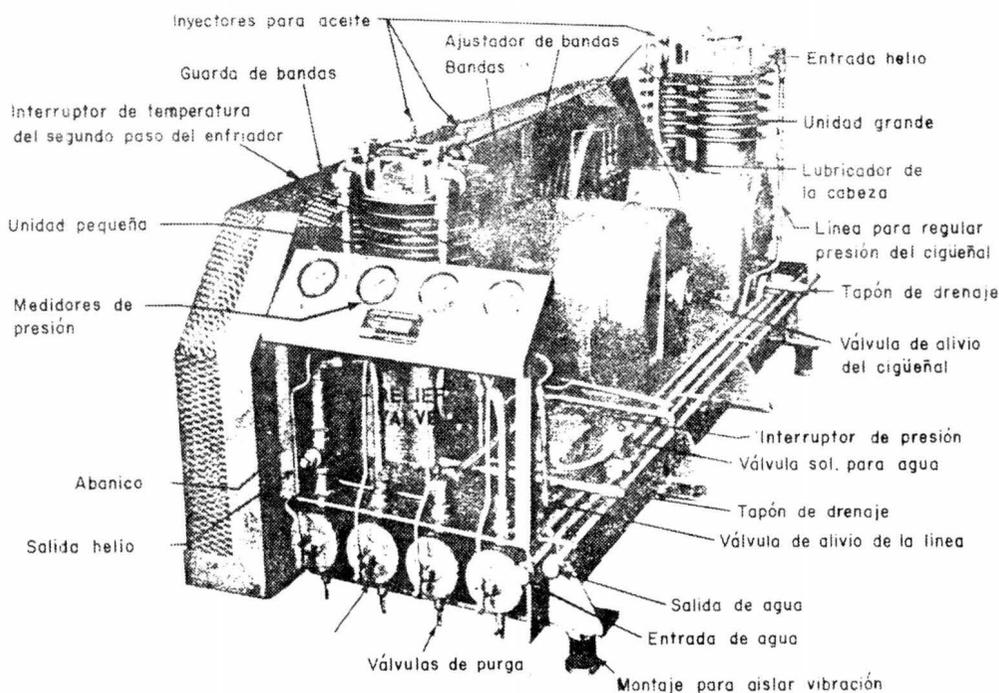
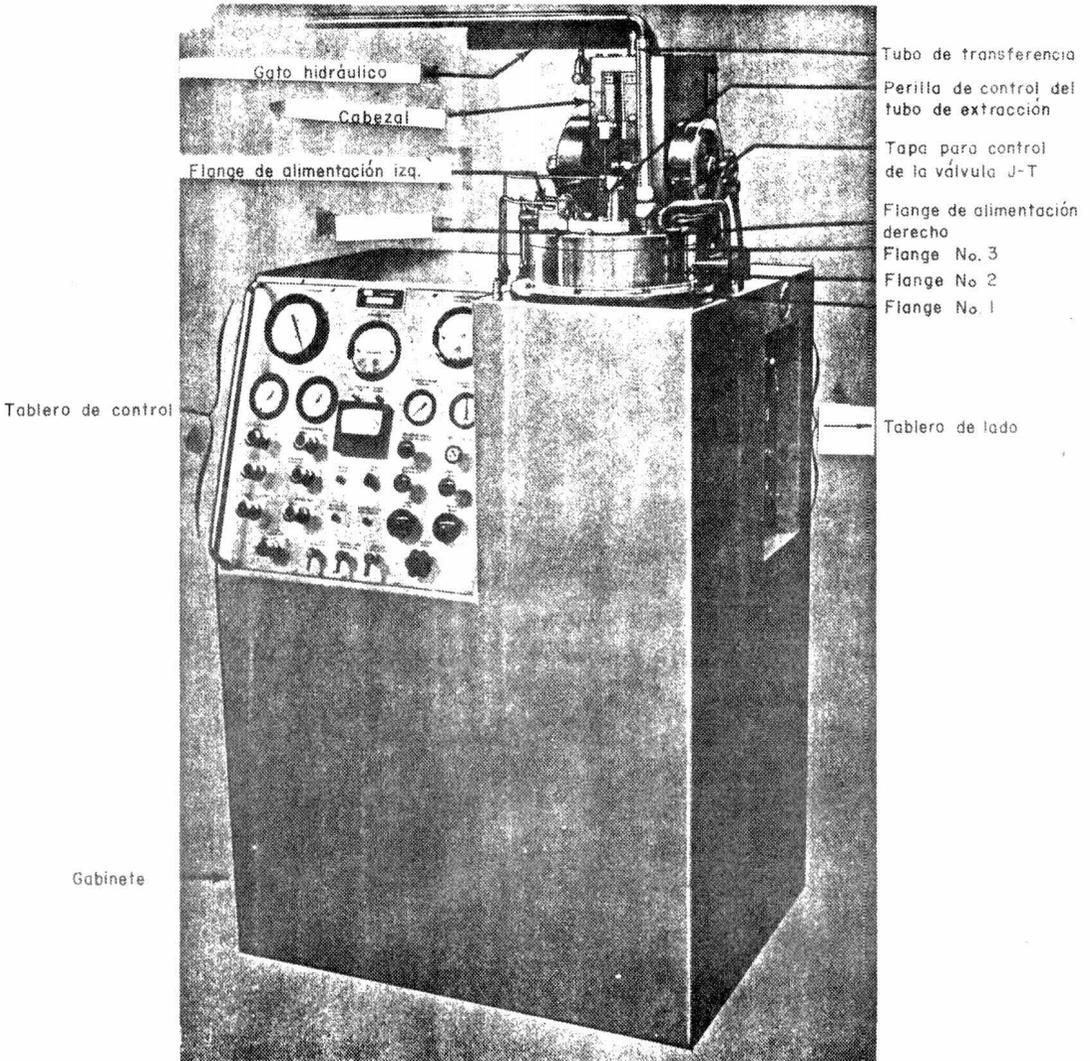


FIG. 3.11

### 3.53 Licuefactor.-

En este aparato es donde se lleva a cabo la licuefacción. Sus principales componentes son:

A) Intercambiador de calor principal.- Este consiste de dos capas de acero inoxidable, cada una de las cuales termina en cono en uno de sus extremos. La tubería con una arista en forma de aleta, es pri-

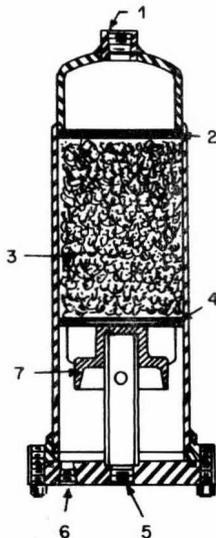


mero enrollada alrededor de la capa interior y la capa exterior es prensada para completar el arreglo. Un alambre es enrollado helicoidalmente sobre el lado externo de la capa exterior, como se muestra en la Fig. 3-19.

Este modelo está provisto de cuatro conectores, como se muestra en la figura. Dos de ellos se usan para conducir el gas helio de este cambiador a las máquinas de expansión; los otros dos conectores se usan para el regreso del gas expandido a este intercambiador de calor. El gas helio comprimido que está entrando fluye a través del tubo hacia el intercambiador de calor particular. El flujo hacia arriba de gas expandido de las máquinas (y de la sección J-T) regresa por el orificio que se forma entre la aleta, el tubo y las capas.

B) Sistema de purificación de gas interno.-

1) Filtro de aceite.- Todo el gas helio que entra al licuefactor primero pasa por un filtro, (el cual se muestra en la Fig. 3-12), que está montado en el interior del gabinete.



- 1- Conexión de entrada
- 2- Retenedor tipo malla
- 3- Elemento de colchoneta de vidrio
- 4- Retenedor tipo malla
- 5- Conexión de salida
- 6- Conexión de purga
- 7- Sombrilla

FIG. 3.12

El elemento de fibra de vidrio, con las trampas de tipo malla, sirven ambos para quitar las impurezas salidas de la corriente de gas y las partículas con aceite aglomerado. La pieza en forma de paraguas (4) localizada en la parte de abajo del elemento, cambia la dirección de la corriente del gas muy repentinamente. Fuerzas inerciales causan la condensación de impurezas. Tales condensados y el aceite recogido abajo del paraguas se sacan durante el procedimiento de encendido, por medio de una válvula sobre el panel de control.

2) Filtro de carbón.- La función de este filtro es absorber algunas impurezas que puedan haber pasado a través del filtro de aceite y del absorbedor criogénico. Todo el gas que entra por la máquina 1 puede pasar por el filtro de carbón No. 1 y todo el gas que entra por la máquina de expansión 2, o por la sección J-T, puede pasar a través de ambos filtros.

El elemento de cada filtro es un carbón activado especial. Las capas de lana de fibra de vidrio en los extremos, como se muestra en la Fig. 3-13, sirven para reducir la migración de partículas de carbón. El elemento del filtro, el cual opera aproximadamente a 100 K, absorbe tales impurezas como aire, vapor de aceite y dióxido de carbono.

También el vapor de agua y aceite que se han condensado tanto en el cambiador de calor principal como en el filtro No. 1, serán drenados sobre la sección tubular  $\Omega$  cuando la máquina se pare. Durante el encendido, el operador saca el líquido acumulado por medio de la válvula localizada en el

panel control. El filtro No. 2 opera también a una temperatura baja y tiene el mismo funcionamiento.

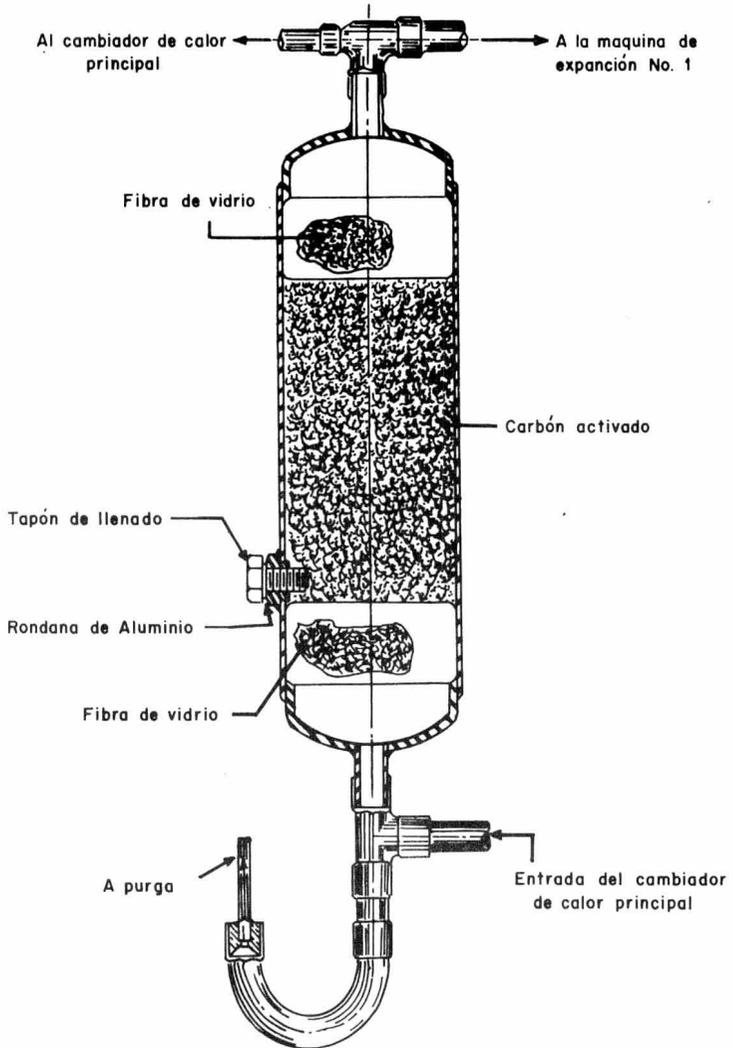


FIG. 3.13

C) Partes donde se lleva a cabo la expansión de gas.-

1) Máquinas de expansión.- La fig. 3-14 muestra un corte seccional de una máquina de expansión típica.

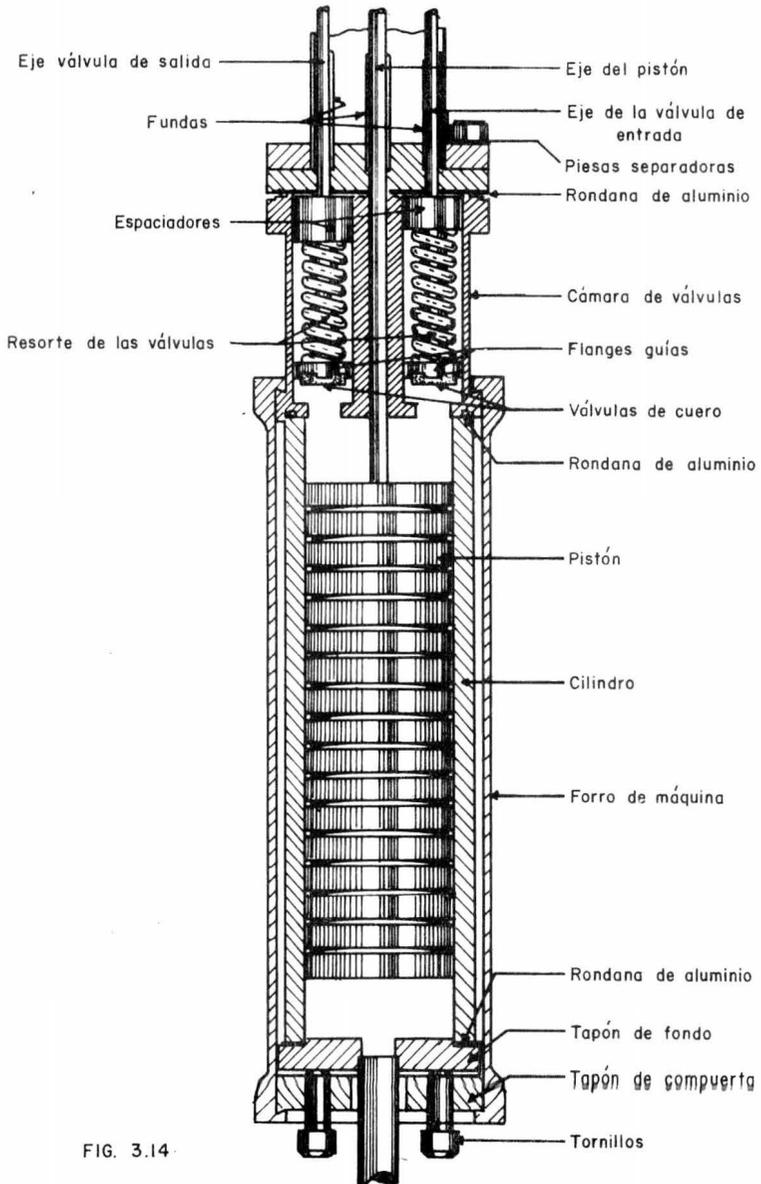


FIG. 3.14

Las máquinas de expansión son de un diseño especial de una sola acción. Puesto que las válvulas son cerradas por resortes montados en el interior de la cámara de la válvula. Las flechas, que sirven para abrir y cerrar la válvula, solamente experimentan esfuerzos de tensión. Estas son delgadas y conducen una cantidad mínima de calor de los alrededores a las regiones frías del licuefactor.

La tubería, que está en el fondo del cilindro, sirve para conducir el gas a la línea de retorno y además para igualar la presión tanto de arriba como de abajo del pistón durante el golpeteo.

Consecuentemente, los ejes de los pistones también experimentan solamente fuerzas de tensión. Por tanto, los ejes son delgados y las fugas de calor a lo largo de ellos son mínimas.

Los pistones y cilindros están compuestos de un acero especial nitrado. La superficie, abundantemente nitrada, resiste el uso y la fractura. Además, están pulidos juntos para una claridad cuidadosamente establecida.

Durante la operación, el gas fluye a través del espacio de esta separación, actuando como un lubricante, y mantiene el pistón centrado en el cilindro. Las flechas tanto del pistón como de las válvulas están encerradas dentro de una funda conveniente, que se extiende junto con las flechas a través del flange No. 3.

En rumbo, ellas pasan a través de las distancias de las piezas que localizan las máquinas de expansión con respecto al flange No. 3. Las fun-

das terminan dentro de la caja.

Los detalles de esta caja se muestran en la Fig. 2-11. Alrededor de cada flecha del pistón hay una guía de bronce, un anillo de neopreno y un fieltro lubricante. La posición de este fieltro es tal que la máxima lubricación será aplicada a la sección del eje que escurre a través del anillo.

La función primaria de la resistencia a la tuerca es para evitar un daño a la flecha del pistón durante su ajuste; también sirve para retener el anillo y la guía en buena posición.

Un segundo anillo en el extremo inferior de la caja sirve como un sello estático para la funda de la flecha. El empaque de las flechas de las válvulas es similar. Las guías de bronce están insertadas en la caja que retiene a los fieltros lubricantes en su lugar.

2) Ciclo de la máquina de expansión.- Mientras el pistón en su choque llega cerca del tope, la válvula de entrada se abre y el gas helio comprimido fluye hacia dentro del cilindro. El gas ejerce una fuerza en contra de la cara del pistón, haciendo que éste se mueva hacia abajo.

La velocidad a que viaja el pistón es tal que el gas continúa entrando al cilindro a una presión casi constante, hasta que la válvula de entrada se cierra. Después, el gas en el cilindro forzará al pistón hacia abajo y el gas se expandirá. Por el trabajo efectuado por el gas sobre el pistón, su temperatura bajará progresivamente. La presión

decrece casi a la presión atmosférica.

Durante el movimiento descendente del pistón, la energía es almacenada en el disco giratorio del cabezal. Esta energía almacenada es entonces usada para mover al pistón hacia arriba durante el movimiento de salida.

Cerca del comienzo del movimiento hacia arriba, la válvula de salida se abre para expeler el gas frío expandido, y el gas viaja, vía la línea de salida de retorno, al intercambiador de calor principal. Cuando el pistón ha alcanzado el tope de su movimiento ascendente, la válvula de salida se cierra y la válvula de entrada se abre, para comenzar el ciclo otra vez.

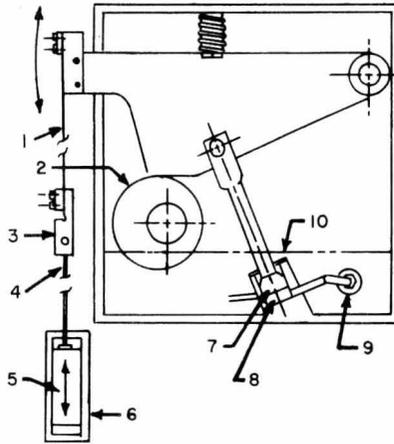


Diagrama de cómo el trabajo de la máquina de expansión es transmitido al cabezal y usado para operar la bomba de aceite.

D) El cabezal.-

El cabezal tiene tres funciones principales:

1) Por medio de las bombas de aceite opera los brazos del pistón y absorbe la energía generada por las máquinas de expansión.

2) Abrir a intervalos regulares las válvulas de entrada y salida del gas.

3) Controlar la velocidad de la máquina.

Descripción: El arreglo del cabezal, mostrado en la Fig. 3-16, consiste de dos secciones similares pero independientes. Una vista lateral de su

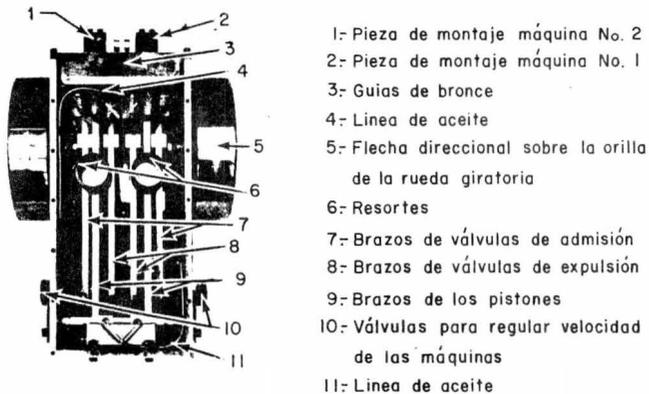


FIG. 3.16

ensamble se muestra en la Fig. 3-17.

Una sección es conectada a la máquina de expansión No. 1, por medio del eje del pistón y del eje de la válvula correspondientes. La otra sección es conectada a la máquina de expansión No. 2 de la

misma manera, puesto que las secciones son similares. Por lo tanto, una sola sección será descrita a continuación.

El brazo del pistón pivotea cerca de una varilla en la parte de atrás del cabezal. Las guías de bronce, localizadas en el frente de la caja, evitan el movimiento lateral del brazo del pistón.

El tornillo que agarra al eje del pistón está contenido dentro de un bloque. Dicho bloque está unido, en su extremo más bajo, por un enlace flexible. El extremo superior de este último es asegurado a una pieza montada sobre el extremo del brazo del pistón, como se muestra en la Fig. 3-14.

Sobre el árbol de levas, el cual está localizado abajo del brazo del pistón, hay un cojinete de bolas montado excéntricamente. Durante el viaje hacia abajo del pistón, el brazo del pistón pivotea; lo plano sobre la superficie del brazo actúa contra el cojinete excéntrico, causando así que gire.

La energía almacenada en la rueda giratoria durante el movimiento hacia abajo del pistón es usada para continuar la rotación del árbol de levas durante el movimiento hacia arriba.

Un resorte, localizado entre la cubierta del cabezal y el tipo de brazo del pistón, sostiene al pistón en contra del cojinete excéntrico. Las válvulas de entrada y salida están unidas cada una por clavijas a sus respectivos brazos, como se muestra en la Fig. 3-16.

E) La bomba de aceite.-

La bomba de aceite de tipo pistón no solamente provee medios para absorber el trabajo de la máquina de expansión, sino también bombea el aceite usado para lubricar el cabezal. Para cada bomba existe una válvula que regula la velocidad de la máquina.

Esas válvulas son usadas para variar su presión desarrollada. Puesto que de tales variaciones en la presión resulta una variación correspondiente en las cargas colocadas encima de la máquina, la velocidad de las máquinas puede regularse muy convenientemente.

F) Los tacómetros.-

En el tablero del licuefactor hay dos tacómetros, uno para cada máquina de expansión. Los interruptores eléctricos integrados pararán los compresores en el caso de que la velocidad de las máquinas de expansión se incremente a 700 rpm aproximadamente. (Puesto que los dos tácometros operan independientemente, los compresores se pararán si cualquiera de las máquinas se sobrepasan en sus velocidades).

G) El sistema Joule-Thompson.-

1) El cambiador de calor Joule-Thompson.-

El cambiador de calor Joule-Thomson consiste de dos tubos concéntricos en forma de una bobina. Una cinta delgada de cobre, enrollada helicoidalmente alrededor del tubo interno, mantiene el espaciamiento adecuado entre los tubos. La bobina es sostenida en su configuración propia por un cordón de algodón ama

rrado, como se muestra en la Fig. 3-18. Los tubos de entrada y salida conectan el cambiador de calor Joule-Thomson con el intercambiador de calor principal. La conexión al medidor magnehélico es también mostrada.

El flujo de gas comprimido entra a través de la sección anular del cambiador de calor y el gas expandido regresa vía el pasaje interior. De este modo, el gas más frío de salida enfría a la corriente que está entrando. Los dos filtros de fibra de vidrio quitan cualquier partícula de carbón u otros sólidos que puedan estar presentes en la corriente de entrada.

Uno de tales filtros está localizado en la unión del cambiador de calor Joule-Thomson y el cambiador de calor principal; el otro está montado en el extremo final del cambiador de calor Joule-Thomson cerca de la válvula J-T. (Ver Fig. 3-18).

2) La válvula J-T interna.- Una vista seccional se muestra en la Fig. 3-18. La válvula J-T es una pequeña válvula de aguja. La funda de acero inoxidable se extiende de la válvula superior a través del flange No. 3. El botón de control usado para ajustar la válvula es localizado sobre el flange No. 3. La junta de neopreno alrededor de la espiga en la capucha más superior previene fugas de helio.

3) El difusor interno.- Después que el helio de entrada ha sido expandido a través de la válvula J-T, la mezcla de líquido-gas entra al difusor, donde pasa en una corriente espiral. La fuerza centrífuga causa que el líquido y el gas se separen.

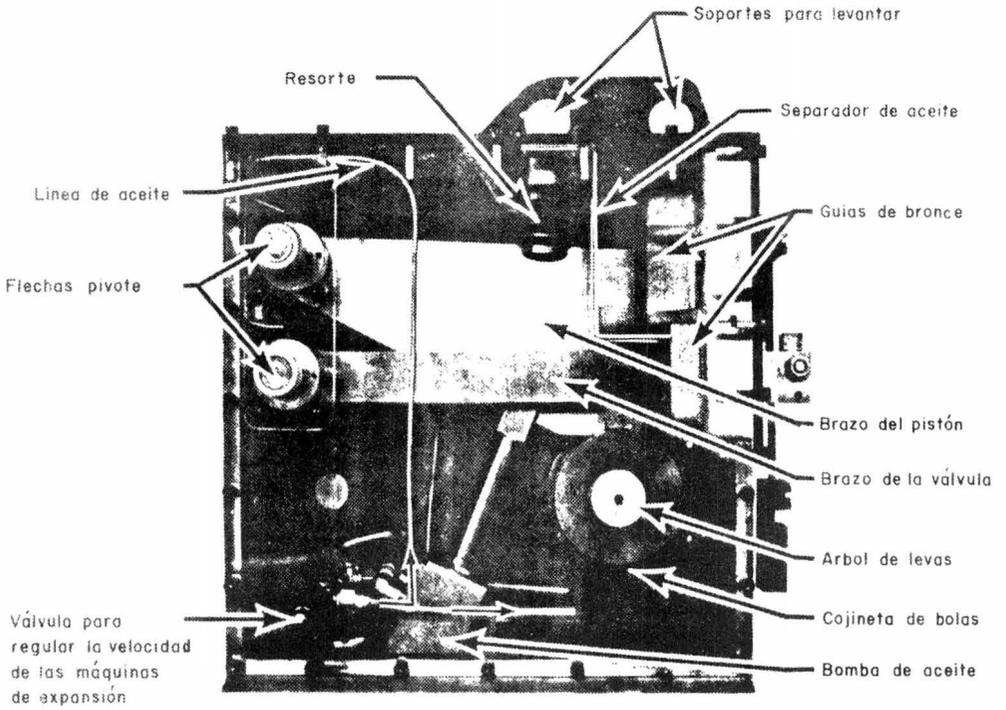


FIG. 3.17

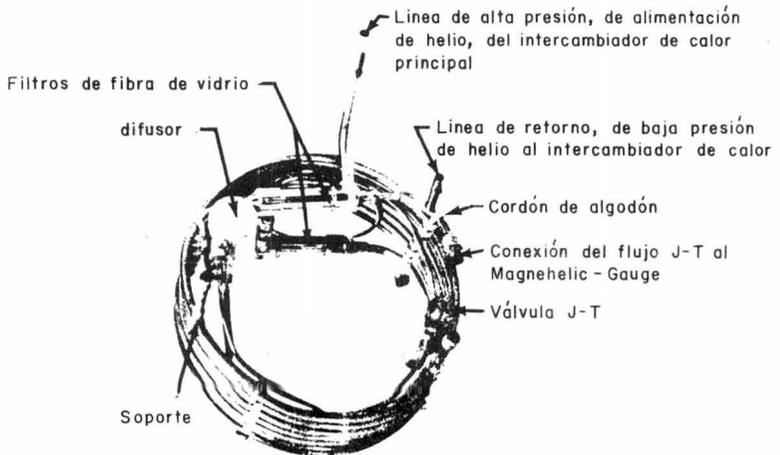
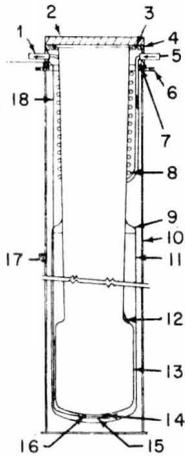


FIG. 3.18

El líquido gotea a la salida del difusor y el gas entra a la línea de retorno de baja presión.

H) El dewar interno.-

Este equipo es de acero inoxidable. Su esquema se muestra en la Fig. 3-19.



- 1- Salida del baño de preenfriamientos
- 2- Flange No. 3
- 3- Anillo de neopreno
- 4- Flange No. 2
- 5- Entrada del baño de preenfriamiento
- 6- Flange No. 1
- 7- Anillo de neopreno
- 8- Baño de preenfriamiento con LN<sub>2</sub>
- 9- Pieza de transición
- 10- Exterior de la chaqueta de vacío
- 11- Pantalla de radiación
- 12- Sustancia adsorbente
- 13- Dewar interno
- 14- Sustancia adsorbente
- 15- Contenedor del bulbo de gas
- 16- Bulbo de gas para medir temperatura del dewar interno
- 17- Conexión para vacío
- 18- Tubo capilar para medir temperatura del Dewar interno

FIG. 3.19

Unida a la pared del dewar interno, está una pieza de transición donde está unida la pantalla de cobre de radiación que rodea las partes más frías del dewar.

La pantalla de radiación está separada del dewar interno por tres espaciadores de acero inoxidable. El bulbo de gas que mide la temperatura del dewar interno está situado en un pequeño contenedor sobre el fondo del dewar. El tubo capilar del bulbo pasa entre la pantalla de radiación y la pared del

dewar, y sale del dewar por el flange No. 2.

- I) El baño de pre-enfriamiento de nitrógeno líquido.-

Este baño rodea y está ligado a la parte superior del dewar interno. La línea de alimentación para el baño pasa por abajo del flange No. 2 para entrar al dewar, y la línea de salida se extiende hacia arriba a través del flange No. 2 en la parte superior del baño.

Este baño está protegido por una lámina delgada para protegerlo de la radiación de calor de la pared de la chaqueta de vacío.

- J) El sistema de vacío.-

Este sistema provee aislamiento alrededor de las partes frías del licuefactor, de tal modo que la transferencia de calor por convección (y conducción del gas) entre la chaqueta exterior y el dewar interno es prevenida. Entre los dos flanges (1 y 2) hay un sello de neopreno (O-ring) para evitar fugas.

El dewar interno, el baño de pre-enfriamiento y los escudos para radiación descritos en la sección anterior, son ensamblados dentro de la chaqueta de vacío exterior, como se muestra en la Fig. 3-19.

Después que un vacío inicial de aproximadamente 30 micrones ha sido producido por la bomba mecánica de vacío, el bombeo criogénico por una sustancia absorbente dentro del espacio de vacío produce

un buen aislamiento térmico de la atmósfera.

Las líneas de baja presión de helio están provistas de una válvula para romper el vacío, cuando el mantenimiento o reparaciones van a ser hechas y, también, si se necesita hacer un calentamiento rápido. Dicha válvula se controla desde el tablero del licuefactor, de tal forma que si se abre y se cierra inmediatamente el volumen correcto de helio (para el rompimiento de vacío) será admitido en el espacio de vacío.

Una conexión de válvulas sobre la línea de vacío permite que el sistema de vacío sea utilizado para la evacuación del RDT y otros aparatos que se explicarán más adelante. Cerca de esta conexión de vacío está el tubo con los termopares, asociado con el medidor de vacío sobre el tablero de control.

K) El sifón de transferencia.-

Como se muestra en la Fig. 3-20, consiste de dos tubos concéntricos aislados por espaciadores delgados. El tubo interno es de monel, pudiendo ser el externo del mismo material o de cobre.

El espacio anular es evacuado por medio de la conexión de vacío, para aislar térmicamente al tubo interno de la atmósfera, es decir, evitar la transferencia de calor por convección. El sifón entra al dewar interno a través de un empaque ajustable en el flange No. 3 y es guiado hacia el interior por una funda.

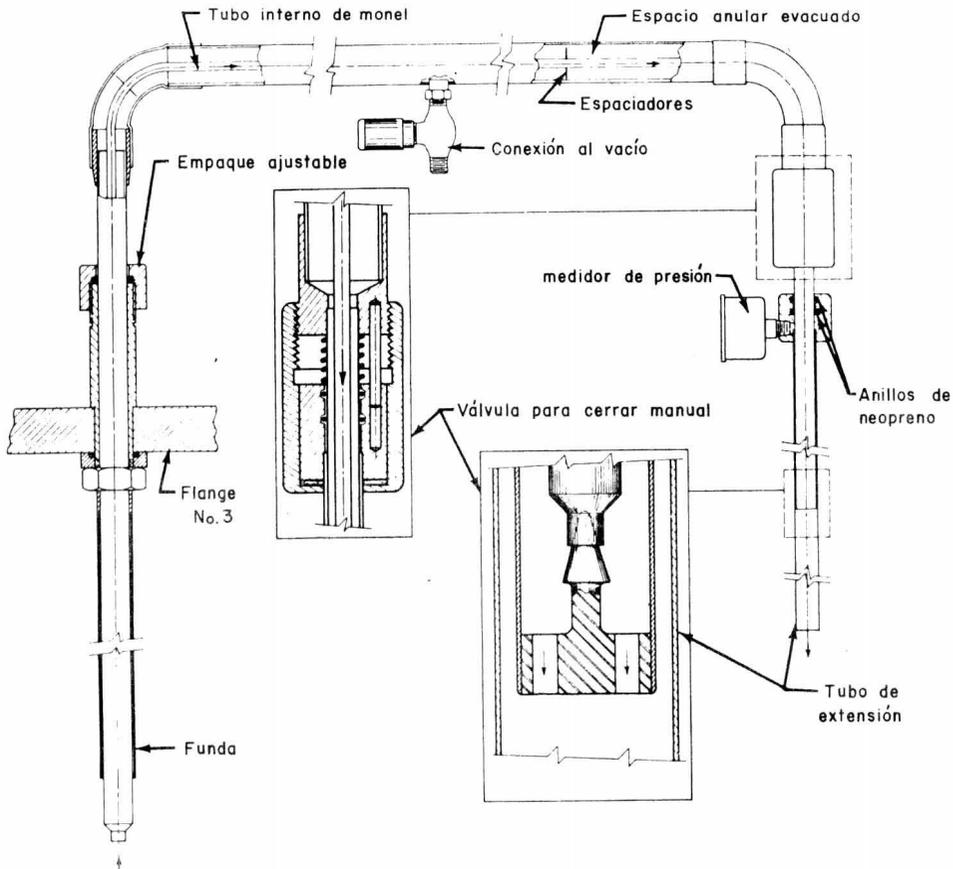


FIG. 3.20

La válvula manual para cerrar que está en el extremo exterior usada para prevenir escape de gas por el tubo, no está siendo usada. El tubo de extensión sobre el extremo del sifón puede ser usado para llenar dewars que tienen cuellos largos. Este tubo está sellado en la funda del sifón por anillos de neopreno (como se muestra). El medidor de presión indica la presión dentro del dewar cuando el tubo de

extensión está en uso.

L) Tubo para licuefacción externa (RDT).-

Este tubo (RDT) se muestra en la Fig. 3-21; permite la licuefacción del helio directamente a un dewar externo. También puede usarse para circular gas frío para equipos externos al licuefactor.

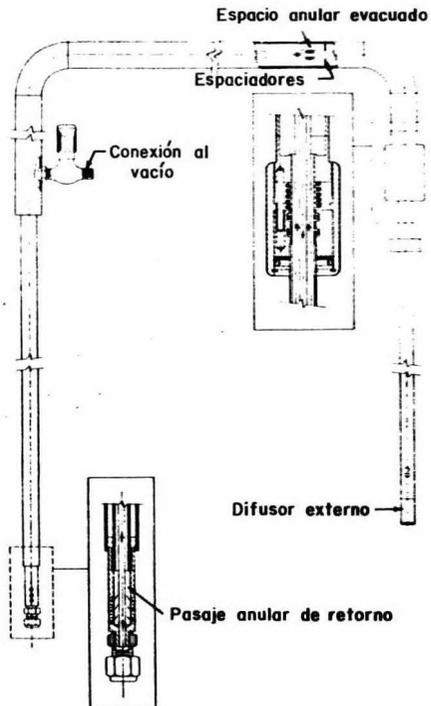


FIG. 3.21

El RDT consiste de tres tubos concéntricos, actuando el tubo exterior como una chaqueta de vacío. En el extremo exterior tiene una válvula J-T.

El difusor externo, como el interno, separa el helio líquido de la mezcla gas-líquido. Cuando la válvula J-T (RDT) está en uso, la válvula J-T interna está cerrada. Entonces, el gas frío llega a la válvula J-T (RDT) por medio del pasaje central del tubo (RDT).

El gas que queda después que el líquido ha sido separado de la mezcla, regresa al licuefactor a través del pasaje anular del RDT.

#### M) Tableros de control e instrumentación.-

Los controles para manejar el licuefactor se encuentran localizados en dos partes y se denominan de la siguiente manera: Tableros de control y Tablero de lado.

Los arreglos para las varias funciones de estos tableros son mostrados en las Figs. 3-22 y 3-25.

#### I) Medidores sobre el tablero de control.-

1) Medidor magnético.- Sirve para medir diferencias de presiones e indica la caída de presión en el pasaje de retorno del cambiador de calor J-T. La cantidad de gas helio sin licuar que regresa por la válvula J-T, es normalmente proporcional a esta caída de presión; por esto, el medidor es útil reproduciendo lo marcado por la válvula J-T y el flujo J-T

que ha resultado un funcionamiento óptimo sobre varias condiciones. El medidor además advierte los cambios en la velocidad del flujo, tales como los que se deben a obstrucciones en el RDT.

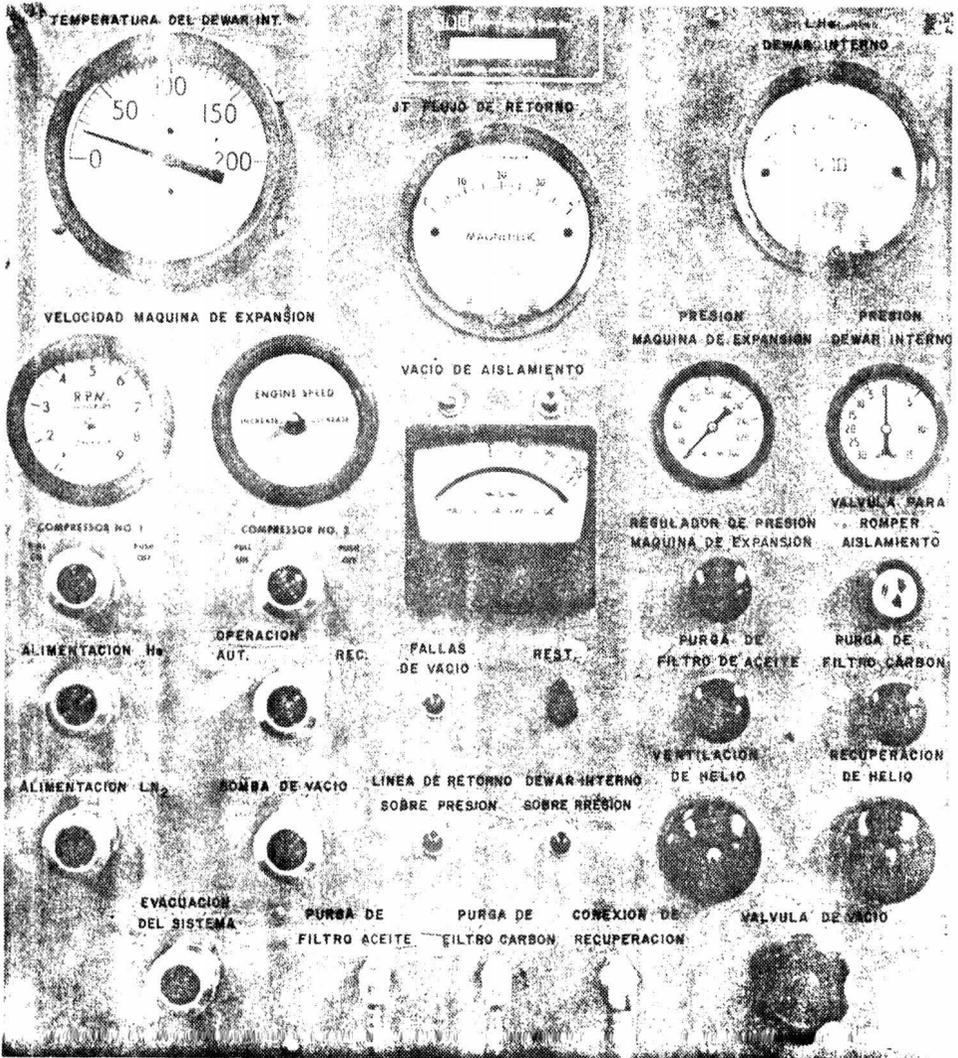


FIG. 3.22

Como se muestra en la Fig. 3-23, una extremidad del medidor (1) está conectada a la descarga final del canal de retorno del cambiador de calor J-T y la otra extremidad (2) está expuesta a la presión dentro del dewar interno. El cuadrante del medidor está graduado en pulgadas de agua.

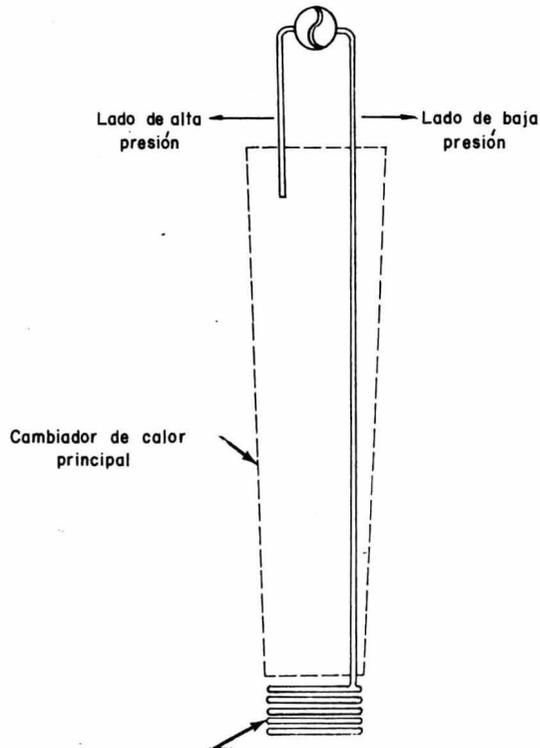


FIG. 3.23

2) Medidor de temperatura del dewar interno.- Este medidor se localiza en la parte superior izquierda y la temperatura está indicada en grados kelvin. El instrumento consiste de un termómetro de bulbo llenado con gas soldado en el fondo del dewar interno.

3) El medidor de helio líquido (dewar interno de helio líquido).- Es del tipo que mide diferencias de presión y responde a la parte superior estática, indicando la cantidad de helio líquido dentro del dewar interno.

4) Los medidores de presión de las máquinas de expansión.- La función de éstos es indicar la presión de gas helio de alimentación en los filtros de carbón 1 y 2 para las máquinas de expansión 1 y 2 respectivamente.

II) Los indicadores eléctricos sobre el tablero de control.-

Hay cuatro luces piloto individuales sobre el tablero: una está relacionada con el sistema de vacío, las otras tres están asociadas con el sistema de válvulas internas en el circuito de control de los compresores.

El interruptor de sobre presión del dewar interno.- Se abrirá siempre y cuando la presión del dewar interno se exceda de 7 psig.; la luz del piloto del mismo se encenderá cuando el interruptor esté abierto.

El interruptor de sobrepresión de la línea de retorno.- Se abrirá siempre y cuando la presión en la línea de retorno de baja presión que sale del cambiador de calor principal se exceda de 4 psig. La luz de éste se encenderá cuando el interruptor esté abierto.

El cuarto interruptor, o sea el de sobre velocidad de las máquinas de expansión, se abre auto máticamente cuando la velocidad de cualquiera de los dos se exceda de 700 rpm; no tiene luz piloto asociada al interruptor.

El botón para restablecer.- Es girado en contra de las manecillas del reloj para restablecer la operación del interruptor de sobrepresión del dewar interno y del interruptor de sobrepresión de la línea de retorno; si es que es parado su funcionamiento por alguna falla, el interruptor de la chaqueta de vacío se restablecerá automáticamente cuando un vacío de 20 pulg. de H<sub>2</sub>O, o mejor, ha sido pro ducido dentro de la chaqueta.

Automáticamente se restablecerá también el interruptor de sobrevelocidad de las máquinas de expansión cuando éstas reduzcan su velocidad abajo de 700 rpm.

III) Los interruptores sobre el tablero de control.-

Hay siete interruptores, del tipo empujar-jalar, localizados en la parte inferior izquierda del tablero, de los cuales cada uno está equipado

con una lámpara indicadora integral. Las cabezas de dos interruptores son del tipo dentro-fuera, para control de los compresores. Cuando el interruptor es aplicado (jalado) el compresor se encenderá y todos los interruptores internos de su circuito se cerrarán. Un contacto de retención en el circuito de control de los compresores conservará al circuito energizado para que los interruptores internos permanezcan cerrados. Mientras el compresor esté funcionando, el indicador de lámpara amarilla estará encendido.

#### Interruptor de alimentación de helio.-

Este controla la operación del sistema de abastecimiento. Cuando el interruptor es sacado, la válvula de abastecimiento es operada por los interruptores en los límites del canal del contenedor (Fig. 3-9 ). Dichos interruptores se hacen funcionar por medio del indicador de altura ("bob"). Cuando el contenedor esté vacío, el émbolo del contenedor estará más abajo y , cuando esto suceda, el indicador de altura ("bob") se elevará hasta poner a funcionar el interruptor del límite superior (No. 1). Entonces la válvula de abastecimiento se abrirá y el gas entrará al contenedor del banco de cilindros o del tanque de recuperación.

Cuando el contenedor esté lleno, el indicador de altura ("bob") se aleja del interruptor superior. Sin embargo, el circuito de retención asociado con el interruptor continuará activando la válvula solenoide de abastecimiento y la válvula permanecerá abierta. Cuando el contenedor ha sido casi llenado, el indicador de altura ("bob") pondrá a funcionar el interruptor No. 3. Entonces la válvula solenoide de abastecimiento se desenergiza y la vál-

vula se cerrará. El indicador de lámpara amarilla que está integrado al interruptor de alimentación de helio, estará encendido siempre que la válvula de abastecimiento esté abierta. Cuando el interruptor de alimentación de helio es empujado, el circuito de control asociado con el indicador de altura ("bob") es desenergizado y la válvula de abastecimiento permanece continuamente cerrada.

El interruptor del baño de pre-enfriamiento.- Es del tipo momentáneo, el cual controla la válvula solenoide en la línea de salida del baño de pre-enfriamiento.

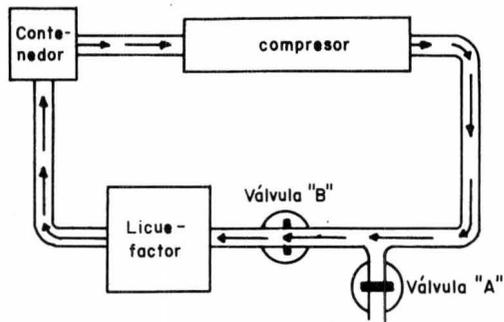
Cuando el interruptor es sacado, un relevador es energizado; el relevador en turno suministra la energía para abrir la válvula, permitiendo así que el nitrógeno líquido fluya a través del baño de pre-enfriamiento.

Cuando el interruptor es empujado, el relevador se desenergiza y la válvula se cierra. Los cinco interruptores internos del circuito del compresor están asociados con el circuito de retención del relevador. Cuando uno de los interruptores internos haga que un compresor se pare, el relevador se abrirá y la válvula solenoide se cerrará. Después de esto, la válvula no se volverá a abrir, aunque el compresor vuelva a encenderse, a menos que el interruptor del baño de pre-enfriamiento haya sido sacado otra vez. El indicador de lámpara azul está encendido siempre que la válvula solenoide esté energizada.

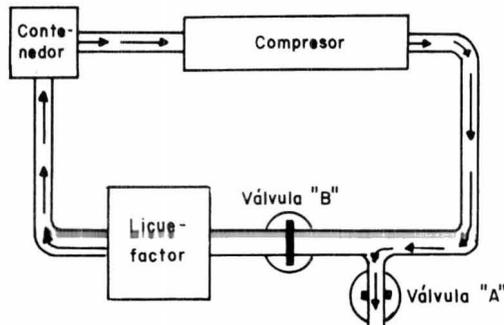
El interruptor de la bomba de vacío.- Es el interruptor de tipo dentro-fuera. Cuando el interruptor es sacado, la bomba de vacío es puesta en operación y el indicador de la lámpara azul se enciende cuando el circuito de control está energizado.

El interruptor del medidor de vacío.- Es un interruptor de palanca, el cual está integrado al medidor. El piloto de lámpara amarilla se enciende cuando la energía está siendo suministrada al medidor.

El interruptor del sistema de evacuación.- Este acciona al compresor para bombear el gas del licuefactor y evacuar al sistema. Cuando el interruptor es sacado, el indicador de lámpara roja se enciende y dos válvulas de solenoides mostradas en la Fig. 3-24, son puestas en funcionamiento.



Válvulas solenoides en operación normal



Válvulas solenoides durante evacuación

FIG. 3.24

La válvula "A" localizada en la línea de alimentación de helio, con la línea de helio impuro, se abre y, simultáneamente, la válvula "B" se cierra para prevenir que el gas fluya hacia dentro del licuefactor. Entonces, el compresor bombeará el gas del sistema hacia la línea de helio impuro.

El interruptor de selector de modo de funcionamiento.- El interruptor rotulado "Operación automática/Recuperación", es también del tipo empujar-sacar. Sin embargo, el interruptor no tiene posición de "fuera"; cuando el interruptor es sacado, el licuefactor operará en el modo de Operación automática, y cuando el interruptor es empujado, entonces trabajará en el modo Recuperación. El indicador de lámpara amarilla se encenderá solamente cuando el interruptor esté en posición de Operación automática.

El interruptor es empujado a la posición de Recuperación, siempre que el helio líquido esté siendo transferido del dewar interno, de un dewar externo, o si se ha terminado de licuar. Durante la transferencia, una cierta cantidad de líquido se calentará (como se explica en el capítulo de operación), y el gas resultante puede ser recuperado por medio de una manguera conectada entre la respiración del dewar y la conexión de recuperación del licuefactor.

Cuando el licuefactor esté funcionando y se alimente gas helio al sistema, el gas primero viajará vía la línea de retorno de baja presión al contenedor y luego será vaciado, recomprimido y regresado al licuefactor con la velocidad normal del flujo. Sin embargo, como el gas continúa para ser

introducido hacia el sistema, esta cantidad de gas, después de abastecer los requerimientos del licuefactor, se acumulará en el contenedor. De acuerdo con esto, el pistón del contenedor se elevará y si el contenedor está suficientemente lleno, el indicador de altura ("bob") funcionará al interruptor límite No. 4.

El circuito asociado con el interruptor abrirá inmediatamente la válvula solenoide de recuperación y parte de la corriente del gas fluirá vía la válvula de aguja de recuperación hacia el tanque de recuperación.

#### IV) Las válvulas sobre el tablero de control.-

El regulador de presión de máquinas de expansión.- Operado normalmente, está localizado en un "bypass" de la línea principal de la línea de alimentación de alta presión a la línea de retorno de baja presión. Este regulador es usado para reducir la presión en la línea de alimentación aproximadamente a 60 psig durante el proceso de evacuación (descrito en operación).

Hay una válvula reguladora de presión adicional, llamada regulador automático de presión de las máquinas. Esta válvula sirve para que, por el "by-pass", se distribuya el gas helio de alimentación durante el encendido del licuefactor. El licuefactor está caliente cuando es arrancado y la densidad del gas circulante es baja. Consecuentemente, el flujo de masa del helio que puede ser circulado a través de las máquinas de expansión es sustancialmente menor que el flujo de masa alimentado por

los compresores. En estas condiciones, el regulador automático abre el "by-pass" hacia la línea de retorno de baja presión, de tal forma que la presión de alimentación es mantenida aproximadamente a 240 psig.

Eventualmente, en la licuefacción de helio, el enfriamiento avanzará hasta el punto en el cual el sistema puede circular toda la cantidad de gas alimentada por los compresores. Entonces la válvula se cerrará y permanecerá cerrada en operación normal.

La válvula para romper el aislamiento por vacío.- Es usada para romper el aislamiento en la chaqueta de vacío, antes de comenzar alguna reparación y calentar rápidamente al licuefactor.

Las válvulas de purga de los filtros de aceite y carbón.- Son usadas en la entrada para purgar el filtro de aceite y el filtro de carbón No. 1 vía su correspondiente conexión de purga en el fondo del tablero de control.

Ambas líneas de purga están conectadas dentro del gabinete a un separador (las conexiones de purga sobre el tablero de control no están conectadas al sistema). Cuando se está purgando, partículas de agua y aceite son separadas de la corriente y son recogidas en el separador. Entonces el gas es conducido, vía la línea de helio impuro, a una tubería atrás del gabinete. Una línea puede estar unida a la tubería de modo que el helio impuro puede ser transferido a una bolsa de recuperación de gas para repurificarlo posteriormente. El separador es drenado periódicamente.

V) El tablero de lado (Fig. 3-25).-

La válvula controladora de nitrógeno líquido, que se opera manualmente, está localizada justamente arriba del tablero, y permite la entrada de luz al primer baño de pre-enfriamiento.

El indicador de temperatura, usado para establecer esta velocidad del flujo óptimo de nitrógeno líquido, indica la temperatura en la línea de respiración del baño de pre-enfriamiento.

La válvula de control del elevador. En la parte superior del tablero, están los controles, que son operados con agua. El elevador hidráulico se emplea para labores de mantenimiento.

La válvula de cortar y el regulador de presión localizados sobre el lado izquierdo del tablero, provee una fuente de helio a baja presión para el dewar más cercano de presurización propia. Este gas de baja presión puede ser usado para presurizar los dewars del nitrógeno, por ejemplo.

El medidor de presión del dewar, justamente abajo del regulador de presión, indica la presión del dewar de nitrógeno u otros aparatos conectados.

La válvula de alivio, localizada a la derecha del tablero, indica la presión de alimentación de helio entrando al gabinete. La diferencia entre la presión indicada por este medidor y la presión de entrada de la máquina de expansión No. 1, indicada por el medidor de presión de la máquina es parcial-

mente una función de la cantidad de la contaminación dentro del cambiador de calor principal.

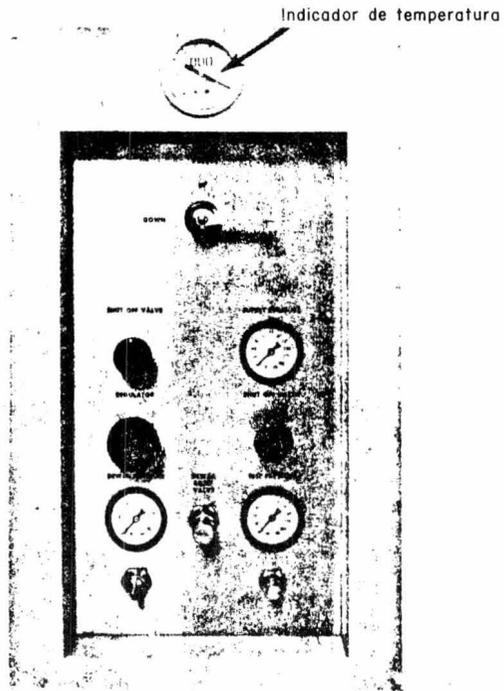


FIG. 3.25

M) El elevador hidráulico.-

Este se muestra en la Fig. 3-16, y es usado para levantar el cabezal y las partes internas del licuefactor durante las operaciones de mantenimiento.

El elevador es operado para la presión de agua y controlado por una válvula de tres posiciones. Cuando el elevador está totalmente extendido, la parte superior alcanza aproximadamente 11 pies desde la base del gabinete.

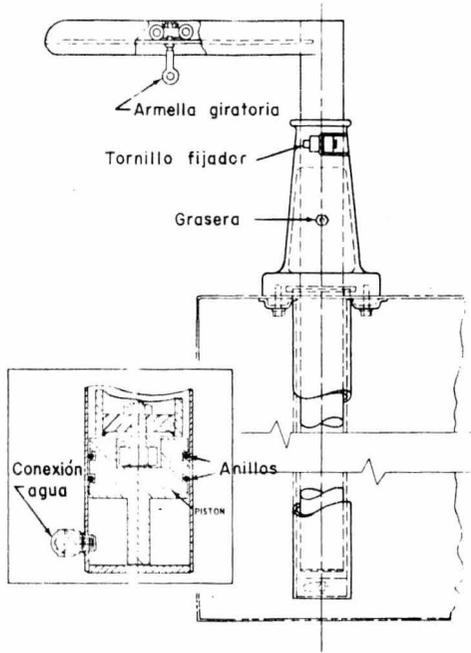


FIG. 3.26

C A P I T U L O      4

OPERACION DEL LICUEFACTOR

#### 4.1 Introducción

En este capítulo se describen los pasos para el manejo del licuefactor, desde el arranque hasta la obtención de helio líquido.

Algunos de los pasos que a continuación se enumeran podrían ser cambiados, pero la secuencia que se presenta ha dado óptimos resultados. Además, se hacen algunas sugerencias tanto de mantenimiento como de seguridad.

#### 4.2 Operación

Para establecer la fase de operación del equipo se deberá proceder de la siguiente manera:

1. Verificar el nivel de aceite del cabezal de los pistones.

2. Cerrar todas las válvulas en el tablero de control y del tablero lateral. Si el contenedor está vacío, jale el interruptor "Alimentación de helio" y cuando se haya llenado, empujelo. Se notará que entra gas cuando se mueva el indicador de altura, que se localiza en el canal de enfrente del contenedor.

NOTA: Si no entra gas, se debe oprimir el interruptor No. 1, que se localiza en la parte interior del canal del indicador de altura.

3. Empuje el interruptor "Selector de modo" a

la posición de "Recuperación".

4. Conecte el dewar de nitrógeno líquido. (Se deben tomar precauciones para que tenga suficiente presión).

5. Asegurarse que el tubo "RDT" tenga su capuchón y que esté sin doblarse. La válvula J-T del RDT debe estar cerrada.

6. Girar totalmente en el sentido contrario a las manecillas del reloj el "Regulador de presión del pistón de expansión". Esto lo mantendrá a 60 psig, una vez que el compresor esté funcionando.

7. Abra la válvula "Ventilación del filtro de carbón" e inmediatamente encienda un compresor. Cuando el indicador de altura haya viajado 25 cm, cierre la válvula.

8. Abra la válvula "Ventilación del filtro de aceite" para purgar el filtro de aceite de entrada. Permita que el indicador de altura viaje 25 cm y cierre la válvula.

NOTA: Si es necesario llenar el contenedor, jale y empuje la válvula "Alimentación de helio".

9. Apagar el compresor. Se debe observar que la presión decae a cero en el medidor de la presión de alimentación localizada en el tablero lateral.

10. Ajustar las válvulas de entrada y salida del pistón No. 2 usando las clavijas apropiadas.

11. Reencienda el compresor, abra la válvula J-T interna y entonces ajuste la presión de la "Máquina de expansión" a 100 psig aproximadamente. Deje circular el gas por 20 min y durante este período purgue los cuatro depósitos de cada compresor.

NOTA: Una vez que la presión esté a 100 psig, ajuste la válvula J-T interna de tal forma que el "Medidor magnehélico" indique cero.

12. Después que haya circulado el gas, purgue el "Filtro de carbón" hasta que la presión del dewar interno sea aproximadamente la atmosférica. Cierre la válvula.

13. Llene el contenedor con el interruptor "Alimentación de helio".

14. Si el sistema ha estado en contacto con la atmósfera, evacúelo de la siguiente manera: (si no, proceda con el Inciso 15)

a) Deje circular el gas por 10 min. Después abra la válvula "Ventilación del filtro de carbón" y purgue el filtro, hasta que la presión del dewar interno sea la atmosférica. Entonces, cierre la válvula e inmediatamente jale el interruptor de "Vacío del sistema".

b) Evacúe el sistema hasta que el dewar interno esté a un vacío de 22-23 in Hg.

c) Cuando se haya alcanzado esta vacío, jale el interruptor "Alimentación de helio", espere 10 seg y entonces empuje el interruptor "Vacío del sistema". La presión del dewar interno volverá a tener 100 psig.

d) Después de haber llenado el contenedor, empuje el interruptor "Alimentación de helio" y abra la válvula "Ventilación del filtro de carbón" hasta que la presión del dewar interno sea la atmosférica; entonces cierre la válvula.

e) Jale el interruptor "Alimentación de helio" sólo lo suficiente para llenar el "Contenedor". Circule el gas por 10 min y de nuevo purgue el filtro de carbón, hasta alcanzar la presión atmosférica.

f) Pare el compresor y quite las clavijas del pistón No. 2.

NOTA: Si efectúa este inciso, no haga los incisos 15 y 16.

15. Deje circular el gas por 10 min y purgue el filtro de carbón por segunda vez. Cerrada la válvula "Ventilación", llene el "Contenedor" y deje circular el gas por 10 min, entonces purgue el filtro de carbón por tercera y última vez.

16. Pare el compresor y quite las clavijas del pistón No. 2.

17. Jale el interruptor "Alimentación de preenfriamiento", entonces abra la válvula "Reguladora" del nitrógeno líquido. Abra la válvula de salida del dewar de nitrógeno líquido para que fluya y verifique que tenga suficiente presión.

18. Durante el enfriamiento y licuefacción, ajuste la válvula "Reguladora" para estabilizar la temperatura del gas de salida de la línea de preenfriamiento.

friamiento a 170-180 K.

NOTA: Esta válvula es de respuesta muy lenta y hay que estarla regulando continuamente.

19. Cierre las válvulas que regulan la velocidad de los pistones en el "Cabezal", rotándolas completamente en el sentido de las manecillas del reloj; entonces, abra las válvulas media vuelta.

20. Encienda un solo compresor.

21. Haga rotar manualmente los dos volantes del "Cabezal" en el sentido de las flechas que tiene marcadas.

22. Cuando arranquen los pistones, ajuste la velocidad de cada uno a 600 rpm. La presión del pistón debe ser 240 psig aproximadamente y el "Medidor magnético" debe medir cero. (Regulada por la J-T interna).

23. Durante el enfriamiento verifique que la velocidad de los pistones no sobrepase las 600 rpm.

24. En una hora, aproximadamente, estará la temperatura cerca de los 200 K y entonces, arranque el otro compresor, o alternativamente cuando la presión del pistón baje de 180 psig.

25. Al llegar a 140 K, se conecta la salida del dewar de helio a "Recuperación" (en el panel) por medio de una manguera, sin abrir dicha válvula. (Solamente si se va a licuar en el dewar externo).

26. Se paran los dos compresores (empujando los dos interruptores del tablero). Por lo tanto, se paran los dos pistones y los medidores de presión deben bajar a cero.

27. Cuando la presión del dewar interno es cero, se le quita el capuchón al RDT y se introduce el tubo al dewar, teniendo cuidado de no doblarlo y de no rotarlo más de 40° alrededor de su posición inicial.

28. Se arrancan los compresores y los pistones.

29. Se abren las válvulas del dewar y la válvula "Ventilación" en el tablero. Después de esperar unos minutos (se está purgando el dewar), se cierra la válvula "Ventilación" y se abre la válvula "Recuperación". Ahora se está enfriando el dewar y el indicador de altura debe moverse lentamente.

30. Cerrar la J-T interna y se abre la J-T externa; con esto el "Medidor magnético" marcará cero.

31. Cuando la manguera (latex) esté congelada se cierran las válvulas del dewar (con ayuda de un secador de pelo). La temperatura del dewar interno debe ser 20 K, por lo menos.

32. El gas frío está regresando por el RDT; se debe esperar hasta que la temperatura sea 11 K.

Precauciones:

a) La presión del dewar interno no debe ex-

ceder los 5 psig. Si hay que bajar la presión, hágase por medio de la válvula "by pass" o si no, disminuyendo la presión del pistón.

b) La presión del dewar de helio no debe exceder de 350 mbar. Se puede evitar abriendo un poco la válvula de salida del dewar.

33. Cuando la temperatura sea de 11 K, se abre la J-T del RDT, hasta que el "Medidor Magnehélico" mida 35 in H<sub>2</sub>O. Después se ajustan las velocidades de los pistones: 450 rpm en el No. 1 y 400 rpm en el No. 2.

La presión de entrada del pistón debe ser 210 psig y la presión del dewar interno deberá ser ligeramente menor (5 psig menos, en general).

NOTA: Estos valores cambian según las condiciones de impurezas y del enfriamiento del dewar de helio. Los valores deben ser fijados de tal manera que se obtenga una buena razón de licuefacción.

34. Cuando se está licuando, el indicador de altura en el "Contenedor" se debe mover rápido y continuamente. La razón de licuefacción se obtiene midiendo el tiempo que tarda el indicador de altura en recorrer 10 in y viendo la gráfica No. 1 del Apéndice III.

35. Durante la licuefacción se debe revisar periódicamente la cantidad de helio puro que hay en los cilindros, para reemplazarlos oportunamente. También se deben anotar periódicamente las lecturas de todos los medidores del sistema. Si existe al-

guna falla, este registro permitirá encontrar la causa con mayor facilidad.

C A P I T U L O        5

ACONDICIONAMIENTO DE AREA

Y

SERVICIOS AUXILIARES

## 5.1 Acondicionamiento de área

Este trabajo se desarrolló de acuerdo a las instalaciones proporcionadas y distribuyendo el equipo para una mejor optimización del espacio. Tal distribución se hizo como se indica en la Fig. 5-1, y se han acondicionado físicamente de la siguiente forma:

### Sección 1.-

Esta sección comprende un área de 43.73 m<sup>2</sup>, en la cual están instalados los siguientes equipos:

- A) Licuefactor
- B) Contenedor
- C) Repurificador
- D) Monitor (Controles de pureza)

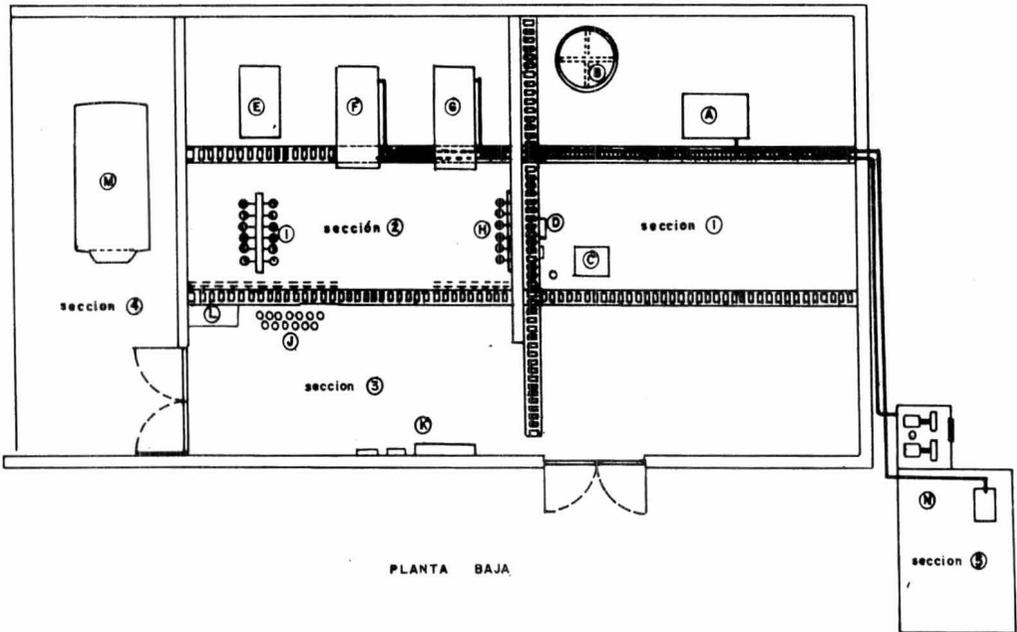
Para la fijación de A, B y C no se empleó ningún aditamento auxiliar, pues debido a su peso no tendrá movimiento alguno. En D solamente se emplearon taquetes expansores para su fijación.

### Sección 2.-

Esta sección comprende un área de 26.10 m<sup>2</sup> y consta de los siguientes equipos:

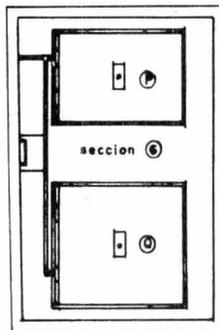
- E) Compresor 7.5 HP
- F y G) Compresores de 15 HP
- H) Banco de cilindros puros
- I) Banco de cilindros impuros

Las Figs. 5-2 y 5-3 muestran la fijación y su distribución de espacio necesaria de los compresores E, F y G, respectivamente. Respecto a H e I, nuevamente se tuvo necesidad del empleo de taquetes expansores para su fijación al suelo.

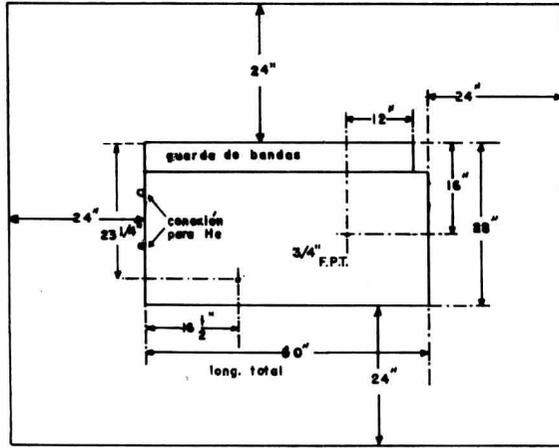


PLANTA BAJA

FIG. 5.1

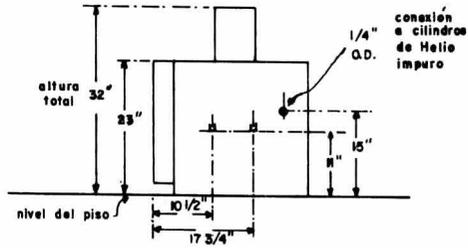


PLANTA ALTA



VISTA LATERAL

Compresor de 7.5 Hp



VISTA DE FRENTE

FIG. 5.2

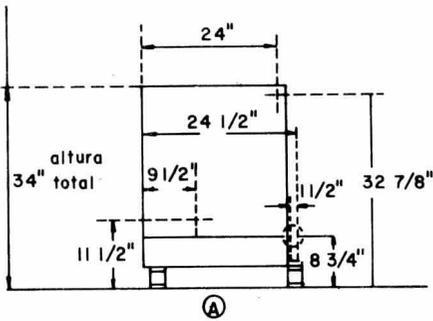
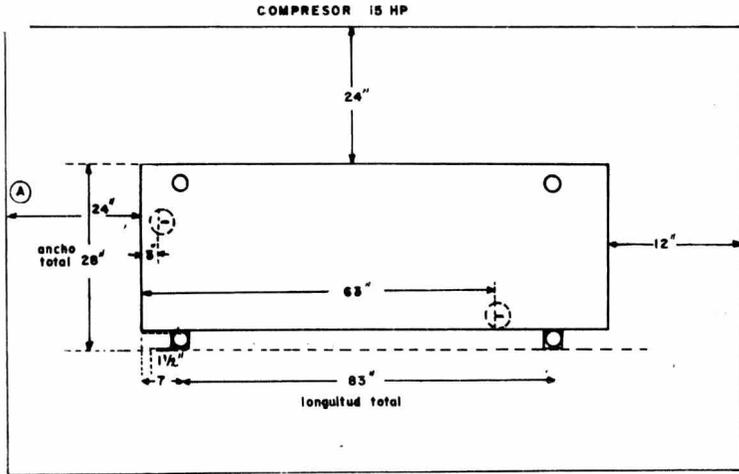


FIG. 5.3

### Sección 3.-

Esta sección comprende un área de  $16.95 \text{ m}^2$ , en la cual se encuentran los siguientes equipos (Fig. 5-1):

- J) Cilindros de helio (Almacenaje)
- K) Tableros generales de control de corriente eléctrica
- L) Caja de herramientas

### Sección 4.-

Area destinada para mantener depósito de nitrógeno líquido ((M) Area exterior). Depósito con capacidad para 600 litros.

### Sección 5.-

Area externa donde se localiza la cisterna (N), con capacidad de  $12 \text{ m}^3$  de agua de enfriamiento y cuarto de bombas (O). Las líneas de alimentación y retorno de agua se indican en la Fig. 5-1.

### Sección 6.-

Esta sección se localiza en la planta alta de la sección 1, y comprende un área de  $16 \text{ m}^2$ , en la cual se instalarán dos bolsas de hule de neopreno (P) y (Q), con capacidad de 1 y  $1.5 \text{ m}^3$ , respectivamente.

Dichas bolsas son del sistema de recuperación de gas y su acondicionamiento se muestra en la Fig. 5-4.

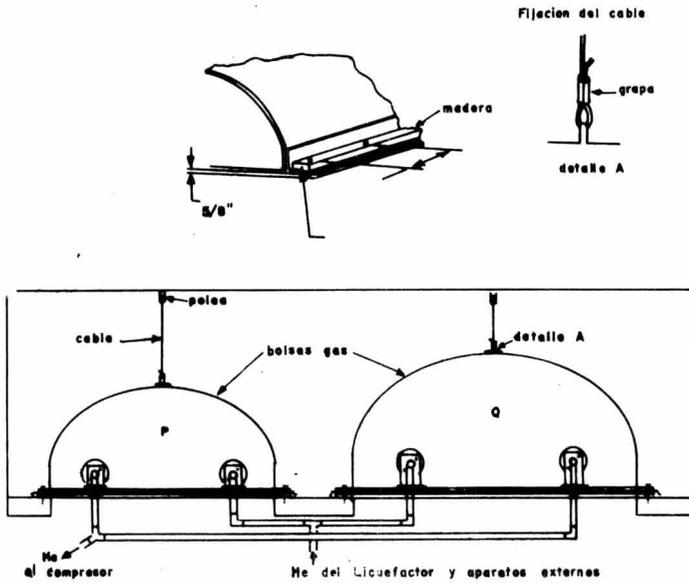


FIG. 5.4



QUIMICA

## 5.2 Servicios auxiliares

Los requerimientos de servicios para los equipos son los siguientes:

- 1) Alimentación de corriente eléctrica
- 2) Alimentación de agua de enfriamiento
- 3) Sistema de extracción de aire

### 1) Alimentación de corriente eléctrica.-

Se hace por medio de una subestación eléctrica, de la cual se alimentan para el edificio del licuefactor, llegando estos cables a un tablero general para su distribución, como se indica en las figuras del Apéndice II.

### 2) Alimentación de agua de enfriamiento.-

Como se muestra en la Fig. 5-1, el agua de enfriamiento se abastece a los compresores F y G y al gato hidráulico del licuefactor, de una cisterna N con capacidad de  $15 \text{ m}^3$ , a través de tubería de cobre de  $3/4$ " de diámetro. El gasto de agua es de  $18.9 \text{ l min}^{-1}$ , el cual es mantenido por una bomba de  $3/4 \text{ HP}$ .

### 3) Sistema de extracción de aire.-

Este sistema consta de dos unidades, las cuales se encuentran instaladas en la parte superior de las secciones 1 y 2. Estas unidades son del tipo jaula de ardilla, para una capacidad de extracción de  $30 \text{ m}^3/\text{min}$ .

### 5.3 Secuencia de instalación

La instalación del equipo se efectuó de la siguiente manera:

a) Fijación de los componentes mayores, de la forma como se indicó en el inciso de Acondicionamiento para los siguientes equipos:

- Dos compresores 15 HP
- Compresor 7 1/2 HP
- Licuefactor
- Contenedor
- Gabinete de repurificación
- Bolsa de gas

b) Fijación de componentes menores, como son: bancos de cilindros, controles de pureza, controles de servicios auxiliares.

c) Distribución y fijación de líneas que no puedan tener variación posterior, como son: alimentación de corriente eléctrica, agua de enfriamiento para compresores y gato hidráulico del licuefactor.

d) Fijación de líneas de alimentación de helio para alimentación del licuefactor y repurificador. (Ver diagrama de flujo, Fig. 3-1).

e) Conexión del sistema de alambrado interno para los distintos componentes. (Ver diagrama unifilar, Apéndice II).

f) Fijación de líneas de recuperación a los distintos componentes y medios de comunicación, como

son: licuefactor, sistemas externos, bolsa de gas, compresor, cilindros. (Ver Fig. 3-5).

#### 5.4 Condiciones de seguridad en general

Con respecto a seguridad, se distinguen dos tipos:

- a) Seguridad en el funcionamiento del equipo
- b) Seguridad en prevención de accidentes

- a) Seguridad en el funcionamiento del equipo.-

Como se dijo anteriormente, antes de comenzar la operación de licuefacción o repurificación se deberá checar en los compresores que no se encuentre ningún material en las partes internas, como son las aspas de motores y abanicos, para evitar un mal funcionamiento.

En los bancos estacionarios de cilindros se revisarán periódicamente los dispositivos de seguridad, como son los discos de ruptura, reemplazando los que estén oxidados. (Fig. 3-7).

En la bolsa de gas, revisar que no se encuentren objetos sobre ellas para evitar alguna cortadura, ya que están hechas de neopreno.

En la cisterna, efectuar una revisión periódica para su limpieza y evitar que partículas entren con el agua de enfriamiento a los compresores 1 y 2.

b) Seguridad en prevención de accidentes.-

A este respecto, debemos checar que no se encuentre ningún material en los lugares de paso para evitar algún tropiezo, cuando se necesite actuar con rapidez. Efectuar una revisión periódica de los extractores de aire para evitar acumulación de gases. Para el manejo de LN<sub>2</sub> se debe tener extremo cuidado, pues puede causar quemaduras; para evitar esto, se debe emplear guantes de asbesto.

C A P I T U L O      6

EJEMPLO DE OPERACION DEL EQUIPO

En este capítulo se describe un ejemplo de operación. Basándose en el orden de operación del equipo dado en el capítulo anterior, se obtuvo la hoja de control de operación, que se muestra en el esquema 6-1, de donde empleando los datos de temperatura y tiempo, se obtiene la Fig. 6-1. Dicha figura muestra el abatimiento de la temperatura durante toda la operación.

#### Descripción de la Figura 6-1.-

Del punto 1 al 2 se llevaron a cabo los siguientes pasos:

- a) Evacuación y limpieza
- b) Enfriamiento rápido del sistema porque se iba a licuar en un dewar externo que ya contenía helio líquido:
  - a) Se encendió un compresor y empezó el preenfriamiento
  - b) Se conectó la manguera (latex) del tubo de transferencia a la conexión de recuperación
  - c) Se abrieron las válvulas de ventilación y transferencia (esta última 2 vueltas)
  - d) Se purgó la línea (durante 1 min)
  - e) Se cerró la válvula de ventilación
  - f) Se abrió la válvula de recuperación
  - g) Se ajustó la válvula J-T interna, de tal modo que el medidor magnético marcara 0"

Del punto 2 al 9, se estaba recirculando el gas, esperando hasta que la temperatura bajara a 130 K,

momento en que se encendió el segundo compresor.

Del punto 9 al 15 se siguió abatiendo la tempe  
ratura, aún con la recirculación del gas. En el  
punto 15, se cerró la válvula de transferencia, ajus  
tando la válvula J-T en 2" o 3". Además se cerró la  
válvula de recuperación, porque se iba a licuar en  
un aparato externo (dewar).

La temperatura era de 10 K en el termómetro.  
Entonces, en el punto 16 se paró un compresor, se  
abrió la válvula pantalla del dewar (100 U.T.), conec  
tándose las mangueras del dewar a la válvula de recu  
peración.

Se cerraron la J-T interna y la válvula de ven-  
tilación. Enseguida se abrió la válvula de recupera-  
ción y se ajustó la J-T del RDT, de tal modo que el  
medidor magnehélico marcara 0".

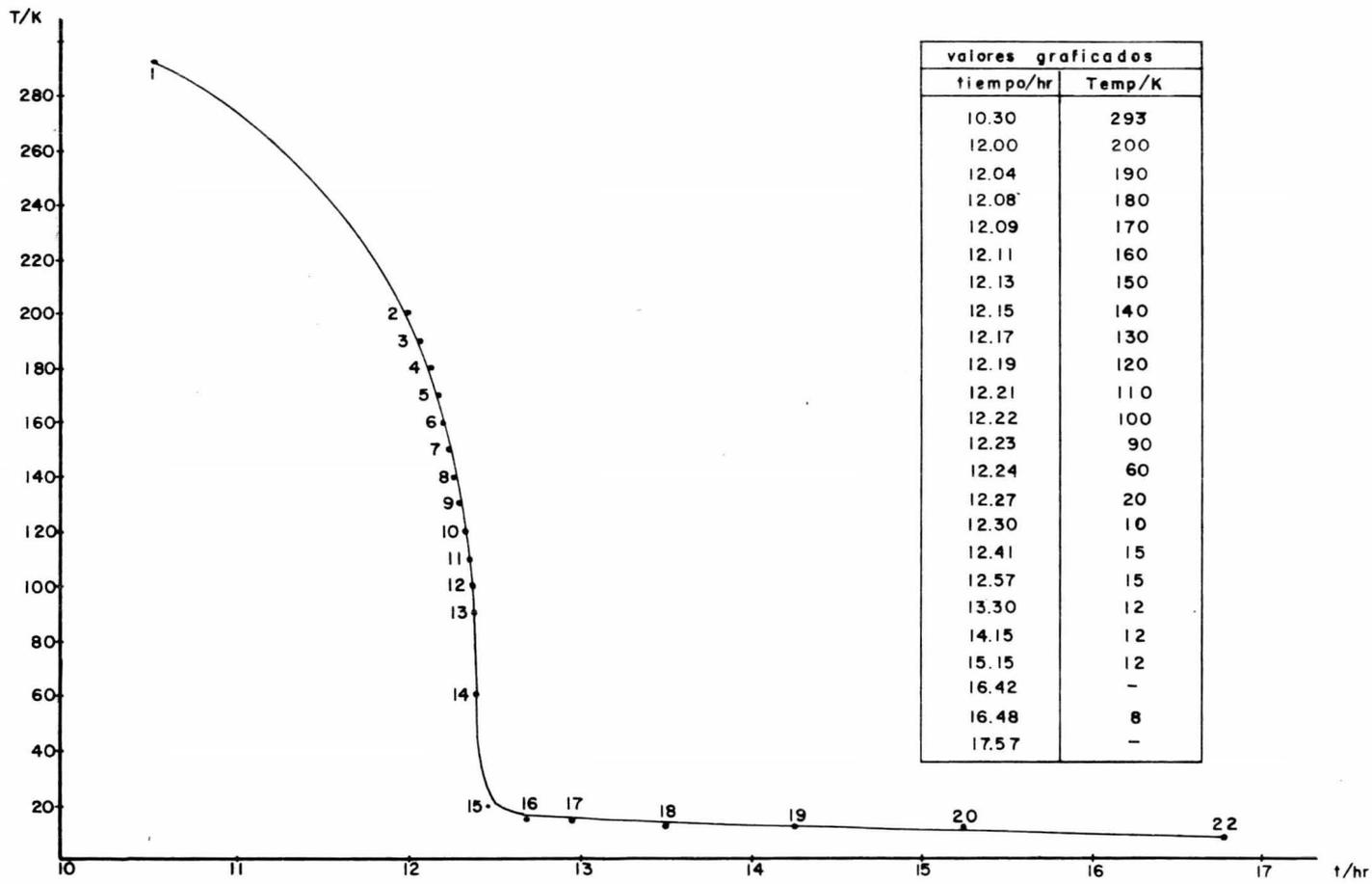
En el punto 18 se comenzó a licuar. Desde el  
punto 18 al 22, se licuó a una razón promedio de 9.5  
l/hra. En la gráfica se puede observar que en los  
puntos del 18 al 22, la temperatura a la cual se es-  
tuvo licuando es de 8 - 15 K; aunque la temperatura  
de licuefacción del helio, a presión atmosférica, es  
de 4.2 K.

Se tiene que indicar que la temperatura es me-  
dida por un termómetro de gas a volumen constante y  
que para obtener una medición exacta de la temperatu  
ra habría que aplicarle más correcciones a la tempe  
ratura medida. Como por ejemplo:

- a) la contracción del material del bulbo
- b) el gradiente de temperatura en el capilar
- c) que conecta el medidor con el bulbo
- c) el "volumen muerto" dentro del sistema

Conclusión.-

Durante ocho horas de operación y empezando a trabajar con un licuefactor a temperatura ambiente, se obtuvieron aproximadamente 50 l de helio líquido.



| valores graficados |        |
|--------------------|--------|
| tiempo/hr          | Temp/K |
| 10.30              | 293    |
| 12.00              | 200    |
| 12.04              | 190    |
| 12.08              | 180    |
| 12.09              | 170    |
| 12.11              | 160    |
| 12.13              | 150    |
| 12.15              | 140    |
| 12.17              | 130    |
| 12.19              | 120    |
| 12.21              | 110    |
| 12.22              | 100    |
| 12.23              | 90     |
| 12.24              | 60     |
| 12.27              | 20     |
| 12.30              | 10     |
| 12.41              | 15     |
| 12.57              | 15     |
| 13.30              | 12     |
| 14.15              | 12     |
| 15.15              | 12     |
| 16.42              | -      |
| 16.48              | 8      |
| 17.57              | -      |

HOJA DE CONTROL DE OPERACION

DATE 5-13-71 OPERATOR W.C.  
 NAME OF EXPERIMENT \_\_\_\_\_

EXPERIMENT NO. 137

TIME TO START OF THIS RUN: \_\_\_\_\_

| TIME | HELIUM THERMOMETER<br>°K. - KELVIN | GAS HOLDER RATE OF FALL<br>IN./MIN. | LIQUIFYING RATE<br>LITERS/HR. | MAGNEHELIC GAUGE<br>IN. H <sub>2</sub> O | ENGINE INLET PRESSURE<br>P.S.I. | HELIUM REFRIGERATOR DATA    |                             |                                      |  | NOTES ON METHOD OF CLEAN UP,<br>APPEARANCE OF LIQUID HELIUM,<br>SHUT DOWNS, ETC.   |
|------|------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------|--|---------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|--------------------------------------|--|--|
|      |                                    |                                     |                               |  |                                 | HELIUM THERMOMETERS         |                             |                                      |  |  |
|      |                                    |                                     |                               |  |                                 | SUPPLY PRESSURE<br>P.S.I.G. | RETURN PRESSURE<br>P.S.I.G. | TEMP. COOLING STREAM<br>°K. - KELVIN | TEMP. RETURNING STREAM<br>°K. - KELVIN |  |
| 1030 |                                    |                                     |                               |  |                                 |                             |                             |                                      |  | COOL DOWN CHA<br>AND INSERT ROT INIC<br>COLD 100 LITER HELIUM<br>DENAR LIQUID IN DENAR<br>NO WAY OF TELLING HOW<br>MUCH.   |
| 1128 | -                                  | -                                   | -                             | 10                                       | 240                             |                             |                             |                                      |  | EVAUATION & CLEAN UP<br>QUICK COOL DOWN<br>1. START ENGINE & PRECOOLING<br>2. CONNECT RUBBER HOSE FROM<br>TRANSFER TUBE TO REC. CONNECTION<br>3. OPEN RECOVERY VENT VALVE<br>4. OPEN TRANSFER VALVE 2 TURNS<br>5. PURGE LINE (1 MIN)<br>6. CLOSE REC VENT VALVE<br>7. OPEN REC VALVE<br>8. SET INTERNAL JT TO 0" |
| 1200 | 200                                | -                                   | -                             | 0  | 235                             |                             |                             |                                      |  |  |
| 1204 | 190                                | -                                   | -                             | 0  | 235                             |                             |                             |                                      |  |  |
| 1208 | 180                                | -                                   | -                             | 0  | 210                             |                             |                             |                                      |  |  |
| 1209 | 170                                | -                                   | -                             | 0  | 200                             |                             |                             |                                      |  |  |
| 1211 | 160                                | -                                   | -                             | 0  | 190                             |                             |                             |                                      |  |  |
| 1213 | 150                                | -                                   | -                             | 0  | 180                             |                             |                             |                                      |  |  |
| 1215 | 140                                | -                                   | -                             | 0  | 175                             |                             |                             |                                      |  |  |
| 1217 | 130                                | -                                   | -                             | 0  | 170                             |                             |                             |                                      |  | Empieza 2º comp.   |
|      | 120                                | -                                   | -                             | 0  |                                 |                             |                             |                                      |  |  |
| 1241 | 110                                | -                                   | -                             | 0  | 225                             |                             |                             |                                      |  |  |
| 1222 | 100                                | -                                   | -                             | 0  | 225                             |                             |                             |                                      |  |  |
| 1222 | 90                                 | -                                   | -                             | 0  | 225                             |                             |                             |                                      |  |  |
| 1224 | 60                                 | -                                   | -                             | 0  | 225                             |                             |                             |                                      |  |  |
|      | 20                                 | -                                   | -                             | 3  | 215                             |                             |                             |                                      |  | CLOSED TRANSFER VALVE<br>RESET JT TO 2.03"<br>CLOSED REC. VALVE  |
| 1230 | 10                                 |                                     |                               |  |                                 |                             |                             |                                      |  |  |
| 1241 | 15                                 |                                     |                               | 0  | 190                             |                             |                             |                                      |  | STOP ONE COMP<br>OPEN SHIELD VALVE (100 LIT. DENAR)<br>CONNECT HOSE FROM DENAR<br>TO REC CONNECTION<br>OPEN REC VENT 2 MIN<br>CLOSE INTERNAL JT<br>CLOSE REC VENT<br>OPEN REC VALVE<br>OPEN ROT TO 0"  |
| 1241 | 15                                 | 1/20"                               | 10                            | 15                                       | 200                             |                             |                             |                                      |  |  |
| 1300 | 12                                 | 10/125"                             | 9.5                           | 18                                       | 190                             |                             |                             |                                      |  |  |
| 1400 | 12                                 | 10/125"                             | 9.5                           | 15                                       | 190                             |                             |                             |                                      |  |  |
| 1515 | 12                                 | 10/128"                             | 9.3                           | 19                                       | 190                             |                             |                             |                                      |  |  |
| 1640 |                                    |                                     |                               |  |                                 |                             |                             |                                      |  |  |
| 1648 | 8                                  | 10/120"                             | 10                            | 10                                       | 185                             |                             |                             |                                      |  | CLOSE ST. INTERNAL<br>OPEN ST. INTERNAL<br>Fin de la licuación   |
| 1757 |                                    |                                     |                               |  |                                 |                             |                             |                                      |  |  |

FOLD

FIG. 6.1

C A P I T U L O        7

CONCLUSIONES Y COSTOS

### 7.1 Conclusiones

Se instaló un licuefactor de helio - hidrógeno tipo Collins, Modelo 50M, el cual está basado en el Método Collins, cuya característica esencial es el empleo de máquinas de expansión.

Las principales características de este sistema son: el uso de dos compresores de 15 HP que proporcionan el volumen necesario de helio gas; un contenedor que, además de servir para la recirculación del gas, mantiene una alimentación continua al licuefactor; y, además, el uso de una válvula Joule-Thomson.

También se instaló como equipo adicional un sistema de recuperación de gas, el cual trabaja automáticamente. Dicho equipo está compuesto primordialmente por dos bolsas de gas, un compresor de 7.5 HP y un múltiple de cilindros para almacenamiento.

La razón de licuefacción de este equipo es en promedio de 10 l/hr, cubriéndose las demandas de helio líquido, que en su totalidad se emplea en la investigación.

### 7.2 Análisis de costos

El análisis se realizará tomando como promedio de la producción de helio líquido una cantidad de 40 litros por día de funcionamiento del licuefactor, siendo la finalidad del estudio el calcular el pre-

cio por litro de helio líquido.

Datos generales.-

|  |                                   |
|--|-----------------------------------|
| Producción de helio líquido:   | 40 lt/día                         |
| Precio del gas:  | \$150.00/m <sup>3</sup>           |
| Precio del equivalente en gas de un litro de helio líquido:                | \$140.00                          |
| Sobreprecio debido a los cilindros (renta):                                | \$4.00/día; \$0.70/m <sup>3</sup> |
| Mano de obra de técnico:   | \$800.00/día; \$20.00/lt          |
| Amortización del equipo (\$100,000.00 al año):                             | \$800.00/día; \$20.00/lt          |
| Mantenimiento (\$50,000.00 al año):  | \$400.00/día; \$10.00/lt          |
| Gastos de funcionamiento (agua, energía eléctrica, nitrógeno líquido):     | \$1,172.00/día; \$29.30/lt        |
| Renta de un recipiente para helio líquido (Dewar con capacidad de 100 lt): | \$105.00/día                      |

Para la obtención de los datos anteriores se ha supuesto que el licuefactor trabajaría tres días por semana. Por lo tanto, el precio de un litro de helio líquido es:

|                              |          |
|------------------------------|----------|
| A ) Sin recuperación de gas: | \$220.00 |
| A' ) Con recipiente (Dewar): | \$325.00 |
| B ) Con recuperación de gas: | \$ 80.00 |
| B' ) Con recipiente (Dewar): | \$185.00 |

Además, el precio del helio líquido con recuperación se aumentará una cantidad extra, correspondiente a las posibles pérdidas de gas efectuadas por el cliente.

APENDICE I

Las tablas 1 y 2 de entalpía y entropía para el gas helio respectivamente, están en función de la temperatura y presión.

Con estos datos se han hecho las gráficas de las figuras (a) y (b) del Capítulo 2.

TABLA 1 ENTALPIA DEL GAS HELIO 4(<sup>4</sup>He) Joule mole<sup>-1</sup>(PRESION, ATMOSFERAS)

| Temperatura K | 1      | 2        | 5      | 10     | 15     | 20     | 25     | 30     | 40     | 50     | 60     |
|---------------|--------|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 4-215 f       | 13-91  | (liquid) |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
| 5             | 33-85  | (vapor)  |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
| 6             | 37-55  |          |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
| 7             | 42-06  | 154.8    | 86.0   | 82.5   | 89.8   | 98.2   | 107.3  | 116.7  | 136.0  | 155.4  | 174.6  |
| 8             | 45-34  | 183.1    | 135.6  | 165.8  | 168.2  | 174.9  | 172.5  | 170.8  | 148.9  | 167.6  | 186.2  |
| 9             | 49-54  | 207.8    | 174.9  | 195.8  | 199.1  | 203.4  | 201.0  | 199.1  | 163.7  | 181.4  | 199.3  |
| 10            | 51-79  | 229.0    | 204.0  | 206.3  | 209.1  | 214.6  | 211.4  | 208.9  | 166.1  | 186.6  | 214.4  |
| 11            | 53-85  | 253.8    | 233.5  | 231.5  | 231.5  | 234.6  | 231.4  | 229.2  | 182.3  | 199.3  | 230.2  |
| 12            | 55-72  | 276.3    | 258.7  | 257.5  | 257.5  | 260.3  | 257.1  | 254.9  | 208.9  | 219.2  | 247.8  |
| 13            | 57-42  | 298.4    | 282.7  | 281.0  | 281.0  | 284.5  | 281.4  | 279.2  | 219.4  | 232.4  | 266.3  |
| 14            | 58-99  | 320.3    | 306.1  | 304.8  | 304.8  | 308.5  | 305.4  | 303.2  | 230.4  | 245.4  | 281.0  |
| 15            | 60-46  | 342.0    | 329.2  | 328.1  | 328.1  | 332.0  | 328.9  | 326.7  | 241.5  | 257.7  | 300.5  |
| 16            | 61-82  | 363.6    | 353.1  | 352.1  | 352.1  | 356.3  | 353.2  | 351.0  | 252.6  | 269.9  | 322.7  |
| 17            | 63-11  | 385.2    | 374.8  | 374.0  | 374.0  | 378.5  | 375.4  | 373.2  | 263.5  | 281.9  | 346.6  |
| 18            | 64-31  | 406.6    | 397.2  | 397.2  | 397.2  | 399.7  | 397.6  | 395.4  | 274.4  | 293.9  | 361.7  |
| 19            | 65-45  | 428.0    | 419.5  | 419.5  | 419.5  | 421.9  | 419.7  | 417.5  | 285.3  | 305.9  | 381.9  |
| 20            | 66-54  | 449.3    | 441.6  | 441.6  | 441.6  | 443.9  | 441.8  | 439.6  | 296.2  | 317.0  | 402.0  |
| 21            | 67-59  | 470.6    | 463.6  | 463.6  | 463.6  | 465.9  | 463.8  | 461.6  | 307.1  | 328.3  | 422.2  |
| 22            | 68-61  | 491.8    | 485.9  | 485.9  | 485.9  | 488.2  | 486.1  | 484.0  | 318.0  | 340.0  | 442.2  |
| 23            | 69-60  | 512.9    | 508.0  | 508.0  | 508.0  | 510.3  | 508.2  | 506.1  | 328.9  | 351.9  | 462.2  |
| 24            | 70-57  | 533.9    | 529.9  | 529.9  | 529.9  | 532.2  | 530.1  | 528.0  | 339.8  | 363.8  | 484.2  |
| 25            | 71-52  | 554.8    | 551.7  | 551.7  | 551.7  | 554.0  | 551.9  | 549.8  | 350.7  | 375.7  | 506.2  |
| 26            | 72-45  | 575.6    | 573.4  | 573.4  | 573.4  | 575.7  | 573.6  | 571.5  | 361.6  | 387.6  | 528.2  |
| 27            | 73-36  | 596.3    | 595.0  | 595.0  | 595.0  | 597.3  | 595.2  | 593.1  | 372.5  | 400.0  | 550.2  |
| 28            | 74-25  | 616.9    | 616.5  | 616.5  | 616.5  | 618.8  | 616.7  | 614.6  | 383.4  | 412.9  | 572.8  |
| 29            | 75-12  | 637.4    | 637.8  | 637.8  | 637.8  | 640.1  | 638.0  | 635.9  | 394.3  | 426.0  | 595.4  |
| 30            | 75-97  | 657.8    | 659.0  | 659.0  | 659.0  | 661.3  | 659.2  | 657.1  | 405.2  | 439.1  | 618.0  |
| 31            | 76-82  | 678.1    | 680.1  | 680.1  | 680.1  | 682.4  | 680.3  | 678.2  | 416.1  | 452.2  | 640.6  |
| 32            | 77-66  | 698.3    | 701.1  | 701.1  | 701.1  | 703.4  | 701.3  | 699.2  | 427.0  | 465.3  | 663.2  |
| 33            | 78-49  | 718.4    | 722.0  | 722.0  | 722.0  | 724.3  | 722.2  | 720.1  | 437.9  | 478.4  | 685.8  |
| 34            | 79-31  | 738.4    | 742.8  | 742.8  | 742.8  | 745.1  | 743.0  | 740.9  | 448.8  | 490.0  | 708.4  |
| 35            | 80-12  | 758.3    | 763.6  | 763.6  | 763.6  | 765.9  | 763.8  | 761.7  | 459.7  | 501.1  | 731.0  |
| 36            | 80-92  | 778.1    | 784.2  | 784.2  | 784.2  | 786.5  | 784.4  | 782.3  | 470.6  | 512.2  | 753.6  |
| 37            | 81-71  | 797.8    | 804.7  | 804.7  | 804.7  | 807.0  | 804.9  | 802.8  | 481.5  | 523.3  | 776.2  |
| 38            | 82-49  | 817.4    | 825.1  | 825.1  | 825.1  | 827.4  | 825.3  | 823.2  | 492.4  | 534.4  | 798.8  |
| 39            | 83-26  | 836.9    | 845.4  | 845.4  | 845.4  | 847.7  | 845.6  | 843.5  | 503.3  | 545.5  | 821.4  |
| 40            | 84-02  | 856.3    | 865.6  | 865.6  | 865.6  | 867.9  | 865.8  | 863.7  | 514.2  | 556.6  | 844.0  |
| 41            | 84-77  | 875.6    | 885.7  | 885.7  | 885.7  | 888.0  | 885.9  | 883.8  | 525.1  | 567.7  | 866.6  |
| 42            | 85-52  | 894.8    | 905.7  | 905.7  | 905.7  | 908.0  | 905.9  | 903.8  | 536.0  | 578.8  | 889.2  |
| 43            | 86-26  | 913.9    | 925.6  | 925.6  | 925.6  | 927.9  | 925.8  | 923.7  | 546.9  | 589.9  | 911.8  |
| 44            | 87-00  | 932.9    | 945.4  | 945.4  | 945.4  | 947.7  | 945.6  | 943.5  | 557.8  | 601.0  | 934.4  |
| 45            | 87-73  | 951.8    | 965.1  | 965.1  | 965.1  | 967.4  | 965.3  | 963.2  | 568.7  | 612.1  | 957.0  |
| 46            | 88-46  | 970.6    | 984.7  | 984.7  | 984.7  | 987.0  | 984.9  | 982.8  | 579.6  | 623.2  | 979.6  |
| 47            | 89-18  | 989.3    | 1004.3 | 1004.3 | 1004.3 | 1006.6 | 1004.5 | 1002.4 | 590.5  | 634.3  | 1002.2 |
| 48            | 89-89  | 1007.9   | 1023.7 | 1023.7 | 1023.7 | 1026.0 | 1023.9 | 1021.8 | 601.4  | 645.4  | 1024.8 |
| 49            | 90-60  | 1026.4   | 1043.1 | 1043.1 | 1043.1 | 1045.4 | 1043.3 | 1041.2 | 612.3  | 656.5  | 1047.4 |
| 50            | 91-30  | 1044.8   | 1062.6 | 1062.6 | 1062.6 | 1064.9 | 1062.8 | 1060.7 | 623.2  | 667.6  | 1070.0 |
| 51            | 92-00  | 1063.1   | 1082.3 | 1082.3 | 1082.3 | 1084.6 | 1082.5 | 1080.4 | 634.1  | 678.7  | 1092.6 |
| 52            | 92-69  | 1081.3   | 1102.8 | 1102.8 | 1102.8 | 1105.1 | 1103.0 | 1100.9 | 645.0  | 689.8  | 1115.2 |
| 53            | 93-38  | 1100.4   | 1124.1 | 1124.1 | 1124.1 | 1126.4 | 1124.3 | 1122.2 | 655.9  | 700.9  | 1137.8 |
| 54            | 94-06  | 1119.3   | 1146.1 | 1146.1 | 1146.1 | 1148.4 | 1146.3 | 1144.2 | 666.8  | 712.0  | 1160.4 |
| 55            | 94-74  | 1138.1   | 1168.8 | 1168.8 | 1168.8 | 1171.1 | 1169.0 | 1166.9 | 677.7  | 723.1  | 1183.0 |
| 56            | 95-42  | 1156.8   | 1191.3 | 1191.3 | 1191.3 | 1193.6 | 1191.5 | 1189.4 | 688.6  | 734.2  | 1205.6 |
| 57            | 96-10  | 1175.4   | 1214.6 | 1214.6 | 1214.6 | 1216.9 | 1214.8 | 1212.7 | 699.5  | 745.3  | 1228.2 |
| 58            | 96-77  | 1193.9   | 1238.7 | 1238.7 | 1238.7 | 1241.0 | 1238.9 | 1236.8 | 710.4  | 756.4  | 1250.8 |
| 59            | 97-44  | 1213.2   | 1263.6 | 1263.6 | 1263.6 | 1265.9 | 1263.8 | 1261.7 | 721.3  | 767.5  | 1273.4 |
| 60            | 98-11  | 1232.4   | 1289.3 | 1289.3 | 1289.3 | 1291.6 | 1289.5 | 1287.4 | 732.2  | 778.6  | 1296.0 |
| 61            | 98-78  | 1251.5   | 1315.7 | 1315.7 | 1315.7 | 1318.0 | 1315.9 | 1313.8 | 743.1  | 789.7  | 1318.6 |
| 62            | 99-44  | 1270.5   | 1342.8 | 1342.8 | 1342.8 | 1345.1 | 1343.0 | 1340.9 | 754.0  | 800.8  | 1341.2 |
| 63            | 100-10 | 1289.4   | 1370.5 | 1370.5 | 1370.5 | 1372.8 | 1370.7 | 1368.6 | 764.9  | 811.9  | 1363.8 |
| 64            | 100-75 | 1308.2   | 1408.8 | 1408.8 | 1408.8 | 1411.1 | 1409.0 | 1406.9 | 775.8  | 823.0  | 1386.4 |
| 65            | 101-40 | 1326.9   | 1447.7 | 1447.7 | 1447.7 | 1450.0 | 1447.9 | 1445.8 | 786.7  | 834.1  | 1409.0 |
| 66            | 102-05 | 1345.5   | 1487.1 | 1487.1 | 1487.1 | 1489.4 | 1487.3 | 1485.2 | 797.6  | 845.2  | 1431.6 |
| 67            | 102-70 | 1364.1   | 1527.0 | 1527.0 | 1527.0 | 1529.3 | 1527.2 | 1525.1 | 808.5  | 856.3  | 1454.2 |
| 68            | 103-34 | 1382.6   | 1567.4 | 1567.4 | 1567.4 | 1569.7 | 1567.6 | 1565.5 | 819.4  | 867.4  | 1476.8 |
| 69            | 103-98 | 1401.1   | 1608.3 | 1608.3 | 1608.3 | 1610.6 | 1608.5 | 1606.4 | 830.3  | 878.5  | 1499.4 |
| 70            | 104-62 | 1419.5   | 1649.6 | 1649.6 | 1649.6 | 1651.9 | 1649.8 | 1647.7 | 841.2  | 889.6  | 1522.0 |
| 71            | 105-25 | 1437.8   | 1691.3 | 1691.3 | 1691.3 | 1693.6 | 1691.5 | 1689.4 | 852.1  | 900.7  | 1544.6 |
| 72            | 105-88 | 1456.1   | 1733.4 | 1733.4 | 1733.4 | 1735.7 | 1733.6 | 1731.5 | 863.0  | 911.8  | 1567.2 |
| 73            | 106-50 | 1474.3   | 1775.9 | 1775.9 | 1775.9 | 1778.2 | 1776.1 | 1774.0 | 873.9  | 922.9  | 1589.8 |
| 74            | 107-13 | 1492.5   | 1818.8 | 1818.8 | 1818.8 | 1821.1 | 1819.0 | 1816.9 | 884.8  | 934.0  | 1612.4 |
| 75            | 107-75 | 1510.6   | 1862.1 | 1862.1 | 1862.1 | 1864.4 | 1862.3 | 1860.2 | 895.7  | 945.1  | 1635.0 |
| 76            | 108-37 | 1528.7   | 1905.8 | 1905.8 | 1905.8 | 1908.1 | 1906.0 | 1903.9 | 906.6  | 956.2  | 1657.6 |
| 77            | 109-00 | 1546.8   | 1950.0 | 1950.0 | 1950.0 | 1952.3 | 1950.2 | 1948.1 | 917.5  | 967.3  | 1680.2 |
| 78            | 109-61 | 1564.8   | 1994.6 | 1994.6 | 1994.6 | 1996.9 | 1994.8 | 1992.7 | 928.4  | 978.4  | 1702.8 |
| 79            | 110-23 | 1582.7   | 2039.6 | 2039.6 | 2039.6 | 2041.9 | 2039.8 | 2037.7 | 939.3  | 989.5  | 1725.4 |
| 80            | 110-84 | 1600.5   | 2085.0 | 2085.0 | 2085.0 | 2087.3 | 2085.2 | 2083.1 | 950.2  | 1000.6 | 1748.0 |
| 81            | 111-45 | 1618.3   | 2130.8 | 2130.8 | 2130.8 | 2133.1 | 2131.0 | 2128.9 | 961.1  | 1011.7 | 1770.6 |
| 82            | 112-06 | 1636.0   | 2177.0 | 2177.0 | 2177.0 | 2179.3 | 2177.2 | 2175.1 | 972.0  | 1022.8 | 1793.2 |
| 83            | 112-67 | 1653.7   | 2223.5 | 2223.5 | 2223.5 | 2225.8 | 2223.7 | 2221.6 | 982.9  | 1033.9 | 1815.8 |
| 84            | 113-27 | 1671.4   | 2270.3 | 2270.3 | 2270.3 | 2272.6 | 2270.5 | 2268.4 | 993.8  | 1045.0 | 1838.4 |
| 85            | 113-88 | 1689.1   | 2317.4 | 2317.4 | 2317.4 | 2319.7 | 2317.6 | 2315.5 | 1004.7 | 1056.1 | 1861.0 |
| 86            | 114-48 | 1706.8   | 2364.8 | 2364.8 | 2364.8 | 2367.1 | 2365.0 | 2362.9 | 1015.6 | 1067.2 | 1883.6 |
| 87            | 115-08 | 1724.4   | 2412.5 | 2412.5 | 2412.5 | 2414.8 | 2412.7 | 2410.6 | 1026.5 | 1078.3 | 1906.2 |
| 88            | 115-68 | 1741.9   | 2460.5 | 2460.5 | 2460.5 | 2462.8 | 2460.7 | 2458.6 | 1037.4 | 1089.4 | 1928.8 |
| 89            | 116-28 | 1759.4   | 2508.8 | 2508.8 | 2508.8 | 2511.1 | 2509.0 | 2506.9 | 1048.3 | 1100.5 | 1951.4 |
| 90            | 116-87 | 1776.9   | 2557.4 | 2557.4 | 2557.4 | 2559.7 | 2557.6 | 2555.5 | 1059.2 | 1111.6 | 1974.0 |
| 91            | 117-46 | 1794.3   | 2606.3 | 2606.3 | 2606.3 |        |        |        |        |        |        |

APENDICE II

Las tablas 1 y 2 muestran el diagrama eléctrico (unión en bloques) y el diagrama unifilar (unión interna) del sistema, respectivamente.

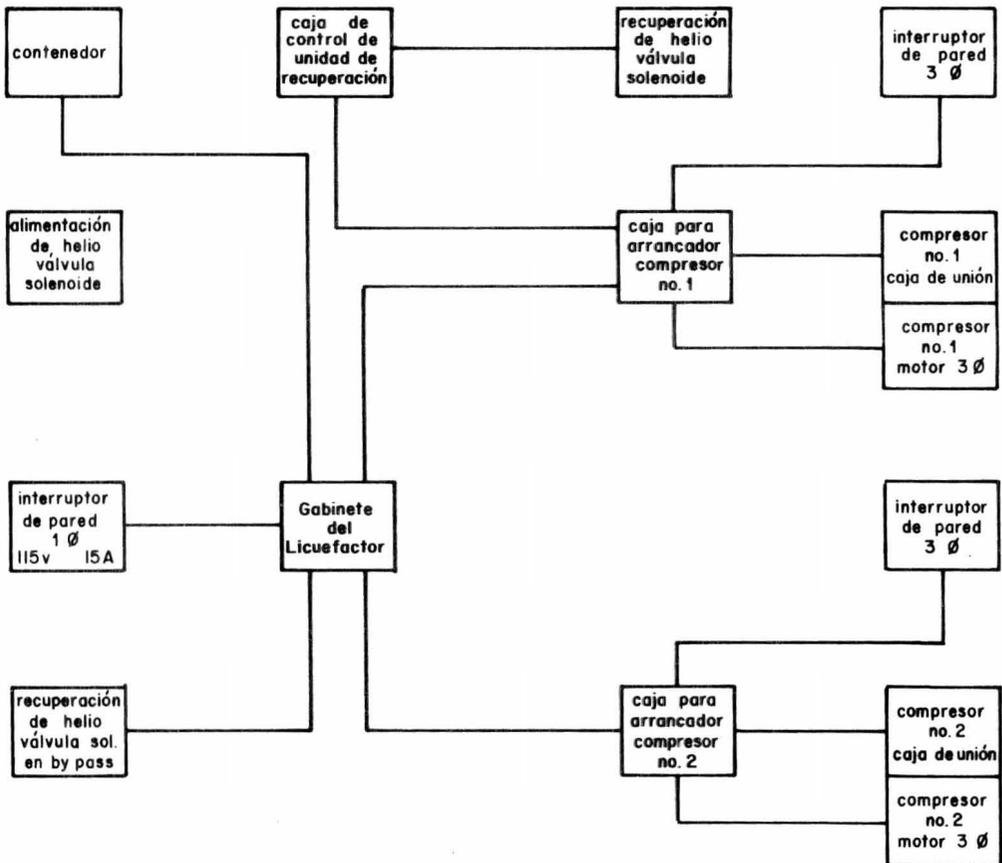


DIAGRAMA DEL SISTEMA ELECTRICO

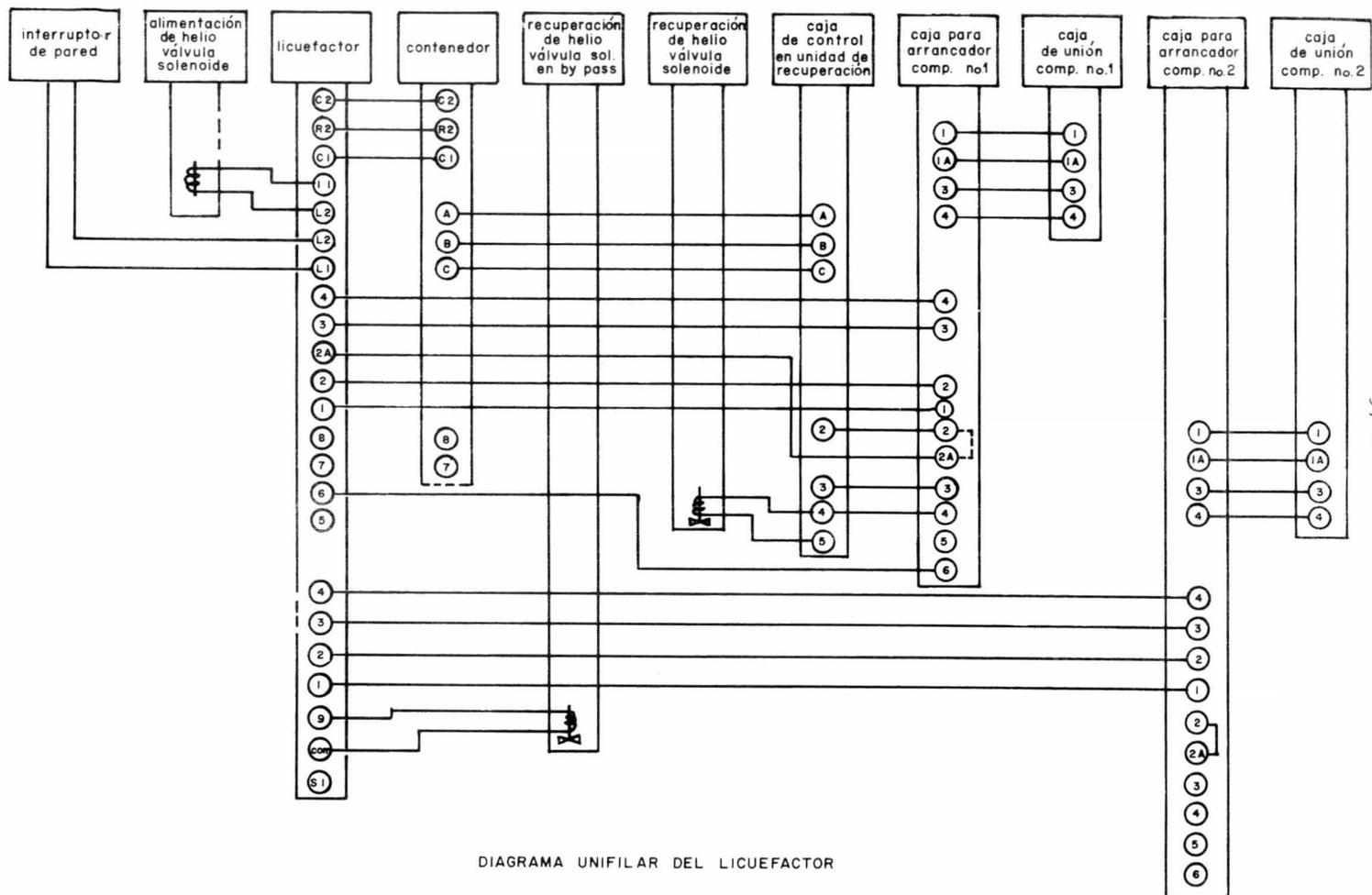


DIAGRAMA UNIFILAR DEL LICUEFACTOR

TABLA 1

Como el sistema está equipado con el contenedor estándar, la velocidad de licuefacción puede ser determinada rápidamente con la carta de la Fig. 9-1. Las condiciones de temperatura y presión sobre las cuales está basada la carta se muestran en la esquina superior del lado derecho. Dentro de los límites de esas condiciones, la velocidad de licuefacción puede ser encontrada por inspección, como una función del tiempo requerido por el indicador de altura del contenedor en recorrer 10 pulg. (25.4 cm).

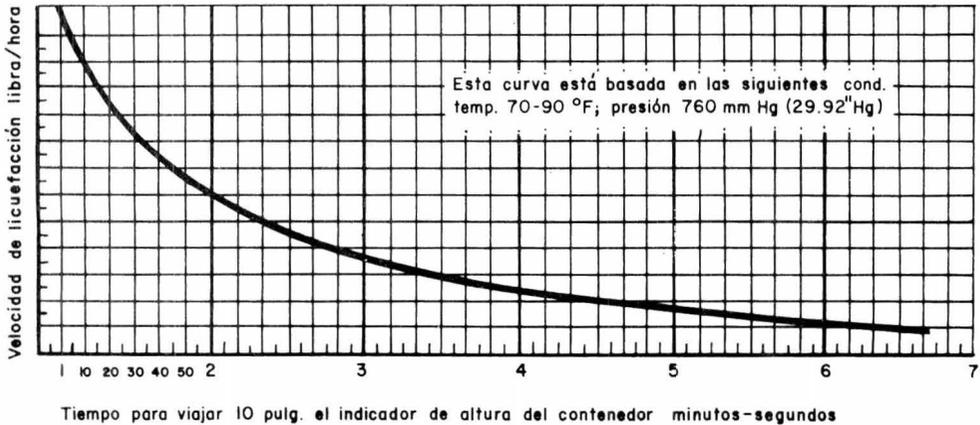


FIG. 9.1

BIBLIOGRAFIA

1. Hoare, Jackson, Kurti. Experimental Cryophysics. London Butterworths, 1961
2. Guy Kendall White. Experimental Techniques in Low-Temperature Physics. Clarendon Press, Oxford, 1959
3. Manual Técnico de Tecnología Criogénica, 1968
4. Mark W. Zemansky. Heat and Thermodynamics. McGraw-Hill Book Co., New York, 1968