

UCH-FC  
LIC-F  
R845

UNIVERSIDAD DE CHILE



3 5601 20226 1404

UN CRIOSTATO DE He<sup>4</sup> - He<sup>3</sup> PARA TEMPERATURAS  
DE HASTA 0,3 °K.



MIGUEL ROTH

Departamento de Física  
Facultad de Ciencias  
Universidad de Chile

UCH-FC  
LIC-F  
R845

El presente trabajo se presenta para cumplir con los requisitos para optar al título de Licenciado en Física.

El Laboratorio comenzó a instalarse en mayo de 1970 y el 31 de diciembre de ese mismo año se realizó la primera prueba en el sistema completo con resultados altamente satisfactorios.

Deseo agradecer fervientemente al Dr. Al Sweedler por sus invalorable consejos y la paciente discusión, así como al Lcdo. Sergio Ortega por la ayuda dispensada generosamente en todo momento. Hubiera sido prácticamente imposible poner en marcha el laboratorio sin la asistencia constante de Juan Bravo y de los talleres y Departamento Técnico de la Facultad.

Santiago, marzo de 1971.

## INDICE

	Pagina
I. INTRODUCCION	1
II. DESCRIPCION DEL APARATO	2
III. SISTEMA DE BOMBEO	6
IV. MEDICION DE LA TEMPERATURA	7
V. SISTEMA DE RECUPERACION DE He <sup>4</sup>	10
VI. VELOCIDAD DE BOMBEO, CAPACIDAD DE ENFRIAMIENTO Y FUGAS DE CALOR	10
<u>GRAFICOS Y ESQUEMAS</u>	
Gráfico 1: Presión de vapor de He <sup>4</sup> vs. Temperatura	22
Grafico 2: Presión de vapor de He <sup>3</sup> vs. Temperatura	22
Esquema 1: Termo de He <sup>4</sup> y linea de bombeo	23
Esquema 2: Termo de He <sup>3</sup> y linea de bombeo	24
Esquema 3: Linea de bombeo completa	25
Esquema 4: Recuperador de He <sup>4</sup>	27
REFERENCIAS	28

## UN CRIOSTATO DE He<sup>4</sup> - He<sup>3</sup> PARA TEMPERATURAS DE HASTA 0,3°K

El Laboratorio de Física del Estado Sólido de la Facultad, concentra sus esfuerzos en el área de Superconductividad y Magnetismo.

La infraestructura básica del Laboratorio es el Criostato que describiremos, pues prácticamente todas las mediciones se realizan a bajas temperaturas. Tanto las mediciones de superconductividad bajo presión que se proyectan para un futuro cercano como las de superconductividad deben hacerse a temperaturas inferiores a los 4,2°K, que es la temperatura de ebullición del helio líquido.

### I. Principio de Funcionamiento

La técnica de gases líquidos, base de operación de este aparato, es la más difundida para obtener bajas temperaturas en el rango de 80 a 0,3°K, dependiendo dicho rango del gas empleado.

El principio de operación es simple: La presión de vapor de un líquido está conectada con su temperatura a través de la relación aproximada<sup>(1)</sup>

$$\text{Log } P = \frac{A}{T} + B \text{ Log } T + C \quad (A < 0) \quad (1)$$

Esta propiedad permite reducir la temperatura de un líquido disminuyendo su presión de vapor. Para comprenderlo más claramente, recordemos que para evaporar una cantidad de líquido es necesario entregarle una cantidad de calor, su calor de vaporización. Si logramos evaporar esa cantidad de

2.-

líquido de alguna forma sin entregarle calor, el sistema bajará su temperatura en forma equivalente. La forma de evaporar el líquido es impidiendo que llegue a equilibrio con su vapor. En efecto cuando un líquido está en equilibrio con su presión de vapor, hay un número igual de moléculas evaporándose y condensándose al mismo tiempo. Se trata entonces de evitar la condensación, llevándose las moléculas de gas antes de su condensación. De esta forma lograremos disminuir la temperatura. El límite de este método está dado por la temperatura a la cual la presión de vapor se hace muy pequeña.

## II Descripción del Aparato

El criostato consta, esencialmente, de dos termos, uno dentro del otro. Cada termo lleva acoplado un sistema de bombeo que permite reducir la presión de vapor del líquido en cuestión y bajar de esa forma la temperatura.

### Termo de He<sup>4</sup>

El primer termo contiene un volumen aproximado de 6 litros de He<sup>4</sup> líquido, cuyas propiedades pueden verse en el gráfico 1, sobre el cual se bombea con una bomba de vacío de alta velocidad (2.000 litros/minuto). Como se trata de reducir la presión de vapor en forma continua y sin permitir que se acumule gas en la superficie, susceptible de condensar nuevamente, la velocidad de bombeo es crítica. El valor de 2.000 litros/minuto es la velocidad de la bomba en su entrada, pero cualquier tubo que se acople posteriormente significa necesariamente una disminución apreciable de dicha velocidad. En el párra-

fo 4 se muestra un cálculo de la velocidad de bombeo aplicada a este caso.

Hay dos razones que limitan la capacidad del He<sup>4</sup> como líquido criogénico:

Por debajo de 2,17°K. el He<sup>4</sup> presenta propiedades de superfluidez, y entre estas, la característica conocida como "trepado laminar". Debido a este efecto, una delgada película de líquido comienza a trepar por las paredes del termo, hasta llegar a zonas más calientes, donde se evapora, dando lugar a una cantidad de gas que debe ser removida, además de la evaporación normal. En nuestro termo se perderán aproximadamente  $6,3 \times 10^{-2}$  lits./min de He gaseoso, que limitan la velocidad de bombeo y el vacío final.

La segunda razón se debe a la baja presión de vapor del He<sup>4</sup> alrededor de 1,2°K ( $p = 1,2$  mm Hg) lo cual obligaría a usar un sistema de alta velocidad y alto vacío para evacuar el termo de He<sup>4</sup>, donde de todos modos estamos limitados por el problema anterior. Por consiguiente usamos el termo de He<sup>4</sup> para enfriar todo el sistema hasta 1,3°K.

Siempre en referencia a este termo, recalcamos que hay varios accesos a él, que permiten:

- a) medir la presión de vapor del He<sup>4</sup> (Ver: Medición de la Temperatura)
- b) producir una sobrepresión de He<sup>4</sup> gaseoso que impida la entrada de aire al termo. Puede ser necesario abrir el termo momentáneamente cuando éste se encuentra frío y si llegara aire al interior en ese momento, inmediatamente se llenaría de hielo, con los consiguientes problemas.
- c) evacuar su espacio vacío. El aislante de todo termo de doble pared para

bajas temperaturas, está constituido por un espacio entre las paredes que se evacúa. Sin embargo los termos de He no suelen tener este espacio evacuado en forma permanente. La razón de esto es la siguiente: El He gaseoso puede difundir a través de las paredes del termo de vidrio, hacia el espacio vacío. Los vidrios duros empleados en la construcción de termos tienen una permeabilidad bastante alta. A temperatura ambiente la difusividad expresada en  $\text{cm}^3$  de gas difundido por segundo que atraviesa  $1\text{cm}^2$  de pared de  $1\text{mm}$  de espesor con una diferencia de presión de 1 atm. es de  $5 \times 10^{-10}$ .

Supongamos que en nuestro termo hay unos  $100\text{ cm}^2$  de área a temperatura ambiente y que el volumen del espacio vacío sea de 1 litro aproximadamente; con estos datos se puede estimar un tiempo del orden de 20 minutos para que el vacío sea peor que  $1 \times 10^{-5}$  mm. Afortunadamente la difusividad cae exponencialmente con la temperatura y en el termo frío el tiempo alcanza a unos 7 días sin problemas. Debido a esto, un espacio vacío permanente presentaría después de ese tiempo una cantidad de gas apreciable que arruina la aislación. En estas condiciones se dice que el termo está "blando" (soft). En el párrafo correspondiente a Fugas de Calor puede verse el cálculo de la conducción de calor por efecto del gas residual.

### Termo de He<sup>3</sup> (ver esquema 2)

El gas usado en esta etapa, es un isótopo del He llamado He<sup>3</sup> cuyas propiedades pueden verse en el gráfico 2. Puesto que su presión de vapor por debajo de la temperatura límite de He<sup>4</sup> es mucho mayor que la de este, se lo usa

como refrigerante secundario. (Presión de 1 K = 8,8.2 mm Hg).

El termo de He<sup>3</sup> es, en realidad el corazón del sistema. Consiste de una pequeña cápsula cilíndrica de unos 7 cm de largo por unos 2 cm de diámetro, con su espacio vacío que es una ampolla que rodea la cápsula. Todo el termiteo es de vidrio y sus salidas se unen a tubos metálicos mediante sendos sellos vidrio-metal. Los mayores problemas de construcción se encuentran en esta etapa. Para obtener He<sup>3</sup> líquido se deja entrar una pequeña cantidad de gas en el espacio correspondiente previamente evacuado, hasta que se lee en un manómetro, presión atmosférica. A medida que el gas condensa en contacto con un tubo de acero a temperatura de He<sup>1</sup> enfriado, la presión del manómetro va bajando, pudiéndose agregar entonces más gas, y así hasta licuar aproximadamente 2 cm<sup>3</sup> de He<sup>3</sup> líquido, es decir 1,5 lts de gas aproximadamente. Todo el sistema está suspendido de este tubo de acero que sirve a diferentes fines, a saber:

- a) El tubo enfría el termo por conducción
- b) El tubo en contacto con el baño de He<sup>1</sup>, condensa el He<sup>3</sup>.
- c) El bombeo sobre el He<sup>3</sup> líquido se hace a través del mismo tubo.

La cantidad de He<sup>3</sup> líquido que se recoge, sirve para sumergir completamente la muestra y sus adminículos (Ver fuga de calor en el He<sup>3</sup>). Puesto que es necesaria una muy buena aislación en este termo, el espacio vacío debe ser evacuado a temperatura ambiente, pues una vez frío el termo, este actúa como una bomba de vacío.

Para bombear sobre el He<sup>3</sup> se usa una bomba difusora de 4" de velocidad

nominal 200 lts/seg. y una bomba mecánica adaptada como depósito de  $\text{He}^3$  gaseoso. El diámetro pequeño de la línea de bombeo en una de sus partes, reduce enormemente la velocidad de bombeo. Para un cálculo detallado de fugas de calor y capacidad de enfriamiento puede verse el capítulo correspondiente en este trabajo.

### III. Sistemas de Bombeo (Ver esquema 3)

Habíamos visto que cada termo dispone de su línea principal de bombeo que llamaremos "línea rápida". En estas líneas lo fundamental, como se explicó es la velocidad de bombeo.

Existe además en el criostato, un sistema que hemos llamado "línea de limpieza". Mediante una serie ingeniosa de válvulas y bombas de vacío, es posible tener acceso a cualquier parte del sistema tanto para hacer llegar  $\text{He}^4$  o aire, evacuar y "enjuagar" todas las partes.

Como ejemplo veamos el procedimiento para eliminar el  $\text{He}^1$  gaseoso del espacio vacío del termo grande. Si nos limitáramos a bombear sobre este espacio, llegaríamos en un momento al límite de nuestra bomba de vacío. Resulta más eficaz, en cambio, "diluir" el  $\text{He}^1$  con grandes cantidades de aire que después se bombea y que arrastra el  $\text{He}^1$ . El aire remanente no nos preocupa en el espacio vacío pues irremediablemente se congelará en las paredes de forma que no puede contribuir a la conducción.

#### IV. Medición de la Temperatura

El mismo principio usado en la operación del criostato es usado para medir la temperatura del baño. Usando la relación (I) se han confeccionado tablas reconocidas como patrones internacionales para termometría tanto para He<sup>4</sup> como He<sup>3</sup>. Por ejemplo la tabla denominada "The 1962 He<sup>3</sup> scale of temperatures" que usa una relación algebraica del tipo

(II)  $\ln P = A/T + B \ln T + C T + DT^2 + ET^3 + FT^4 + G$ , es usada internacionalmente en termometría de He<sup>3</sup> entre 3,3249 y 0,2°K. Existen tablas similares para He<sup>4</sup> y otros gases líquidos. (2)

Cabe señalar que la relación de Presión - Temperatura es una relación termodinámica y por consiguiente sólo es válida en el equilibrio. Cuando la temperatura decae debido al bombeo sobre el líquido, esta relación no es útil pero regulando la velocidad de bombeo se puede establecer un equilibrio dinámico a cualquier temperatura dentro del rango. Rigurosamente hablando, el equilibrio se establece entre el calor extraído por evaporación y el calor que llega por fuga de calor. Resulta conveniente sobreenfriar el baño y permitir luego, que el sistema llegue sólo a su temperatura de equilibrio.

Por tanto el método para medir la temperatura consiste en medir con la mayor precisión posible, la presión de vapor. El error en la medición de la temperatura es el reflejo de la imprecisión en la lectura de la presión. Como ejemplo estimemos el error que se comete debido al error en el ma-

nómetro McLeod CVC usado en la línea de He<sup>3</sup>. Usamos para eso la relación (I) que es una aproximación, tomando los valores numéricos para las constantes de la escala 1962. Resulta:

$$(III) \quad \Delta T = \exp(-(B+C+A/T) (1-A/T)e^{A/T})^{-1} \Delta p$$

Para  $T=1^\circ K$  la presión de vapor vale 8,8 mm y  $\Delta p=1\%$ . Con estos datos resulta  $\Delta T=8 \times 10^{-4}$ . Es decir el error en la temperatura debido al error de lectura de la presión está en los miligrados.

Cuando se miden temperaturas mediante presión de vapor, debe tenerse en cuenta en algunos casos lo que se llama diferencia termomolecular de la presión.

Esta diferencia proviene del hecho que el manómetro se halla a una temperatura diferente de la del gas en la superficie del líquido. Roberts y Sydorjak<sup>(3)</sup> midieron esta diferencia para He<sup>3</sup> y He<sup>4</sup>.

En nuestro caso en la zona donde esta diferencia es máxima, resulta un factor de corrección entre la presión medida y la real de modo que

$$P_{\text{real}} = 0,661 P_{\text{med.}}$$

Supongamos que nuestra medición de presión indica  $P_{\text{med}} = 28,115$  micrones de Hg. Esta presión corresponde a una temperatura de He<sup>3</sup>  $T_{\text{med}} = 0,10^\circ K$ . Aplicando la corrección, resulta  $P_{\text{real}} = 18,584$  micrones, lo que corresponde a una  $T_{\text{real}} = 0,385$  grados Kelvin. De ese modo

$$\Delta T = 0,01^\circ K$$

$$\text{y } \frac{\Delta T}{T} = 0,025 \text{ lo que significa } 2,5\% \text{ de error}$$

Esta corrección se hace totalmente despreciable a temperaturas ligeramente mayores; por ejemplo para  $0,5^{\circ}\text{K}$  la corrección en la presión está dentro del error de lectura de la misma.

De todos modos el problema de la diferencia termomolecular a muy bajas temperaturas como el de inhomogeneidades térmicas en el líquido se resuelve mediante un termómetro local. Esto se logra mediante el uso de crioresistores, que se ubican junto a la muestra. La forma del portamuestras y la buena conductividad del portamuestras así lo permiten. Estos resistores de carbón tienen una dependencia muy fuerte con la temperatura por tratarse de semiconductores. Una vez calibrada la resistencia contra puntos fijos de temperatura conocida, como temperaturas de ebullición o transiciones superconductoras bien estudiadas, pueden usarse con excelentes resultados.

Los manómetros usados en el criostato son cinco:

- a)  $\text{He}^4$ : Dos manómetros mecánicos Wallace & Tiernan de diferentes rangos hasta  $0,1$  mm de Hg. y un manómetro de mercurio tipo McLeod marca Vacustat Edwards de  $10$  a  $0,01$  mm de Hg.
- b)  $\text{He}^3$ : Un manómetro de mercurio tipo "U" y un manómetro tipo McLeod marca CVC de  $1,5\%$  de precisión y un rango de  $10$  a  $10^{-5}$  mm de Hg.

#### V. Sistema de Recuperación de He<sup>4</sup>

El Helio líquido provisto por el Laboratorio de Criogénesis del Departamento de Física de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, es recuperado en su casi totalidad en forma gaseosa y recomprimido, permitiendo un aprovechamiento integral del helio.

Este método, cuya eficiencia es del 90%, se hace absolutamente necesario pues el helio debe importarse, lo cual implica grandes gastos y largos períodos de demora en las importaciones.

Esencialmente se trata de un globo de gran volumen y casi impermeable al helio, que actúa como gasómetro, y un compresor. El helio gaseoso producto de la ebullición del líquido es almacenado temporalmente en el globo de donde el compresor lo toma para enviarlo a los cilindros de almacenaje a una presión de 2.000 libras/pulg<sup>2</sup>. (aprox. 150 atm.).

El globo cuenta con un sistema electromagnético de seguridad que acciona el compresor cuando se llena el globo y lo detiene cuando está vacío. Hay además una válvula mecánica de seguridad que evitaría en caso de falla del sistema eléctrico, el estallido del globo con la consiguiente pérdida. Además es posible operar el compresor manualmente. Un intricado sistema de válvulas y protecciones hacen casi despreciable la posibilidad de un accidente.

El diagrama de flujo del recuperador puede verse en el Esquema 4.

#### VI. Velocidad de Bombeo, Capacidad de Enfriamiento y Fugas de Calor

Cuando se dispone de una bomba de vacío de velocidad  $S_p$  medida a su en-

trada y de una línea de bombeo que nos une con el sistema a evacuar, la velocidad real  $S$  está dada por la expresión:

$$(IV) \quad \frac{1}{S} = \frac{1}{S_p} + \frac{1}{F}$$

donde  $F$  es la conductancia de la línea ó  $1/F$ , la impedancia. <sup>(4)</sup>

Hay diferentes formas de calcular la impedancia de una línea de bombeo, dependiendo estas formas de la relación entre camino libre medio de las moléculas y el diámetro del tubo. En nuestro caso dicha relación es mayor que la unidad lo cual se dice que corresponde a la zona de flujo molecular.

$$\lambda = \text{Camino libre medio} = 14,3 \text{ cm}$$

$$d = \text{diámetro} = 5 \text{ cm}$$

En el esquema 1 puede verse que la línea que lleva del termo de  $\text{He}^+$  a la bomba de alta velocidad es bastante larga. Para evitar que ese hecho nos limitara mucho la velocidad de la bomba, decidimos usar el tubo mas grueso que fuera razonable y se usó en la mayor parte de la línea, cañería de 2" de diámetro. La línea en su totalidad se compone de tres tipos de tubos cuyos radios y largos son; en centímetros.

$a_i$	$l_i$
1,25	8
1,72	17,5
2,5	280

paralelo. La expresión de la conductancia de un tubo cilíndrico de radio  $\underline{a}$  y largo  $\underline{l}$  es: (5)

$$(V) \quad F = 30,48 \frac{a^3}{l} (T/M)^{1/2}$$

Siendo  $T = 300^\circ K$

$M =$  Masa atómica

del He

En nuestro ejemplo

$$F_i = 30,48 \cdot (T/M)^{1/2} \left( a_i^3 / l_i \right)$$

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{300} (4,2 + 3,5 + 17,9)$$

Es decir:

$$F = 12 \text{ lts. /seg.}$$

La velocidad real de bombeo es entonces:

$$S = \text{velocidad Real} = \frac{(Sp) (12)}{Sp + 12}$$

Las bombas disponibles para la compra eran de 500, 1000, 1500 y 2000  $\frac{\text{Lts}}{\text{Min}}$

y calculando la velocidad real era razonable comprar la de 1500 litros, aunque por razones de rapidéz de entrega optamos por la de 2000 litros. Con esta bomba la velocidad final que tendremos en el criostato es de 540 lts./min.

Es notable la influencia de la línea.

Con esta velocidad estamos en condiciones de establecer un orden de magnitud para la potencia extraída del criostato en forma de calor. Tomamos el valor del calor de vaporización  $\text{He}^{\frac{1}{2}}$  más desfavorable y este es 83 Joul/mol.



Suponiendo que la velocidad se mantiene constante, tenemos que

$$P = \frac{S \cdot H_v}{V_m \cdot 60} \quad (\text{Watt})$$

S = Velocidad de bombeo

V<sub>m</sub> = Volumen Molar

Resulta que la potencia extraída es  $P = 35 \text{ Watt}$ .

Para tener una idea de si este enfriamiento es suficiente para nuestros fines, calculemos el tiempo que nos lleva enfriar la masa de He<sup>4</sup> desde su temperatura de ebullición hasta 2,19°K. En este rango, el calor específico del He<sup>4</sup> tiene un valor promedio de 1 cal/gm. °K.

La cantidad de calor que debemos extraer es:

$$Q = M C_v \Delta T$$

M = Masa de He<sup>4</sup>

C<sub>v</sub> = Calor específico

$$\Delta T = 2 \text{°K}$$

que resulta ser igual a

$$Q = 13 \cdot 10^2 \text{ cal.} \approx 54 \cdot 10^2 \text{ Joules}$$

Como la potencia extraída es 35 Joules/seg. resulta que el tiempo necesario para bajar la temperatura es

$$t = 150 \text{ segundos}$$

Si recordamos que somos capaces de bombear 540 lts/min. y que nos demoramos 2,5 minutos en alcanzar esta temperatura, podemos estimar la cantidad de helio necesaria para bajar la temperatura en el intervalo indicado.

Resulta ser esta un volumen de helio gaseoso de 1350 lts. que equivale a 2,4 litros de helio líquido.

Debemos tener en cuenta además las pérdidas en capacidad de enfriamiento debido a fugas de calor. Llamamos así a toda la energía que llega al criostato desde el exterior además de la muestra o equipo a enfriar. Hay tres aspectos que deben ser tenidos en cuenta, a saber: (6)

- a) Conducción de Calor por Sólidos
- b) Conducción por gas residual
- c) Calor por radiación

El primer tipo de fuga se realiza a través de todos los sólidos que llegan a la masa fría y en los que se establece un gradiente de temperatura. Hay formas eficientes de minimizar esta contribución, usando materiales de baja conductividad térmica y la menor cantidad posible de ellos.

La potencia que llega al criostato por conducción de sólidos es:

(VI)

$$\dot{Q} = \lambda(T) A \frac{\partial T}{\partial x}$$

T = Temperatura

A = Area del tubo o barra que llega

$\lambda(T)$  = Coeficiente de Conducción

Para una barra sólida de sección uniforme y largo  $l$ , y área A que es tenida entre dos temperaturas extremas  $T_1$  y  $T_2$ :

$$\dot{Q} = \frac{A}{l} \int_{T_1}^{T_2} \lambda(T) dT$$

Definamos un coeficiente medio

$$\bar{\lambda} = \frac{\int \lambda(T) dT}{(T_2 - T_1)}$$

en esta forma resulta

$$\dot{Q} = \frac{A}{l} \bar{\lambda} (\tau_1 - \tau_2)$$

En nuestro caso los responsables de la fuga de calor por conducción son los tubos que sujetan el termo de He<sup>3</sup> y sirven para evacuar su espacio. Las secciones y longitudes son respectivamente:

$$A_1 = 1,06 \cdot 10^{-1} \text{ cm}^2 \quad l_1 = 90 \text{ cm}$$

$$A_2 = 7,6 \cdot 10^{-2} \text{ cm}^2 \quad l_2 = 90 \text{ cm}$$

Para el acero inoxidable, encontramos que el coeficiente medio de conductividad térmica entre 300°K y 4°K vale:

$$\bar{\lambda} = 0,103 \text{ Watt/cm} \cdot \text{°K}$$

Con este valor y los anteriores resulta que la fuga total de calor hacia el termo de He<sup>3</sup> por conducción sólida vale:

$$\dot{Q} = 61 \text{ mWatt}$$

En cuanto a la conducción de calor por efecto de gas residual, veamos primero en que consiste.

El aislante usado en el termo de He<sup>3</sup> es simplemente el vacío. A tempe-

Para áreas aproximadamente iguales, vale

$$a^{\circ} = \frac{a_1 a_2}{a_1 a_2 + a_1 a_2}$$

En nuestro caso obtenemos de tablas los valores de los coeficientes individuales para el vidrio a diferentes temperaturas

$$a_1 = 0,67 \quad a_2 = 0,38$$

Vemos que  $a_1 = 2a_2$

De esta forma resulta:

$$a^{\circ} = 0,14$$

Calculando ahora el calor transferido, este resulta ser:

$$\dot{Q} = 1.438 \times 10^{-8} = 1,4 \times 10^{-5} \text{ Watt/cm}^2$$

El area enfrentada es aproximadamente del orden de  $2 \times 10^3 \text{ cm}^2$ , con lo que la fuga resulta ser

$$\dot{Q} = 28 \text{ mWatt}$$

### Calor por radiación

El calor que llega al termo por radiación de cuerpo negro debe ser evaluada. Por ser las paredes del termo plateadas (baja emisividad) se demuestra que la potencia radiada hacia el termo es muy baja. Sin embargo una ranura no plateada que hay en el termo, veremos que contribuye notablemente.

Tenemos dos casos:

a) Calor en el area plateada:

En este caso, la cantidad de calor por unidad de tiempo y de area que llega al baño de He<sup>4</sup> es:

$$\frac{\dot{Q}}{A} = \sigma (T_1^4 - T_2^4) \tilde{\epsilon}$$

$\sigma$  = cte de Stephan

$$= 5,6 \times 10^{-12} \text{ W cm}^{-2} \text{ } ^\circ\text{K}^{-4}$$

$$T_1 = 78^\circ\text{K}$$

$$T_2 = 3^\circ\text{K}$$

$$\tilde{\epsilon} = \frac{\epsilon_1 \epsilon_2}{\epsilon_1 + \epsilon_2}$$

$\epsilon_1$  = Emisividad de la plata (78°K)

$\epsilon_2$  = Emisividad de la plata (3°K)

Haciendo el cálculo, resulta para una superficie de 1000 cm<sup>2</sup>

$$\dot{Q} = 3 \text{ mW}$$

b) En la ranura  $\epsilon_1 \approx \epsilon_2 \approx 1$  que es la emisividad del vidrio

En este caso, y para 100 cm<sup>2</sup>

$$\dot{Q} = 20 \text{ mW}$$

## Fugas de Calor en el tercio de He<sup>3</sup>

Como se vio anteriormente, el isótopo del He llamado Helio<sup>3</sup> ofrece una serie de ventajas sobre el He<sup>4</sup> como líquido criogénico. Por una parte su presión de vapor es mucho más alta que la del He<sup>4</sup> a temperaturas menores a 1°K. Además no presenta características de superfluido, hecho que como vimos limita la velocidad de bombeo y el vacío final que puede alcanzarse con He<sup>4</sup>.

El alto costo del He<sup>3</sup> obliga a usarlo en cantidades muy pequeñas y con ciertas precauciones, fundamentalmente cuidando que no entre en contacto con el He<sup>4</sup>, del cual resulta muy difícil de separar.

Calcularemos ahora las fugas de calor al espacio de He<sup>3</sup>

### Calor por conducción de sólidos:

El elemento conductor en este caso resulta ser fundamentalmente el portamuestras. Este consta de un tubo de acero inoxidable de paredes relativamente delgadas, continuado por una barra de acero y terminado en un trozo de teflon donde se coloca el portamuestras propiamente tal. Este está hecho de una pieza de zafiro, buen conductor térmico a baja temperaturas donde van colocados:

- a) la muestra a medir
- b) un superconductor patrón
- c) una resistencia de carbono
- d) un calefactor

El superconductor patrón se utiliza para verificar la electrónica y la sensibilidad del equipo.

La resistencia de carbono se usa como termómetro como ya fue explicado.

El calefactor se utiliza para evaporar el  $\text{He}^3$  una vez terminada la medición y para recuperar el gas.

Repetiendo los cálculos de la sección anterior, se demuestra que la fuga de calor por ese motivo es menor de 40 mW.

El calor por conducción de gas residual resulta absolutamente despreciable debido a que la presión del espacio vacío es muy baja y que la pared exterior está a muy baja temperatura (aproximadamente 2 K).

La posibilidad de fugas por radiación se evita incluyendo en el portamuestras, único lugar de acceso de la radiación, unos blindajes en forma de discos.

#### Radiación en $\text{He}^3$ desde el baño de $\text{He}^4$

El cálculo es análogo al del calor por radiación en la ranura del termo de  $\text{He}^4$ . La influencia de este efecto es totalmente despreciable.

$$\dot{Q} = 1,12 \times 10^{-6} \text{ mW}$$

#### Disipación eléctrica

Teniendo en cuenta que junto a la muestra se halla una resistencia a través de la cual circula una corriente, puede pensarse que la disipa-

ción térmica sea importante.

Para este caso

$$\dot{Q} = V^2/R$$

$$\text{siendo } V \approx 10 \mu V = 10^{-5} V$$

$$\text{y } R \approx 10 K\Omega$$

Es obvio que el calor disipado es totalmente despreciable.

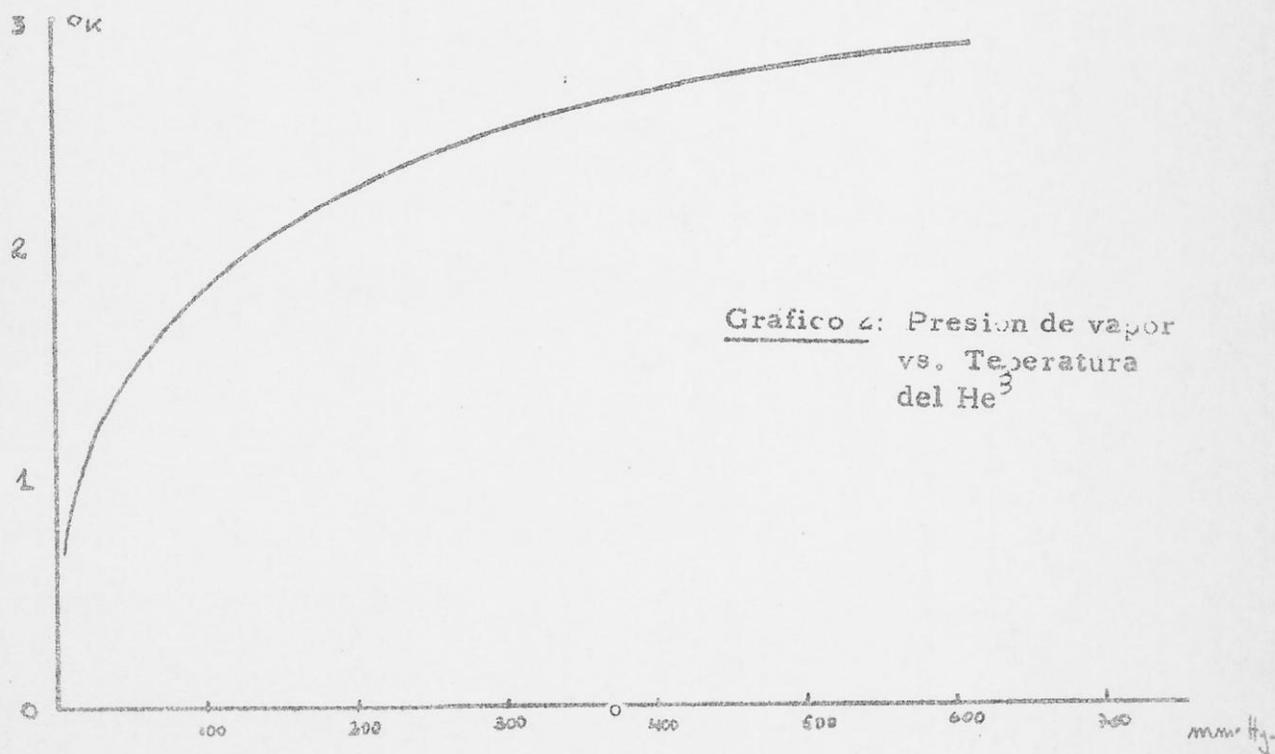
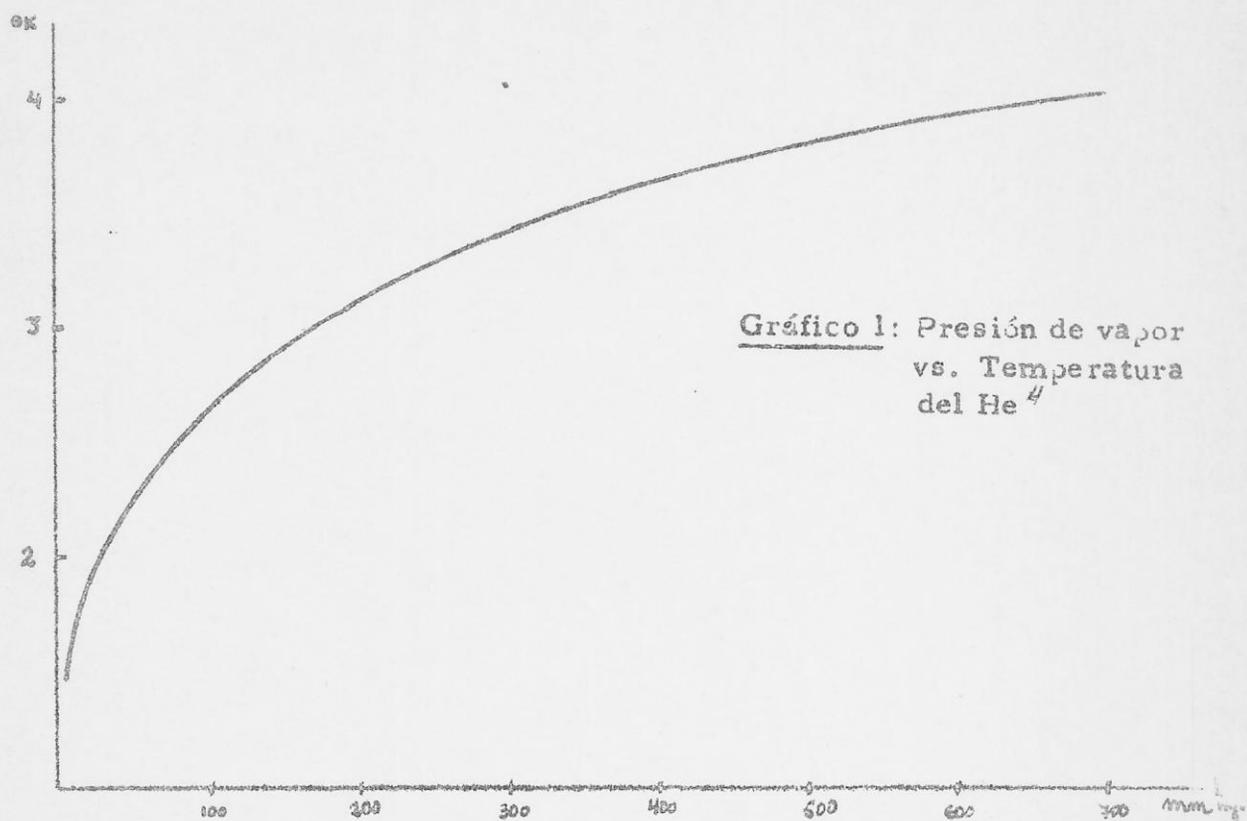
Para estimar el calor extraído al bombear sobre el baño de He<sup>3</sup> debemos primero conocer la velocidad de bombeo. Esta se calcula en forma totalmente análoga a la velocidad de bombeo para He<sup>4</sup>. Debido al hecho de usar tubos relativamente delgados en esta parte, la velocidad resulta ser bastante baja, a pesar de usar una bomba de vacío de alta velocidad. La velocidad de la bomba es de 240l lts / seg, pero la velocidad real tomando en cuenta la impedancia de la línea es:

$$S_p = 0,5 \text{ lts. /seg.}$$

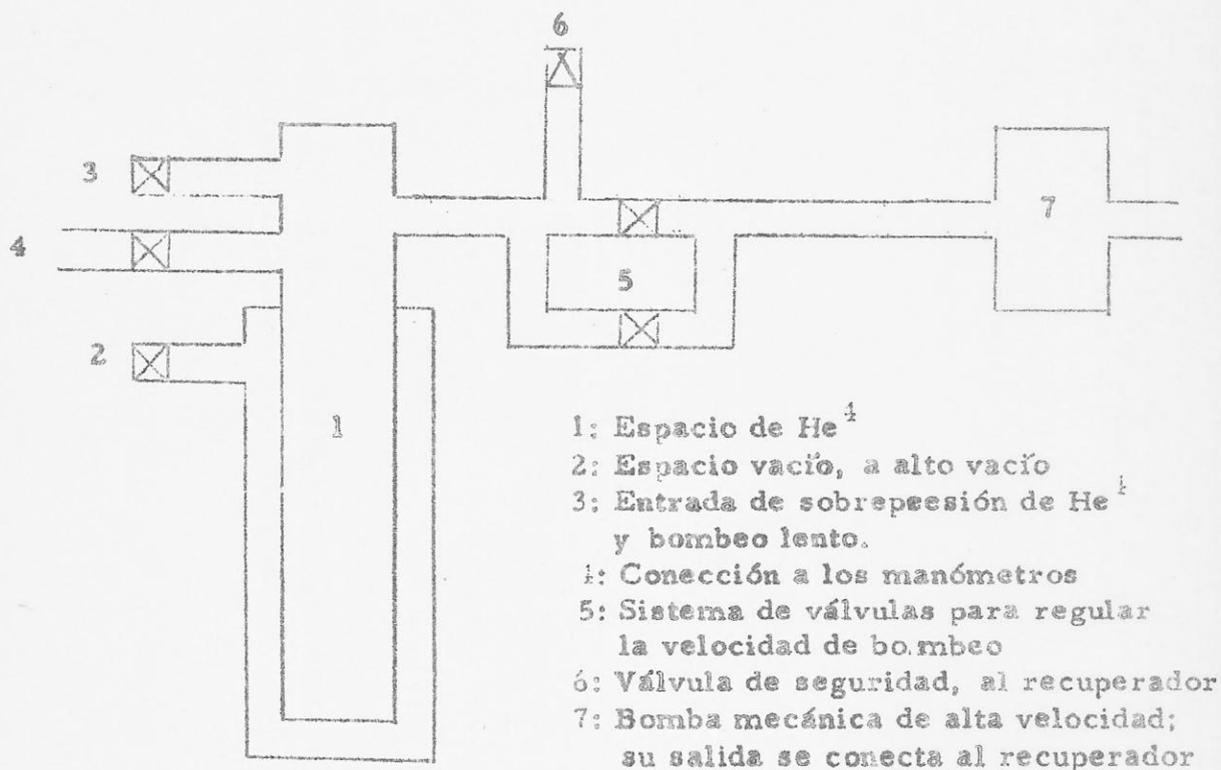
Con este valor de la velocidad y teniendo en cuenta que el calor de vaporización del He<sup>3</sup> es de 1,5 Joules/cm<sup>3</sup> de He gaseoso, el calor extraído es:

$$\dot{Q} = 700 \text{ mWatt.}$$

Este cálculo demuestra que en principio somos capaces de enfriar una muestra extrayendo 600 mW. de ella, teniendo en cuenta las fugas de calor.

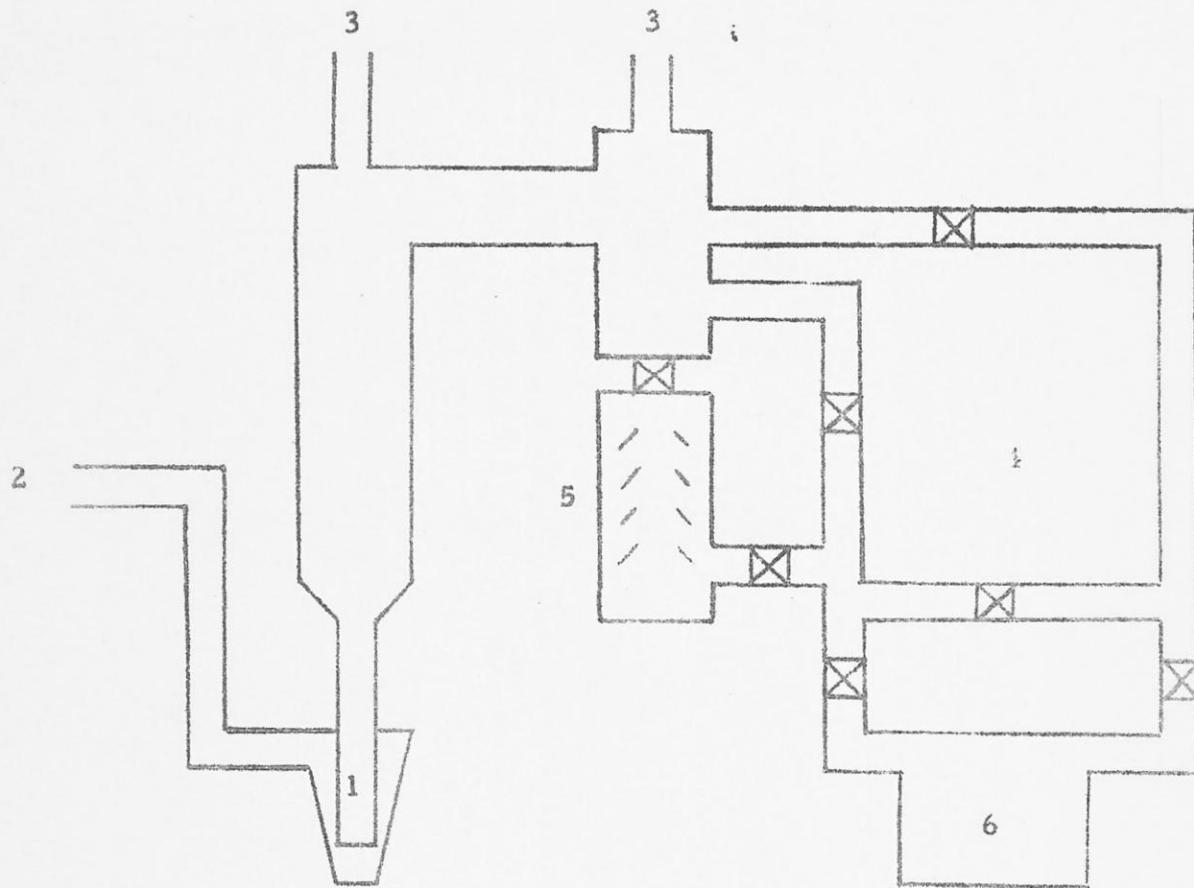


Esquema N° 1: Termo de He<sup>4</sup> y líneas de bombeo



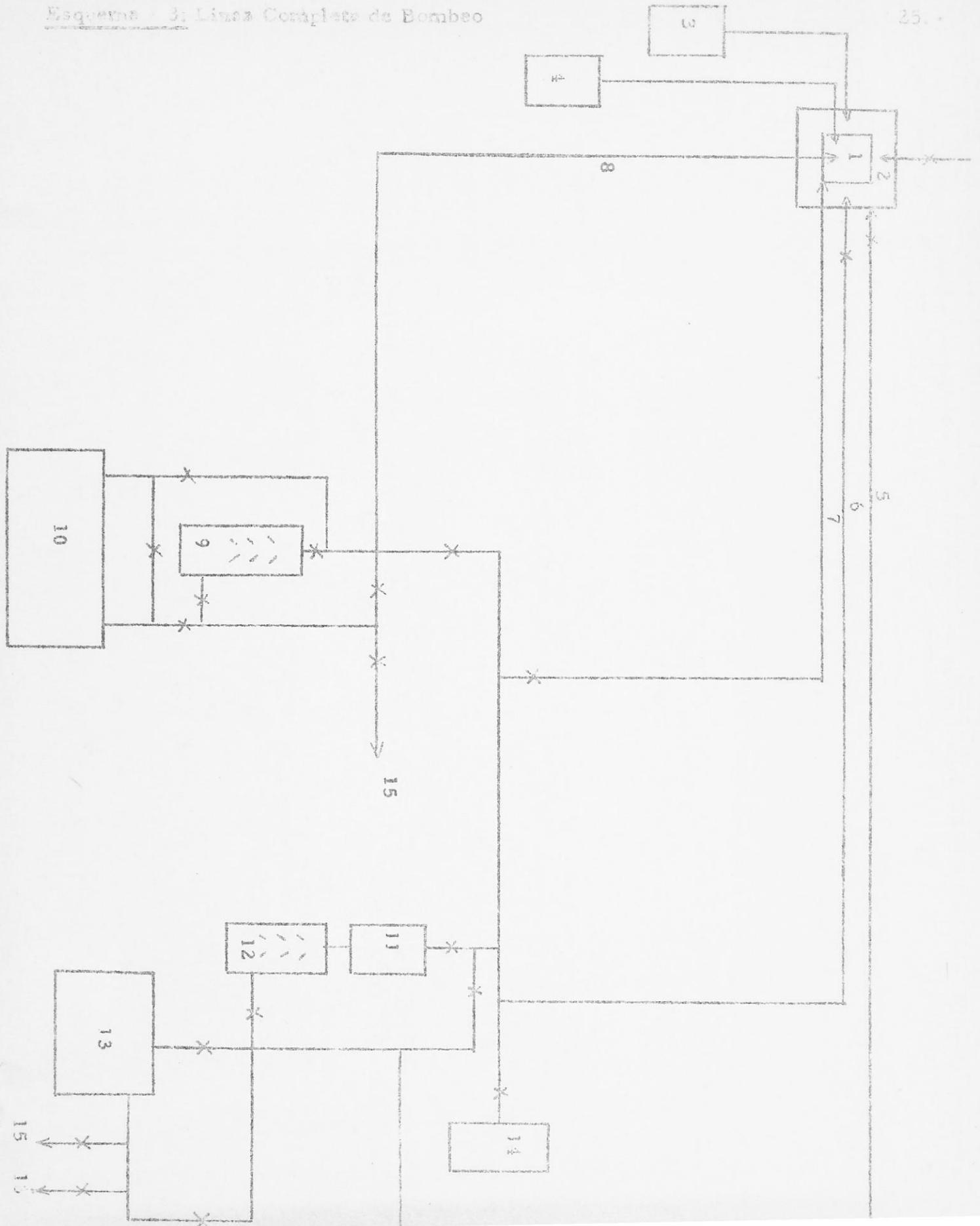
El termo tiene un largo de 1,20 m. y su diámetros de 7cm.  
 Todas las válvulas, excepto la de seguridad, son de alto vacío tipo Veeco o Hooke.

Esquema N° 2: Termo de He<sup>3</sup> y líneas de bombeo.



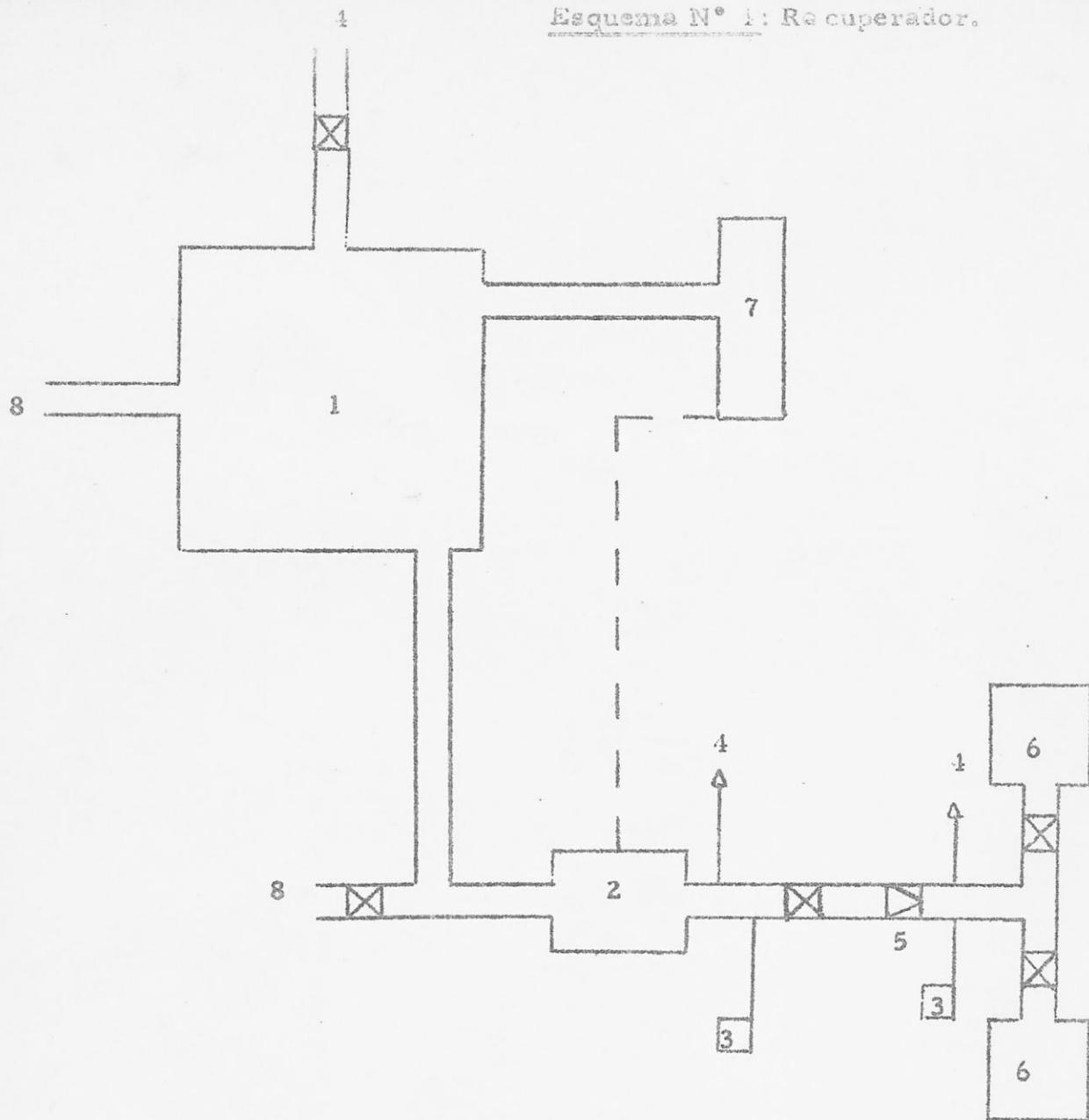
- 1: Espacio de He<sup>3</sup>  
 2: Espacio vacío de He<sup>3</sup>, conectada a alto vacío  
 3: Manómetros de He<sup>3</sup>  
 4: Sistema de recirculación  
 5 Bomba difusora  
 6: Bomba mecánica y de almacenaje de He<sup>3</sup>

El termo de He<sup>3</sup> va sumergido en el baño de He<sup>4</sup>.



Explicaciones al Esquema 3.

- 1) Espacio de He<sup>3</sup>
- 2) Espaciode He<sup>4</sup>
- 3) Manómetro de He<sup>4</sup>
- 4) Manómetro de He<sup>3</sup>
- 5) Línea de Bombeo del espacio vacío de He<sup>4</sup>
- 6) Línea de Bombeo del espacio de He<sup>4</sup>
- 7) Línea de bombeo del espacio vacío de He<sup>3</sup>
- 8) Línea de bombeo del espacio de He<sup>3</sup>
- 9) Difusora de 4"
- 10) Bomba mecánica para He<sup>3</sup>
- 11) Trampa fría
- 12) Difusora de  $1\frac{1}{2}$  "
- 13) Bomba mecánica
- 14) Cilindro de He<sup>4</sup> gaseoso
- 15) Entradas de aire
- 16) Línea al recuperador



- 1: Globo
- 2: Compresor
- 3: Manómetros
- 1: Válvulas de seguridad
- 5: Válvula sin retorno
- 6: Cilindros de almacenaje
- 7: Válvulas de flujo que comandan la detención y puesta en marcha del compresor
- 8: Entradas de He gaseoso

REFERENCIAS

- (1) WHITE, G. K. : "Experimental Techniques in Low Temperature Physics"  
(2nd. ed.) Oxford Clarendon 1968. Capítulo IV
- (2) WHITE, G. K. : Obra citada; Capítulo IV
- (3) ROBERTS, T. S. y SYDORIAK, S. G. : Phys. Rev. 102 , 304 (1956)
- (4) GUTHRIE, A. : " Vacuum Technology" John Wiley 1962. Capítulo 2.
- (5) DUSHMANN, J. : " Scientific Foundations of Vacuum Techniques". John Wiley  
Capítulo 2
- (6) WHITE, G. K. : Obra citada, Capítulo VII