

## ***Proyecto para Planta de Hielo Seco***

Por BUENAVENTURA DURAN S.

### **CAPITULO PRIMERO**

#### **Anhídrido Carbónico.**

Aunque ya Paracelso, habla del anhídrido carbónico producido en la fermentación, y en la calcinación de la caliza como de un aire especial, Helmont lo describe hacia 1.600 como componente del aire y, además Hoffmann hacia 1.700 y, más tarde Black y Priestley se ocupan de él; Lavoisier fue el primero en considerarlo, hacia fines del siglo XVIII como un compuesto del carbono y oxígeno.

Faraday y Davy fueron los primeros en obtener  $\text{CO}^2$  en forma líquida, aunque sólo en mínima cantidad, mientras que Natterer en 1.830 construyó un aparato de compresión que permitió liquidar grandes cantidades. A pesar de ello transcurieron todavía 50 años antes de realizarse la fabricación industrial del  $\text{CO}^2$  líquido.

En 1.880 patentó Raydt el empleo del  $\text{CO}^2$  líquido para la expedición de la cerveza y para la preparación de aguas minerales artificiales; y la casa Kunkeim & Co. en Berlín erigía en 1.881 la primera fábrica de  $\text{CO}^2$  líquido según esa patente que más tarde fue anulada.

El  $\text{CO}^2$  mana de los volcanes activos; además en otros numerosos parajes (conocida es la gruta del perro, cerca de Nápoles) ora como manantial de gas, ora como agua carbónica. Además el gas carbónico es un componente de nuestra atmósfera, que contiene por 10.000 litros en término medio unos tres litros de  $\text{CO}^2$ ; además se produce en la combustión de las substancias que contienen carbono; en la putrefacción y descomposición de los organismos; en la respiración del hombre y de los animales y, en cambio lo toman de la atmósfera las plantas que forman células vivas por asimilación.

En forma de sus sales el  $\text{CO}^2$  está extraordinariamente esparcido por la tierra, y los carbonatos forman montañas y estratos enteros en su mayor parte originados por sedimentación de aguas carbonatadas.

El  $\text{CO}^2$  es usado comercialmente como un gas, comprimido como un líquido en cilindros de acero o finalmente en forma sólida.

Se obtiene en la combustión de coke, como subproducto en la fermentación, por la acción del ácido sulfúrico en la dolomita, del gas natural, del fuel oil y de muchas otras materias primas que sería prolijo enumerar.

El gas de cualquiera de estas fuentes puede ser usado en forma gaseosa, líquida o sólida.

Se considerarán las aplicaciones del anhídrido carbónico tanto en la forma gaseosa, como en la líquida y sólida, analizando un poco más las ventajas como hielo seco.

Durante muchos años el desarrollo como hielo seco fue retardado por el costo del producto y consumo limitado. Sin embargo, gracias a procesos más eficientes, mayores capacidades por planta y, mejores métodos de distribución, el hielo seco ha tenido mejor acogida en el mercado.

Entre las muchas aplicaciones del  $\text{CO}^2$  consideraremos las siguientes:

#### **En forma gaseosa.**

En esta forma se emplea en las artes, para fabricar gaseosas, en los ingenios azucareros para separar la cal del zumo de la caña dulce; en la elaboración del pan y para trasegar y clarificar la cerveza.

Se usa también para evitar que el vino se enmohezca o se agrie, también para que conserve el aroma y el bouquet.

Ultimamente ha sido propuesto como fuerza motriz en aquellos sitios donde es caro el combustible.

#### **En forma líquida.**

En forma líquida se vende en tubos o en botellas cilíndricas de hierro o acero que contienen 8 kilogramos del mismo (o sea unos 4.000 litros de gas, medido a la temperatura ordinaria y a la presión atmosférica).

Proporciona un medio económico para preparar bebidas gaseosas; se emplea para levantar buques hundidos, para disparar torpedos, extinguir incendios, producir frío; además la casa Krupp Essen lo ha empleado para la condensación del acero y otros metales.

Se usa también para fabricar carbonatos y, otros productos químicos, para filtrar y esterilizar líquidos orgánicos y, en Alemania para obtener la presión necesaria en los barriles de cerveza. El  $\text{CO}^2$  líquido es incoloro, muy soluble en el alcohol, el éter, pero no es miscible en el agua. Cuando se hace bajar rápidamente la presión, parte del líquido se evapora inmediatamente, originando el frío suficiente para solidificar el resto.

#### **Anhídrido Carbónico Sólido.**

El  $\text{CO}^2$  sólido, es una masa blanca en copos, con aspectos de nieve (llamada nieve carbónica) que funde a 56,7 grados y a 5 atmósferas de presión y que puede dejarse abandonada al aire algún tiempo sin evaporación sensible.

Introduciendo en esta masa un termómetro de aire o de alcohol baja a 79 grados centígrados; sin embargo puede colocarse en la mano sin que se note una sensación aguda de frío. Si se mezcla con éter, aumenta mucho su fuerza frigorífica.

Pero el principal uso es debido a sus grandes propiedades antisépticas; porque retarda la putrefacción de la carne; porque conserva huevos, leche, frutas y, en general para toda clase de productos fácilmente alterables, por haberse reconocido en muchos experimentos, la acción antiséptica de una atmósfera de  $\text{CO}^2$ .

Aunque son muchos los refrigerantes usados para estos fines, hay que distinguir a los que no soportan combustión y que no explotan, como el  $\text{SO}^2$  y el  $\text{CO}^2$ .

Por eso, al seleccionar un buen refrigerante, algunas propiedades importantes deben ser consideradas.

Se necesita que tenga bajo punto de ebullición, que la presión del gas o vapor en el evaporador sea superior a la presión atmosférica, con el fin de prevenir el aire y humedad que entran al sistema.

Debe anotarse también, al seleccionar un buen refrigerante su acción corrosiva sobre los metales, cuando está en contacto en el sistema.

Es necesario seleccionar una substancia que no se desintegre durante los procesos repetidos de compresión y evaporación.

Un pequeño volumen de gas por libra de refrigerante, para el volumen por libra en los serpentines de enfriamiento del evaporador a la presión dada, determina el tamaño del cilindro compresor. Al mismo tiempo un gran calor latente de evaporación es de gran valor.

De importancia también el costo inicial del refrigerante que tiene grande influencia en la orientación para seleccionarlo.

El anhídrido carbónico es uno de los refrigerantes que cumple más con todas estas condiciones y por lo tanto su uso ha sido incrementado en los últimos años. No es corrosivo a los metales ni afecta a los lubricantes, excepción hecha cuando las temperaturas son más bajas y, es mejor usar en esos casos aceite o glicerina. El compresor, condensador y cañería deben ser construídos especialmente si se tiene en cuenta las altas presiones de descarga. Es difícil descubrir la presencia del anhídrido carbónico pero tiene la ventaja de que no es peligroso o irritante a las membranas animales.

Es muy importante hacer aunque muy a la ligera una comparación entre el hielo proveniente de la congelación del agua y el hielo seco. Lo primero es en cuanto al transporte, porque el hielo ordinario al fundirse pasa directamente a la forma líquida, mientras que el hielo seco se sublima, o sea pasa de sólido al estado de vapor. Desde este aspecto se puede apreciar la gran ventaja para transportarlo cuando la refrigeración se hace con anhídrido carbónico. Un vagón del ferrocarril, por ejemplo, puede ser cargado con frutas que están prontas a la putrefacción, o también carnes o vegetales; se coloca un número dado de bloques de hielo seco sobre los alimentos, de tal manera que el vapor pase hacia abajo y forme una capa protectora que consume calor.

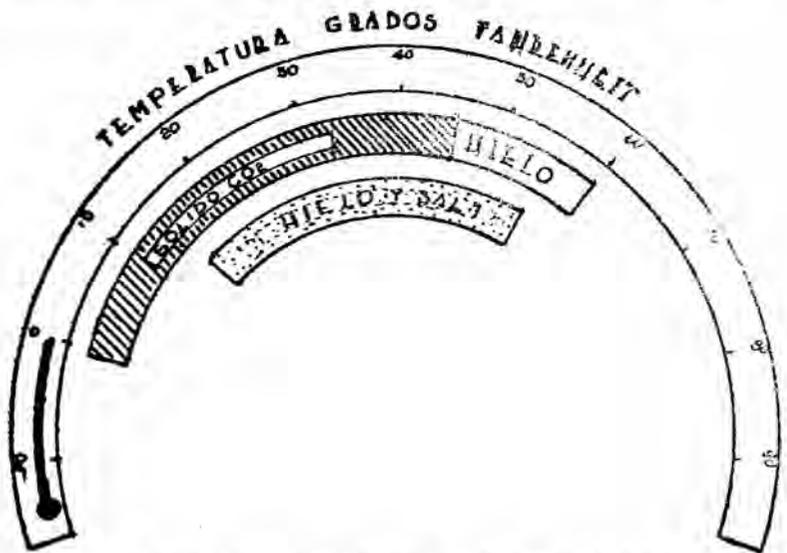
Otro detalle importantísimo es que las temperaturas alcanzadas con el hielo seco son mucho más bajas a las producidas por el hielo ordinario y mezcla de sales. La temperatura de hielo seco puede ser regulada por la cantidad de producto colocada por carro o vagón, o según en lo que se haga el transporte.

La refrigeración efectiva de una libra de anhídrido carbónico cuando se sublima a 0 grados F. (- 18 grados centígrados) es 275 B.T.U. contra 144 B.T.U. del hielo ordinario. Una temperatura tan baja pue-

de ser alcanzada permitiendo que el anhídrido carbónico evapore a la presión atmosférica. Una temperatura más baja puede ser obtenida cuando evapora a presión reducida.

Se verán mejor las propiedades físicas del anhídrido carbónico y del hielo de agua (hielo común) en la siguiente tabla.

	CO <sup>2</sup> Sólido	Hielo
Gravedad específica	1,53	0,99987
Punto de licuación o sublimación	-109,6° Fahr.	32° Fahr
Punto de ebullición	—	212° Fahr
Temperatura crítica	88,43° Fahr.	689° Fahr
Presión crítica, absoluta	1071 lbs/in <sup>2</sup>	2860 lbs/in <sup>2</sup>
Calor latente de fusión	82 Btu	144 Btu
Calor latente de vaporización	158,6 Btu	1074,29 Btu
Calor latente de sublimación	240,6 Btu	—
Efecto refrigerante por lb.	275 Btu	155 Btu
Peso por pie cúbico a 32° (gas)	0,117 lb.	0,000340 lb
Peso por pie cúbico de sólido	90 lbs.	57 lbs.



CO<sup>2</sup> SÓLIDO, HIELO, HIELO Y SAL

En realidad, cuando se aprovechan las ventajas de las propiedades físicas del anhídrido carbónico, viene a ser el equivalente de 2½ a 3 libras de una mezcla (salmuera) de agua y sal.

Al aquilatar el valor del hielo seco como refrigerante se toman además en consideración los siguientes factores: sequedad, temperaturas más bajas obtenidas, el CO<sup>2</sup> es aislante mejor que el aire, con una conductividad térmica o factor de 0.097 a 32 grados Fahr.

Se suman a estas ventajas, la facilidad con que se manipula, efecto refrigerante más prolongado sin la necesidad de helar de nuevo, el mantenimiento de temperatura uniforme mediante el empleo de termoreguladores y sopladores, y por último, costos menores de refrigeración debido a la carga mayor por unidad de envase, lo que significa una carga gananciosa mayor por toneladas de tara.

Todos estos factores abonan a favor del anhídrido carbónico sólido, a pesar de su mayor costo.

El hielo seco es esencialmente un refrigerante para transporte y por tanto la construcción de los envases de transporte debe ser tal que se aprovechen las ventajas de las propiedades físicas ya enumeradas.

Según sea la cantidad y la calidad de los productos transportados, así se verá que están usando cartones corrugados o de fibra prensada, cajas, barriles, cajones de carros, camiones o furgones de ferrocarril, refrigerados con hielo seco, con o sin regulación de temperatura.

La falta de conocimiento acerca del grueso adecuado del aislamiento que será necesario para los diversos envases de embarque, dará por resultado la descomposición de los productos o un costo excesivo de refrigerante.

Mi proyecto en este trabajo es beneficiar el anhídrido carbónico producido en fermentación de melazas, que tiene una pureza aproximadamente de 99,8% y obtener una tonelada de hielo seco, de acuerdo a especificaciones modernas de la «Worthington Pump and Machinery Corporation», ya que se justifica la recuperación del CO<sup>2</sup> gaseoso, porque teóricamente una libra de azúcar produce 0,511 lbs. de alcohol etílico y 0,489 lbs. de anhídrido carbónico, o sea prácticamente mitad y mitad. Por lo tanto una destilería que produzca 10.000 galones de alcohol etílico de 95 grados, obtendrá 64,600 lbs. de CO<sup>2</sup>.

Debido al hecho de que se pierde una parte del gas durante la prefermentación, la descarga de la batición y la compresión del gas mismo, podemos calcular que se puede recuperar, económicamente, de 45.000 a 50.000 lbs. de anhídrido carbónico sólido que vendrían aproximadamente de 28.000 galones de mieles, es decir cerca de 2 libras de hielo seco por galón de miel.

Es por lo tanto mi mayor intención colaborar en cuanto sea posible a que el comercio se desarrolle de acuerdo a los progresos de la técnica, ya que son muchos los artículos de rápida descomposición sobre todo en los climas ardientes, porque es bien sabido que la rapidez de descomposición de un producto está en función directa de la temperatura, y debe ser mayor el control de la refrigeración para evitar grandes pérdidas.

## CAPITULO SEGUNDO

Antes de considerar la regla de fases y el diagrama de fases del anhídrido carbónico, se aclararán algunos conceptos acerca del punto triple, temperatura crítica, punto de fusión, presión de vapor del anhídrido carbónico líquido y del anhídrido carbónico sólido, puesto que en ellos se basan los cambios de estado del anhídrido carbónico y así queda más fácil el entendimiento del presente capítulo.

### El punto triple:

Los datos existentes sobre punto triple de anhídrido carbónico son escasos; a pesar de esto, los que se han logrado reunir están de acuerdo con el verdadero valor de esa constante.

El resultado de investigaciones es el siguiente:

Punto triple	Presión de vapor en atmósferas	Observadores
— 56,7	5,1	Willard And Jarry
— 56,24	5,10	Kuennen And Robson
— 56,4	5,11	Zeleny And Smith
— 56,59	5,113	Meyers And Van Dusen

Plank y Kuprianoff consideran que — 56,6° C. es la temperatura más real y será considerada para el punto triple en todos los cálculos futuros.

### Temperatura crítica:

La temperatura crítica es a menudo definida como la temperatura arriba de la cual una substancia no puede existir en estado líquido.

A esa temperatura, el valor de la tensión superficial llega a cero y las densidades del líquido y vapor saturado son iguales.

A la temperatura crítica hay una completa y mutua solubilidad de líquido y gas. La evidencia de este cambio es la desaparición del menisco en la superficie del líquido.

Esto no es punto bien claro o que haya sido bien demostrado: por lo tanto no nos sorprenderá que las medidas de temperatura crítica por diferentes investigaciones no estén de acuerdo.

El valor más probable para la temperatura crítica es 31° C. y para la presión 72,80 atmósferas.

### Punto de fusión

Bajo el punto triple (—56,6° C.) el anhídrido carbónico sólido se sublima, o sea pasa directamente de sólido a gas.

La temperatura de sublimación es por lo tanto una función opuesta a la presión y a una atmósfera de presión, la temperatura de sublimación es — 78,515° C.

Esta temperatura es fácilmente alcanzada con el anhídrido carbónico sólido que es a menudo usado como un punto de referencia para estandarizar termómetros de baja temperatura.

Temperaturas bajo este punto o aún arriba del punto triple pueden ser fácilmente mantenidas controlando la presión del gas arriba de la del anhídrido carbónico sólido. Con un vacío producido por aspirador de agua ordinario es posible alcanzar temperaturas inferiores a — 100° C.

La relación entre temperaturas y presión pueden ser determinadas por referencia a la tabla de presión de vapor del sólido.

El efecto de los cambios de presión en el punto de fusión del anhídrido carbónico sólido fue estudiado por Kuenen y Robson quienes calcularon que  $dp/dt.$  era igual a 47,9 atmósferas por grado centígrado, mientras que Tammann obtuvo un valor de 50 atmósferas por grado.

Bridgeman definitivamente estableció las temperaturas de congelación a presiones tan altas como 11,613 atmósferas.

La disminución en volumen cuando el agua cambia del estado líquido al sólido es bastante considerable.

El volumen específico del líquido en el punto triple es 0,849 mientras que para el sólido es 0,661 lit/kgr.

La cantidad de disminución es de un 28,5% mientras que en el agua aumenta cerca de 10% al cambiar a la condición sólida.

Se anotará que a más altas temperaturas el cambio de volumen en congelación va a ser menor.

### Presión de vapor del anhídrido carbónico líquido:

Varias partes de la curva de equilibrio líquido — vapor, han sido estudiadas por investigadores como Regnault, Cailletet, Amagat y Willard. Las medidas recientes de Meyers, sin embargo, han cubierto todo el campo desde el punto triple a la temperatura crítica.

Plank y Kupiranoff encontraron que la ecuación de Young

$$p = a \left( \frac{T}{100} - B \right)^n$$

establecida para la curva de presión de vapor de Meyer era la mejor.

Cuando la presión es expresada en kgrs/cent<sup>2</sup>, los valores para las constantes son:  $a = 7,856$   $B = 1,261$   $N = 3,917$ .

### Presión de vapor del anhídrido carbónico sólido:

Con el fin de determinar la dirección de la curva de equilibrio para el sistema anhídrido carbónico (s)  $\rightleftharpoons$  anhídrido carbónico (g) es necesario juntar los resultados de muchos investigadores en este campo.

A muy bajas temperaturas muchas medidas fueron hechas por Kammerlingh Onnes y Weber, quienes obtuvieron los siguientes resultados:

Temperatura en C°	-183	-179,6	-175,37	-171,01
	-168,83	-167,04		
Presión en m.m.	0.000006	0.0000195	0.0000795	0.000303
	0.000593	0.000983		

A  $-134^{\circ}$  C. la presión de vapor del anhídrido carbónico sólido

do es ligeramente superior a 1 mm. y desde este punto hasta el punto triple el dato es disponible para dibujar la curva de equilibrio con bastante aproximación. Sin embargo, la dirección de esta curva quizás sea calculada mejor usada la ecuación empírica desarrollada por Plank y Kuprianoff.

Esta ecuación se expresa así:

$$\log p = 58,361 - \frac{2206,455}{T} - 21,431 \log T + 0,02527 T \dots$$

### Regla de fases:

En 1876 J. Willard Gibbs de la Universidad de Yale, descubrió una generalización conocida como la regla de fases, que ha sido una ayuda valiosísima para el estudio del equilibrio en sistemas heterógeneos.

La regla de fases está ligada al número de variables que están encerradas en cualquier sistema y al número de relaciones entre esas variables.

Las variables ordinarias son temperatura y presión y la concentración de materiales en cada una de las fases.

La ecuación fundamental es la siguiente:

$$F = C - P + 2$$

donde F es el número de grados de libertad, C es el número de componentes y P es el número de fases.

Una fase se ha definido como una región homogénea de composición física y química uniforme.

En un sistema que contiene como en el caso presente, hielo seco, anhídrido carbónico líquido y anhídrido carbónico gaseoso en equilibrio, hay tres fases.

El número de componentes C es el número de constituyentes químicos que deben ser determinados con el fin de establecer la composición de cada fase presente.

En el sistema hielo seco, anhídrido carbónico líquido y anhídrido carbónico gaseoso solamente hay un componente. El número de grados de libertad F es el número de variables independientes, temperatura, presión y concentración en las diferentes fases que deben ser especificadas con el objeto de definir el sistema completamente.

Un cambio sencillo en las cantidades relativas de las fases no es considerado como una variable.

También se define F como el número de variables que puedan ser cambiadas independientemente sin causar aparición o desaparición de una fase.

El número 2 es válido solamente si hay dos variables, comúnmente temperatura y presión en adición a la concentración.

Si hay una tercera variable, tal como el campo magnético, la regla de fases entonces sería:

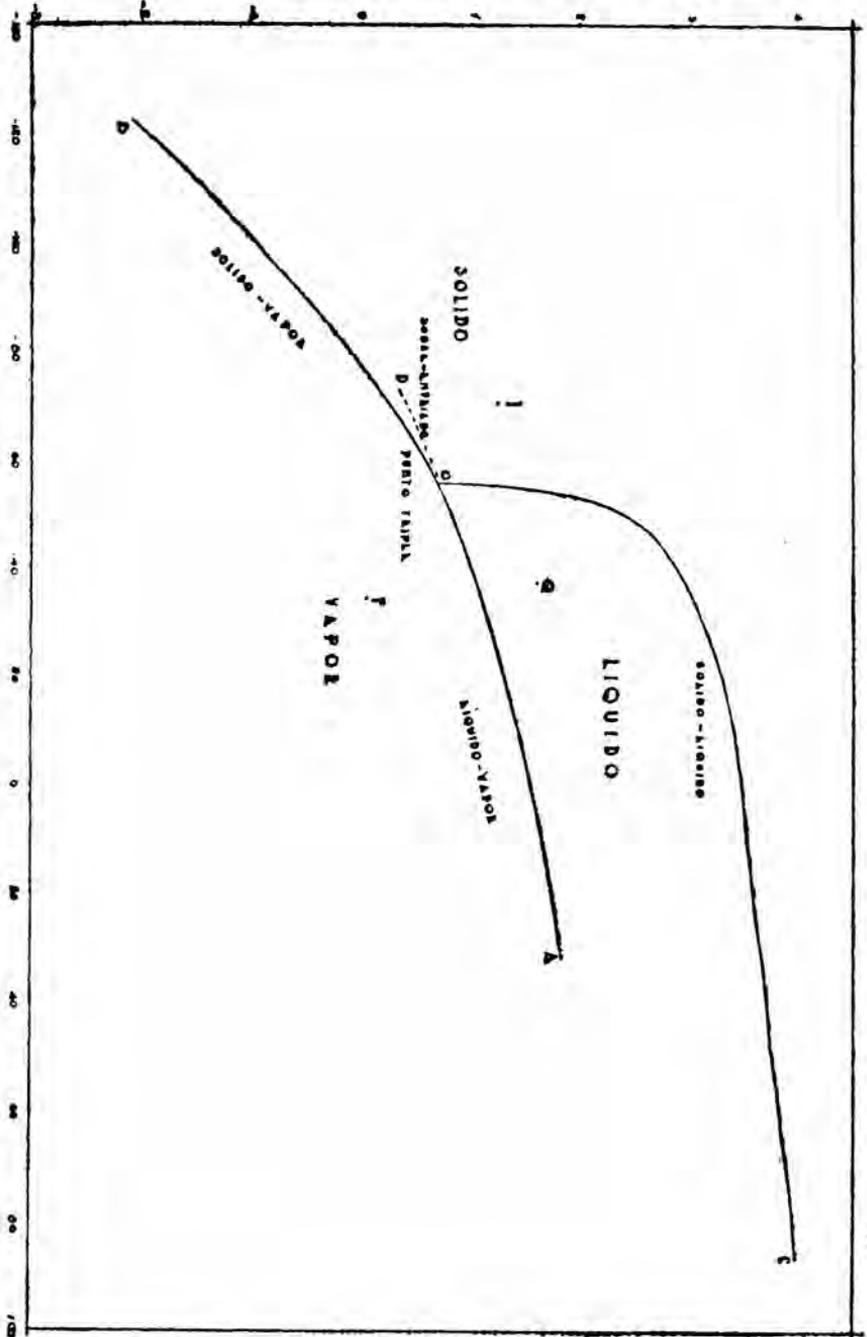
$$F = C - P + 3$$

Ahora, si las condiciones son tales que la presión no es una variable y hay solamente una variable en adición a la concentración, la fórmula será de esta manera:

$$F = C - P + 1$$

PRESSION LOG P. ATMOSFERAS

TEMPERATURA EN C.



Vamos a analizar ahora el diagrama de equilibrio del anhídrido carbónico, para comprender mejor la manera como se efectúan los cambios de estado, de acuerdo con la temperatura y la presión.

Tres áreas generales están clasificadas en las cuales, hielo seco, anhídrido carbónico líquido o anhídrido carbónico gaseoso pueden existir libremente.

Vapor sólo se encuentra en el área de vapor y es necesario especificar tanto la presión como la temperatura con el fin de determinar el sistema, porque si sólo se especifica la presión, el sistema no queda bien descrito porque la temperatura variable no está definida.

Donde se tocan dos áreas hay una línea, a lo largo de la cual sólo pueden existir dos fases en equilibrio.

La curva de la presión de vapor del anhídrido carbónico está representada por la línea O A.

Sobre esa línea sólo puede existir anhídrido carbónico líquido y bajo ella sólo vapor.

Si la presión es reducida a un punto bajo la línea O A, todo el anhídrido carbónico líquido se vaporizará; en el otro caso si la presión es aumentada arriba de la curva, todo el vapor condensará.

La presión a cualquier temperatura puede leerse desde la curva de presión de vapor.

De la misma manera, si la presión es establecida, la temperatura puede ser determinada desde el gráfico.

Una sola variable, ya sea temperatura o presión es suficiente para determinar el sistema a lo largo de la línea.

La línea O B es la curva de sublimación del hielo seco. Sobre ella hay sólo hielo seco y, bajo ella solamente existe vapor. A lo largo de O B están en equilibrio hielo seco y vapor.

La línea O C es la curva de fusión del hielo seco. A lo largo de O C hay dos fases, hielo seco y anhídrido carbónico líquido, y es necesario sólo especificar una variable ya sea temperatura o presión para descubrir el sistema.

Donde tres líneas que representan pares de fases se intersepan, las tres áreas se tocan y, por lo tanto las tres fases pueden existir en equilibrio. Ese punto donde se intersepan se llama punto triple, la temperatura del cual en el presente caso es de  $-56,6$  grados centígrados.

En ese punto no es necesario especificar ni temperatura ni presión, porque solamente una temperatura posible y una sola presión permitirán a las tres fases existir en equilibrio.

Si la temperatura es aumentada a presión constante el hielo seco fundirá y el líquido vaporizará, quedando sólo vapor.

Si la temperatura es bajada, sólo habrá hielo seco; si la presión en el vapor es aumentada a temperatura constante, este condensará; y finalmente, si la presión es disminuída, el líquido y hielo seco evaporarán.

En el diagrama de anhídrido carbónico tenemos tres áreas en cada una de las cuales hay dos variables, temperatura y presión que tienen que ser establecidas para el sistema a cabalidad.

Tenemos la fórmula:

$$F = C - P + 2$$

Si analizamos el punto 1, queda de la siguiente manera:

$$F = 1 - 1 + 2$$

De donde  $F = 2$  porque  $C = 1$  y  $P = 1$ .

Por lo tanto en cualquier punto del área de hielo seco hay dos grados de libertad.

De igual manera  $F$  será igual a dos grados de libertad si se analizan los puntos  $Q$  y  $F$ .

En un punto de cualquiera de las líneas  $OA$ ,  $OB$ ,  $OC$ , la regla de fases se aplica como sigue:

$$F = C - P + 2$$

Por lo tanto,

$$F = 1 - 2 + 2$$

De donde  $F = 1$ .

Se ve que sólo es necesario especificar una sola variable. En un punto  $O$  hay tres fases y la regla se interpretará así:

$$F = C - P + 2$$

$$F = 1 - 3 + 2$$

De donde  $F$  será igual a cero.

Ya estaba demostrado que en ese punto las condiciones están completamente determinadas.

Ni la temperatura ni la presión pueden ser alteradas sin desaparecer una de las tres fases y, por consiguiente no hay grados de libertad.

### CAPITULO TERCERO

En este capítulo se considerará el diagrama cualitativo para la obtención del anhídrido carbónico sólido.

El anhídrido carbónico gaseoso residual, puede ser aprovechado por varios métodos, pero la posibilidad de su explotación comercial para la elaboración del anhídrido carbónico sólido es influida por su pureza, proximidad al mercado y costo de la energía.

En algunas localidades la ventaja de tener una fuente de anhídrido carbónico muy puro puede ser sobrepasada por uno o más factores desfavorables, tales como costo de distribución, pérdidas, suministro inadecuado de agua de enfriamiento o alto costo de energía.

El costo de producción del gas, la cantidad de éste y sus impurezas dependen sobre todo del proceso del cual proviene originalmente el anhídrido carbónico.

Se tiene el caso, por ejemplo, del anhídrido carbónico recogido con una pureza de 99,8% de la fermentación de melazas o de granos en la producción del alcohol etílico.

La misma materia prima fermentada para la producción del alcohol butílico produce un gas que contiene 60% de anhídrido carbónico y de 40% de hidrógeno.

La tabla siguiente (C. M. 53: N<sup>o</sup> 1; en 1.946, página 120) muestra la pureza del anhídrido carbónico obtenido a partir de diferentes materias primas, los métodos de recuperación y las impurezas que deben ser eliminadas antes de que el gas pueda ser convertido en producto para el mercado.

**PUREZA DEL ANHIDRIDO CARBONICO PROVENIENTE DE  
VARIAS MATERIAS PRIMAS.**

Fuente de materia prima	% de CO <sup>2</sup> en el gas	Método de Recuperación del CO <sup>2</sup>	Impurezas Polvo, SO <sup>2</sup> H <sup>2</sup> S	% de CO <sup>2</sup> A la compresión
Piedra caliza, dolomita.	32—41	Absorción en: K <sup>2</sup> CO <sup>3</sup> , Na <sup>2</sup> C CO <sup>3</sup> Monoetilamina		99,8%
Gas de chimenea	10—18	Trietenolamina		
Melazas o granos.			Melazas o granos	
Alcohol etílico	99,8			99,8%
Alcohol butílico	60	Absorción agua	Hidrógeno	99,8%
Gas natural	96—99,5		Hidrocarburos, SO <sup>2</sup> H <sup>2</sup> .	96—99,5%

La eliminación de impurezas generalmente se lleva a cabo en dos fases. Algunas son separadas a baja presión, antes de que el gas entre al primer compresor, mientras que las impurezas finales y la humedad son eliminadas en condiciones de alta presión.

El gas por purificar pasa primero a través de torres de agua para remover el alcohol etílico y una porción de sustancias odorantes. El olor y la humedad se eliminan completamente después de la primera compresión, sea por uso de carbón activado combinado con sustancias químicas o sustancias químicas solamente.

Existen varios métodos o ciclos para la compresión, licuefacción y enfriamiento del anhídrido carbónico.

Hay diseños de acuerdo con los principios en que se opera, por ejemplo: Ciclos binarios, terciarios, enfriamiento por expansión, etc.

Los principios usados en estos ciclos son clasificados como sigue:

1º)—Obrar sobre el gas con un compresor de recirculación.

2º)—Comprimir el gas crudo y parte del gas recirculado en un compresor de tres etapas y trabajar solamente el gas recirculado en un compresor adicional de alta presión.

3º)—Comprimir el gas crudo y el recirculado en un compresor de dos etapas, hasta unos 30 kilogramos por centímetro cuadrado, licuar y enfriar por medio de refrigeración con amoníaco hasta temperatura más baja.

Por este método, la licuefacción, el enfriamiento del líquido y, la producción de anhídrido carbónico sólido van acompañados por un

compresor de dos estados, uno para la compresión de anhídrido carbónico y el otro para la refrigeración con amoníaco.

Si se supone una planta que produzca 1.000 libras de anhídrido carbónico sólido por hora; el gas crudo desde el gasómetro, saturado con vapor de agua a la temperatura ambiente y, a una presión de 15 libras por pulgada cuadrada absolutas, pasa por un mezclador y se le añaden 1.500 libras de anhídrido carbónico gaseoso recirculado a —45 grados F. provenientes de la prensa de anhídrido carbónico sólido.

Las 1.500 libras de anhídrido carbónico gaseoso representan de hecho el gas recirculado, más un porcentaje adicional de gas crudo que fué perdido durante el proceso.

La mezcla gaseosa a una presión de 15 libras por pulgada cuadrada absolutas y a 32 grados F. entra a la primera etapa del compresor donde la presión es levantada a 92,7 libras por pulgada cuadrada absolutas.

El intercambiador de color reduce la temperatura a 80 grados F.

Las 2.500 libras combinadas de anhídrido carbónico gaseoso son ahora purificadas, cuyo método depende de la fuente de que provenga el anhídrido carbónico.

Luego el gas pasa a través del primer dehumidificador enfriado con amoníaco en donde se eliminan agua y aceite.

El gas parcialmente deshidratado entra al segundo tanque mezclador a donde llegan 894 libras que vienen enfriadas desde el tanque de almacenamiento a una temperatura de 32 grados F.

En esta forma entran las 3.394 libras de anhídrido carbónico a la segunda etapa del compresor.

La presión en esta segunda etapa es de 450 libras por pulgada absolutas y, la temperatura, después del enfriamiento en el intercambiador es de 80 grados F.

Antes de esta última presión el gas pasa por un condensador donde queda parte de aceite lubricante vaporizado.

El gas es enfriado en un segundo dehumidificador enfriado con amoníaco y luego es deshidratado en el secador.

Es de vital importancia tener el gas perfectamente seco con el fin de evitar congelaciones perjudiciales en las cañerías que conducen a la prensa de anhídrido carbónico sólido.

En los condensadores enfriados con amoníaco, la temperatura del anhídrido carbónico líquido es deducida a 25 grados F.

Una válvula colocada entre el tanque de almacenamiento del CO<sup>2</sup> líquido y del condensador regula la alimentación del líquido que va a sufrir una expansión parcial.

Se ha comprobado que se vaporizan aproximadamente 894 libras de CO<sup>2</sup> o sea 26,3%, además se obtiene una reducción en la presión a 146 libras por pulgadas cuadradas absolutas y una temperatura de —40 grados F.

Los vapores obtenidos en la expansión son recirculados en la segunda etapa del compresor, mientras que las 2.500 libras de anhídrido carbónico líquido restantes van a la prensa de anhídrido carbónico sólido, en donde se obtienen 1.000 libras de nieve carbónica y 1.500 libras de gas que son recomprimidas en la primera etapa del compresor.

En esta operación 10 a 20% de CO<sup>2</sup> gaseoso se pierde en el pro-



4<sup>o</sup>)—Combinar un compresor para anhídrido carbónico de tres etapas con refrigeración a amoníaco.

Aunque todos los fabricantes de equipo ponderan las ventajas de algún principio, el aspecto económico de cada ciclo debe ser juzgado en último término sobre la base de su adaptabilidad a condiciones locales de capital invertido, de potencia necesaria, etc.

La presente exposición se referirá al ciclo terciario, por ser éste el más económico, el más usado en los últimos años, por su facilidad de instalar y sus buenos resultados.

(Según Reich, G. T. C. M. E. 53: N<sup>o</sup> 1 en 1.946 página 122). En ese sistema se combinan dos compresores de tres etapas, uno para trabajar el anhídrido carbónico crudo y el otro para el gas recirculado.

El anhídrido carbónico crudo saturado a 32 grados centígrados, pasa desde el gasómetro a través de un enfriador donde el medio enfriante, anhídrido carbónico expandido, reduce la temperatura a 4,5 grados centígrados y, luego entra a la primera etapa del compresor a 5,25 kilogramos por centímetro cuadrado.

La temperatura del gas comprimido es bajada a 4,5 grados centígrados en un enfriador con agua antes de que pase al sistema de purificación.

La temperatura del gas es elevada en seguida a unos 10 grados centígrados. Desde aquí, el anhídrido carbónico gaseoso entra a la segunda etapa del compresor, desde la cual descarga a 24,6 kilogramos por centímetro cuadrado.

Intercambiadores de calor, enfriados a agua y a anhídrido carbónico bajan la temperatura del gas hasta 4,5 centígrados.

Los enfriadores después de la primera y segunda etapas de compresión, condensan algo del agua y del aceite lubricante que se hubiere vaporizado.

Un secador colocado después del enfriador del segundo estado elimina suficiente agua para evitar congelación en las válvulas.

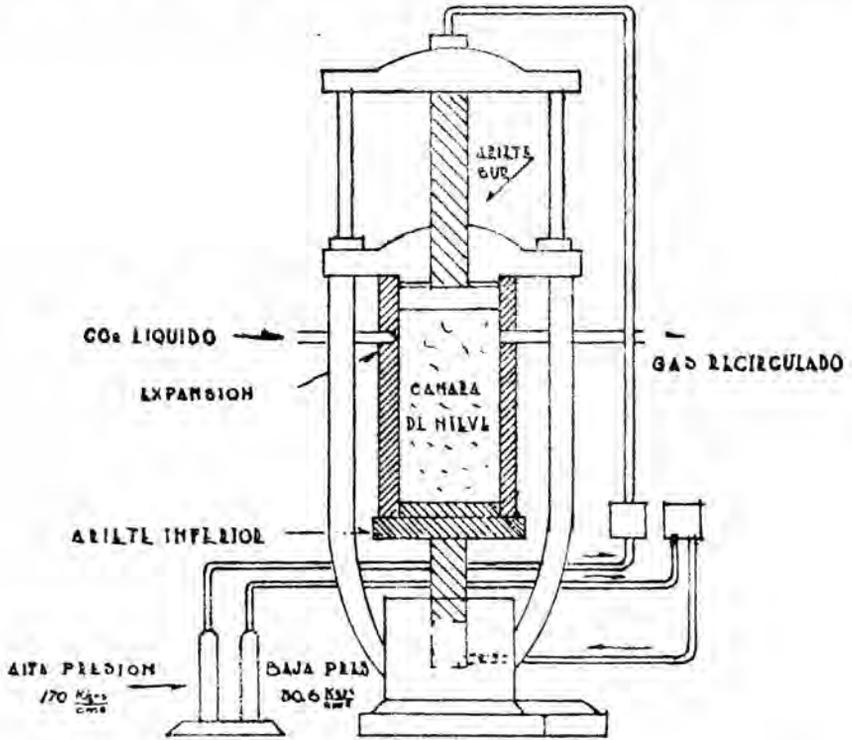
La compresión final se lleva a cabo en el tercer estado del compresor a una presión de 68 kilogramos por centímetro cuadrado; luego el gas pasa a un enfriador, después a la licuación en el condensador a 26,2 grados centígrados. (La temperatura crítica es de 31,4 grados centígrados).

Como la pureza del gas no es 100%, se ha encontrado necesario adicionar un purgador para eliminar el aire y los no condensables. Desde el depósito el anhídrido carbónico líquido pasa a una serie de dos enfriadores de expansión. En el primero la temperatura baja a -6,5 y en el segundo a -40 grados centígrados.

Con el fin de asegurar un tamaño uniforme para el bloque de anhídrido carbónico sólido, se usa un tanque medidor, colocado entre el último enfriador de expansión y la prensa. Una cantidad de anhídrido carbónico líquido predeterminada se suministra a la prensa y, los vapores de anhídrido carbónico desprendidos se utilizan para preenfriar el anhídrido carbónico líquido que va a los enfriadores de expansión. Todos los gases devueltos desde los intercambiadores, enfriadores de expansión y desde la prensa son enviados al compresor de recirculación de tres estados, donde los gases son comprimidos otra vez.

Parte del gas recirculado pasa al primer estado y, parte al segundo; los gases combinados son finalmente comprimidos a 68 kilogramos por centímetro cuadrado.

Cualesquiera que fuere el método usado para enfriar el anhídrido carbónico líquido, la temperatura debe ser baja con el fin de rendir el más alto porcentaje de anhídrido carbónico sólido. Cuando el anhídrido carbónico líquido es expandido en la prensa, solamente una cierta proporción de éste se solidifica y, el gas sobrante se recomprime.



### SECCION TRANSVERSAL DE LA PREENSA DE CO<sub>2</sub>

Para convertir líquido a sólido hay prensas hidráulicas diseñadas especialmente. Existen diferentes tamaños, que producen bloques de (25,4) (25,4) (25,4) centímetros o (51) (51) (25,4) centímetros. La última prensa produce un bloque cada diez minutos o 660 kilogramos por hora.

Los primeros diseños contienen un acumulador para hacer más uniforme la operación. Los diseños más recientes usan una bomba rotatoria de baja presión y una bomba de alta presión. La primera ejerce una presión de 30,6 kilogramos por centímetro cuadrado y se usa para el arranque de la prensa y para cerrar la cámara de compresión.

La última hace una presión de 170 kilogramos por centímetro cuadrado y se usa para completar la operación.

La cantidad de líquido requerida para producir un bloque de 110 kilogramos, puede ser determinada fácilmente por medida directa, o regulando el tiempo durante varios minutos, o por el control automático de duración del ciclo durante toda la operación del prensado.

Cuando se carga el anhídrido carbónico líquido, la presión es reducida cerca al punto triple, que es 5,25 kilogramos por centímetro cuadrado y  $-56,7$  grados centígrados, donde el anhídrido carbónico existe simultáneamente como líquido, sólido y gas.

El gas desprendido durante la expansión del líquido en la cámara de hielo seco, es extraído a 4,1 o a 4,8 kilogramos por centímetro cuadrado.

Después de que se haya formado la cantidad necesaria de anhídrido carbónico sólido, la alimentación de líquido es suspendida y la presión estática bajada a cero.

La nieve así formada es convertida en un bloque completo y denso, bajando el ariete superior de 170 kilogramos por centímetro cuadrado y sosteniendo esta presión hasta que el bloque haya llegado al espesor deseado de 25,4 centímetros.

Luego el ariete inferior es bajado y el bloque se saca con el superior. Para producción en gran escala se usan transportadores accionados mecánicamente que se encuentran fijos a la prensa. Los bloques grandes de 110 kilogramos (51) (51) (25,4) centímetros son divididos por sierras en cuatro bloques de (25,4) (25,4) (25,4) centímetros con peso de 27,5 kilogramos.

La estructura del producto final es muy importante desde un punto de vista práctico porque está comprometida la resistencia del bloque a la avería mecánica y por su comportamiento como refrigerante durante la sublimación.

Un bloque de anhídrido carbónico sólido para ser satisfactorio debe ser duro, compacto y no muy quebradizo.

Estas condiciones no son muy difíciles de alcanzar y se perfeccionan usualmente prestando atención al prensado.

## CAPITULO CUARTO

Desde el primer capítulo se ha tomado para este proyecto como base de producción una tonelada y, de acuerdo a esa suposición se harán todos los cálculos necesarios para averiguar las cantidades de anhídrido carbónico gaseoso y líquido en circulación para obtener diariamente la tonelada de hielo seco.

Conviene señalar que al expansionarse el anhídrido carbónico líquido dentro de una cámara cerrada, solamente una parte del anhídrido carbónico se solidifica.

El rendimiento de anhídrido carbónico sólido a partir del líquido depende en gran parte de la temperatura que tenga el anhídrido carbónico líquido que se haga expandir dentro de la cámara nevadora.

Por ejemplo, el anhídrido carbónico líquido a cero grados Fahr, rinde 46% de sólido y 54% de anhídrido carbónico gaseoso; mientras

que si es enfriado a menos 40 Fahr, el rendimiento de sólido es de 54% quedando 46% de líquido que habrá de sufrir nueva compresión.

Por lo tanto, una planta para anhídrido carbónico sólido necesita cuando menos doble la capacidad compresora de CO<sup>2</sup> que una planta que elabora anhídrido líquido, además, por supuesto, de la capacidad compresora necesaria para enfriar el anhídrido líquido.

Aunque ha sido materia difícil saber la verdadera equivalencia de anhídrido carbónico líquido y sólido, se ha llegado después de muchas consideraciones y con la ayuda valiosa de la práctica a la siguiente conclusión:

Por cada cantidad de líquido lista para la prensa, solamente del 20 al 45% es solidificado; el resto vuelve al estado gaseoso para ser licuado nuevamente.

Basados además en el contenido de calor, se ha encontrado con bastante aproximación que se necesita 3,75 libras de líquido para producir una libra de sólido. (Riegel, página 227).

Con la ayuda del último dato se puede hacer el siguiente raciocinio:

$$\begin{array}{r} 3,75 \text{ lbs de líquido} \\ x \\ \hline 1 \text{ lb sólido} \\ 2.000 \text{ "} \end{array}$$

De donde,

$$x = 3,75 \times 2.000 = 7.500 \text{ libras.}$$

Por lo tanto son necesarias 7.500 libras de líquido para obtener una tonelada de hielo seco.

A esta cantidad de líquido se le saca el 10% para margen de seguridad, debido a pérdidas principalmente por escape o a cualquier otro detalle no previsto.

$$x = \frac{7.500 \times 10}{100} = 750 \text{ lbs.}$$

Haciendo la diferencia:

$$7.500 - 750 = 6.750 \text{ lbs. líquido.}$$

Se ha especificado también que en las cámaras de expansión se un 26,3% del anhídrido carbónico líquido.

Entonces, se tiene que:

$$x = \frac{6.750 \times 26,3}{100} = 1.775,25 \text{ lbs.}$$

Quedan  $6.750 - 1.775,25 = 4.974,75$  lbs. líquido.

Para la prensa van 4.974,75 libras de líquido.

Allí se gasifica el resto, dejando solamente la tonelada de hielo seco.

$$4.974,75 - 2.000 = 2.974,75 \text{ lbs.}$$

El valor de 2.974,75 libras se obtiene de que en la prensa se solidifica un 40% aproximadamente.

$$x = \frac{40 \times 2.974,75}{100} = 1.989,90$$

Las 1.989,90 libras son de hielo seco.

Proyecto para Planta de Hielo Seco

Resumen:

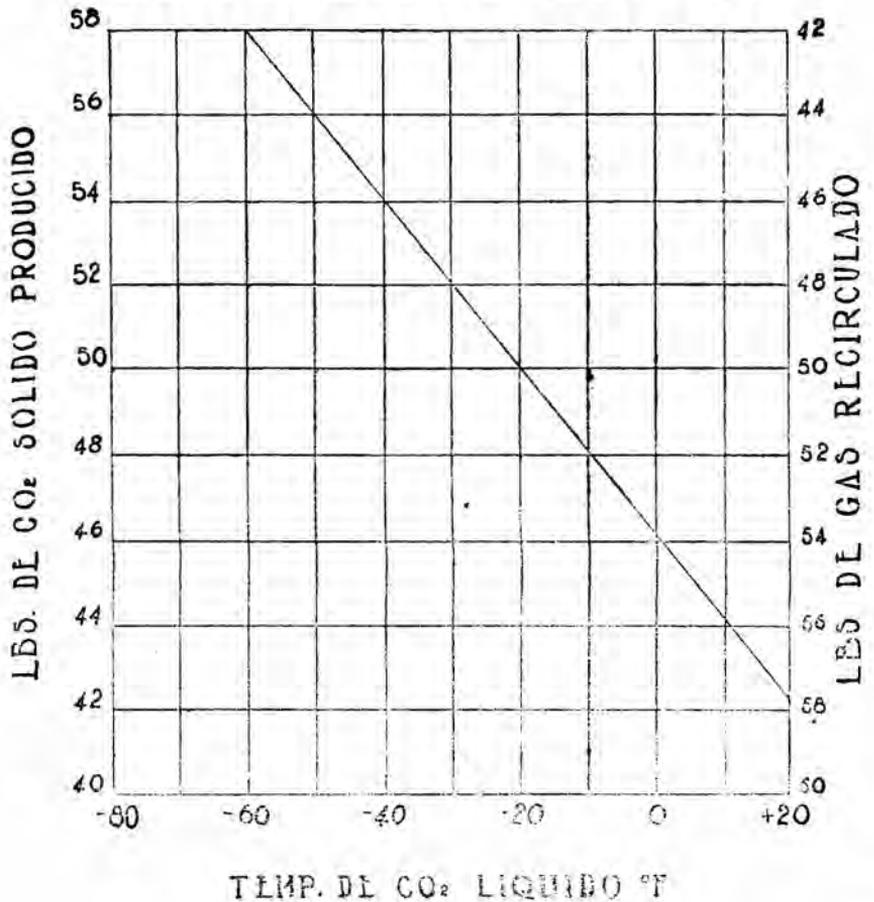
Entrada del gasómetro	2.000	lbs.
Pérdidas por escape	750	"
Se evaporan en las cámaras de expansión	1.775,25	"
Se evaporan en las prensas	2.974,75	"
Total	7.500,00	lbs.

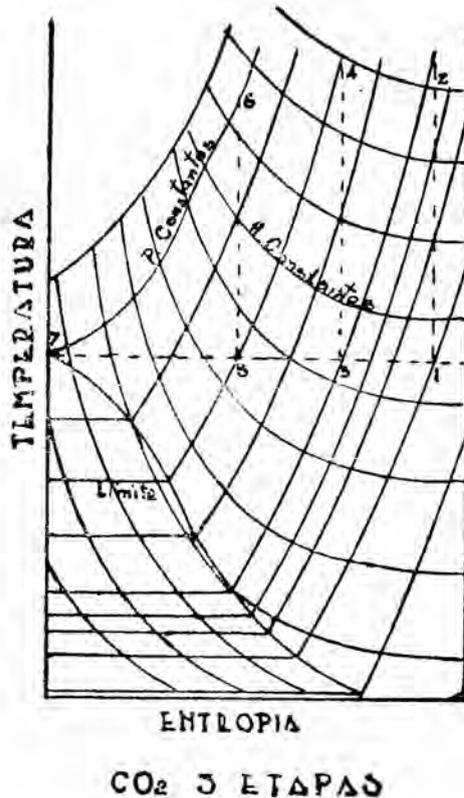
La circulación de fluido hora, suponiendo que se trabajan 24 horas será de:

$$\frac{6750}{24} = 281,25 \frac{\text{lbs.}}{\text{hr}}$$

Se pueden apreciar las cantidades anteriores en el siguiente diagrama cuantitativo.

EFFECTO DE LA TEMP. EN EL CO<sub>2</sub> SOLIDO





### Potencia del compresor de tres estados.

El texto «Chemical Engineering Thermodynamics» de Dodge, trae un gráfico para anhídrido carbónico de Plank y Kuprianoff, obtenido de datos experimentales, con el cual es fácil calcular la potencia requerida para comprimir una cantidad determinada de gas.

Los cálculos se hacen a **entropía** constante y, sólo es necesario leer desde el diagrama los valores de **H** en los dos extremos de la línea insentrópica, comprendida entre las dos presiones límites.

El trabajo de compresores de muchas etapas es de bastante utilidad cuando no se puede suponer que el gas sea ideal como en el presente caso.

Una compresión en tres etapas es representada en el diagrama TS, en donde **T** es temperatura en grados Fahr y, **S** es la entropía.

El paso de 1 a 2 a entropía constante, representa una compresión adiabática reversible desde  $P^1 T^1$  a  $P^2 T^2$ .

El paso 2-3 es el enfriamiento a presión constante hacia  $T^1$ ; 3-4 es la compresión en la segunda etapa.

El paso de 4-5 es enfriamiento a presión constante hacia  $T^1$ .

El paso de 5-6 es la última etapa de la compresión y 6-7 el último enfriamiento.

El trabajo por libra o por mole en cada etapa es obtenido de la diferencia de las entalpías en los extremos de las líneas isentrópicas constantes.

El principio de igual trabajo en los tres estados puede ser aplicado al encontrar gráficamente los propios valores de las presiones intermedias  $p^2$  y  $p^4$  para satisfacer la condición de que  $dH$  será el mismo para todas las líneas isentrópicas constantes.

Esto será el trabajo mínimo total y localiza las presiones intermedias, aunque no está bien comprobado el éxito de este método.

El gráfico TS que hemos estado considerando facilita obtener de una manera simple el trabajo para la compresión de cualquier gas y para cualquier valor de  $K$  entre los límites 1,67 a 1,00.

Este gráfico es construido desde las ecuaciones ya derivadas para el caso de compresión adiabática reversible de cualquier gas ideal.

En el gráfico se lee directamente solo para compresores de una etapa y a la temperatura inicial.

Para compresores de varias etapas a distintas temperaturas existen varias reglas sencillas, por medio de las cuales se convierte el valor leído desde la carta a la cantidad deseada.

El número de estados que sea necesario usar en cualquier caso dado es determinado por un balance entre las ventajas, tales como bajo costo de potencia, mejor eficiencia volumétrica etc. y, el aumento de costo por el equipo.

Ninguna regla puede ser dada en este aspecto de los compresores, pero, en general la relación de presión máxima en cualquier etapa de compresores de múltiples estados se encuentra entre 3 y 5, con alguna relación mayor para máquinas de una sola etapa.

La siguiente tabla es una guía bastante aproximada para las presiones máximas comunmente usadas.

Las presiones son dadas en libras por pulgada cuadrada.

1 Etapa	2 Etapas	3 Etapas	4 Etapas
80	400	1.200	3.000

Los compresores de 300 atmósferas, usados en procesos modernos de alta presión son comunmente máquinas duplex de 6 etapas, aunque también son muy usadas máquinas de 4 y 5 etapas.

Los compresores comerciales de más alta presión últimamente construidos son de 15.000 libras por pulgada cuadrada, los cuales tienen su principal aplicación en procesos de síntesis.

Por lo general son máquinas de 6 y 7 etapas aunque a veces han sido usadas hasta de 9 etapas.

Pequeños compresores para 1.000 y 1.200 libras de presión tienen solamente dos estados y, tres estados para comprimir hasta 4.500 libras por pulgada cuadrada.

El compresor tan conocido «Hofer» va hasta 1.000 en 5 etapas.

Últimamente fue construida una máquina con 4 etapas para una presión máxima de 4.000 atmósferas.

En nuestro caso la primera compresión tiene por límite 14,7 y 75 libras por pulgada cuadrada.

A 14,7 libras por pulgada cuadrada y 40 grados Fahr corresponde una entalpia de  $307 \frac{\text{Btu.}}{\text{lb.}}$

A 75 libras por pulgada cuadrada se tiene una entalpia de  $352 \frac{\text{Btu.}}{\text{lb.}}$

Diferencia entre las entalpias  $45 \frac{\text{Btu.}}{\text{lb.}}$

Equivalencia entre Btu y Hp — Hr es la siguiente:

$$1 \text{ Btu} = 0,0003930 \text{ hp — hr}$$

Ahora tenemos lo siguiente:

$$281,25 \frac{\text{lbs}}{\text{hr}} \times 45 \frac{\text{Btu}}{\text{lb}} = 12.700 \frac{\text{Btu.}}{\text{hr.}}$$

12.700 es total de  $\frac{\text{Btu.}}{\text{hr.}}$

$$12.700 \frac{\text{Btu}}{\text{hr}} \times \frac{0,0003930 \text{ hp hr}}{1 \text{ Btu.}} = 5 \text{ H.P.}$$

Para apreciar mejor los cambios de entalpia, volúmenes específicos y calor específico molal del anhídrido carbónico se tienen las tablas al fin del presente capítulo.

La segunda compresión tiene por límites 75 libras por pulgada cuadrada a 40 grados Fahr y, 350 libras por pulgada cuadrada.

$$H^1 = 303 \frac{\text{Btu}}{\text{lb.}}$$

$$H^2 = 343 \frac{\text{Btu}}{\text{lb.}}$$

Diferencia de entalpias  $40 \frac{\text{Btu}}{\text{lb.}}$

Total de  $\frac{\text{Btu}}{\text{hr}}$

$$281,25 \frac{\text{Lbs.}}{\text{hr}} \times 40 \frac{\text{Btu.}}{\text{lb}} = 11,250 \frac{\text{Btu.}}{\text{hr}}$$

Ahora:

$$11.250 \times 0,0003930 = 4,43 \text{ H. P.}$$

La tercera compresión es entre 350 libras por pulgada cuadrada y 970 libras por pulgada cuadrada.

$$H^1 = 292 \frac{\text{Btu}}{\text{lb.}}$$

$$H^2 = 314 \frac{\text{Btu}}{\text{lb.}}$$

$$\text{Diferencia } 22 \frac{\text{Btu}}{\text{lb.}}$$

$$\frac{\text{Btu}}{\text{hr}} \text{ totales;}$$

$$281,25 \frac{\text{lbs}}{\text{hr}} \times 22 \frac{\text{Btu}}{\text{lb}} = 6.187,50 \frac{\text{Btu}}{\text{hr}}$$

$$6.187,50 \times 0,0003930 = \text{H. P. } 2,62$$

Ahora se calculará la potencia del compresor de tres estados, suponiendo que el gas es ideal y que la compresión es adiabática. (Dodge, página 281 7;49).

$$W_{\text{Netapas}} = \frac{NKP_1V_1}{K-1} \left[ 1 - \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{K-1}{NK}} \right]$$

En donde  $n$  es el número de etapas.

$K$  se supone que es constante, independiente de las condiciones en un caso dado, pero varía con la complejidad atómica del gas.

Hacemos  $K = 1,40$ .

$P^1 =$  Presión inicial.

$V^1 =$  Volumen inicial.

$P^2 =$  Presión final.

Pero antes de entrar a calcular la potencia por este método es conveniente ver los principios generales de compresores de varias etapas.

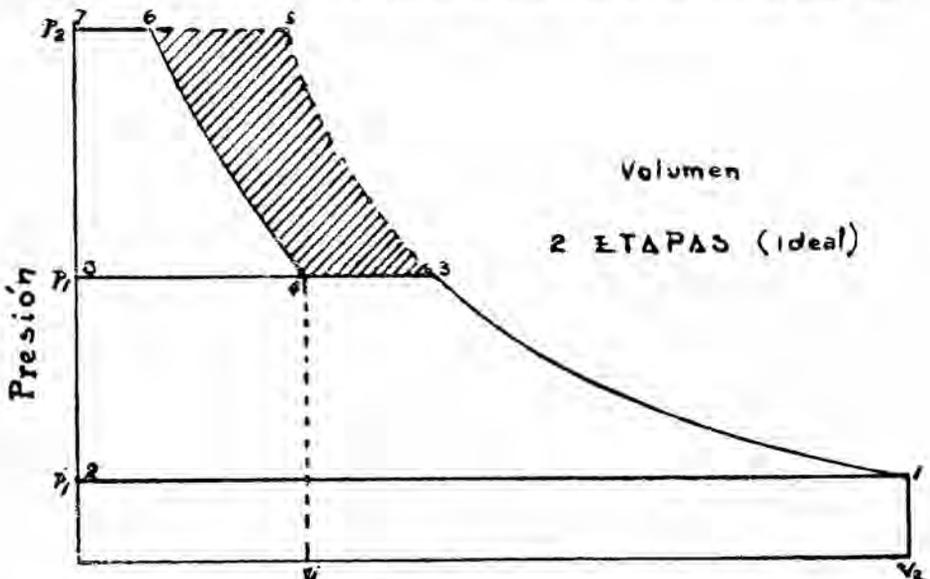
Vamos a analizar el desarrollo cuantitativo que se aplica a los compresores de estado, suponiendo un ciclo de dos etapas, con la ayuda del siguiente diagrama, en el cual la presión es la ordenada y la abscisa el volumen.

La línea 2 — 1 representa la succión del primer estado y 1 — 3 la compresión.

El gas comprimido en el primer cilindro a una presión intermedia  $p^1$ , es descargado a un intercambiador donde es enfriado a pre-

sión constante y, a una temperatura muy aproximada a la inicial del gas antes de la compresión.

La línea 3 — 4 representa la descarga en el primer cilindro.



El gas enfriado a  $p^1$  pero con un volumen menor ( $V^4$  en vez de  $V^3$ ) es luego admitido al segundo cilindro (succión 8 — 4) comprimido en 4 — 6 a la presión  $p^2$  y descargado al enfriador final (descarga 6 — 7).

El trabajo del primer cilindro está representado en el gráfico por el área 2138 y el del segundo cilindro por 4678; el trabajo total para la masa del gas que corresponde al estado inicial  $V^1$  es la suma de las dos áreas.

Si la compresión desde  $p^1$  a  $p^2$  ha sido hecha en un solo estado como se muestra por la compresión 1 — 5, el trabajo será igual al área 2157.

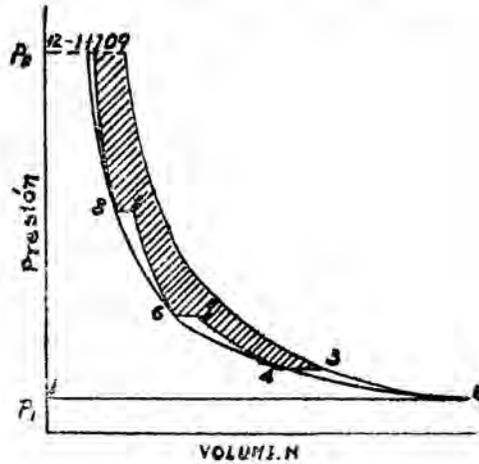
Consecuentemente, se ve que el trabajo de los dos estados es más pequeño que el trabajo de un solo estado 4356.

Esto demuestra otra ventaja importante de la compresión de estado o sea una reducción en el trabajo.

En el gráfico siguiente para compresiones de estado, 2 — 9 representa una compresión adiabática desde  $p^1$  a  $p^2$  y 2 — 11 es la compresión isotérmica.

La línea 2 — 3 — 4 — 5 — 6 — 7 — 8 — 9 — 10 representa una compresión adiabática en cuatro etapas con enfriamiento cercano a la temperatura inicial a lo largo de la isoterma 2 — 11.

El límite en trabajo que puede ser efectuado por los distintos estados es el área 2 — 11 — 9 — 2 que representa la diferencia entre compresión adiabática e isotérmica, lo cual requerirá un número infinito de etapas.



### ETAPAS DE COMPRESION

Se ve, por lo tanto, que el uso de más de un estado es sólo con el fin de acercarse a la compresión isotérmica.

El trabajo en el ciclo de dos etapas es la suma de los trabajos de dos etapas que analíticamente queda así:

$$W_{2\text{ etapas}} = \frac{K P_1 V_1}{K-1} \left[ 1 - \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{K-1}{K}} \right] + \frac{K P_1 V_1}{K-1} \left[ 1 - \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{K-1}{K}} \right] \quad (1)$$

Si se supone que hay un enfriamiento perfecto, o sea que el gas comprimido es enfriado a la temperatura de entrada, se puede escribir así:

$$P^1 V^1 = p^1 v^1$$

y la ecuación (1) es transformada en:

$$W_{2\text{ etapas}} = \frac{K P_1 V_1}{K-1} \left[ 2 - \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{K-1}{K}} - \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{K-1}{K}} \right] \quad (2)$$

Si se sigue el mismo procedimiento para más etapas se puede generalizar la ecuación.

Así para N etapas.

$$W = \frac{K P_1 V_1}{K-1} \left\{ N - \left( \frac{P_{i1}}{P_1} \right)^\epsilon - \left( \frac{P_{i2}}{P_{i1}} \right)^\epsilon - \dots - \left[ \frac{P_2}{P_1(\eta-1)} \right]^\epsilon \right\} \quad (3)$$

$p_1^1, p_1^2, \dots, p_1^{(n-1)}$  = presiones descargadas de las etapas 1, 2, ..., n-1.

Para encontrar la condición necesaria para el trabajo mínimo, consideramos la presión de cada etapa intermedia que varía independientemente de las otras y, por fin aplicaremos el criterio usual para un mínimo.

$$\frac{dW}{dp_{i1}} = 0 \qquad \frac{dW}{dp_{i2}} = 0 \qquad (4)$$

Diferenciando la ecuación (3) y aplicando la (4) queda:

$$\frac{dW}{dp_{i1}} = \frac{K P_1 V_1}{K-1} \left( - \frac{\epsilon p_{i1}^{\epsilon-1}}{p_1^\epsilon} + \epsilon p_{i2}^\epsilon p_{i1}^{\epsilon-1} \right) = 0$$

$$p_{i2}^\epsilon p_{i1}^{\epsilon-1} = p_1^{\epsilon-1} p_{i1}^{-\epsilon}$$

$$p_{i1}^2 = p_1 p_{i2} \qquad (5)$$

Semejante de:

$$\frac{dW}{d p_{i2}} = 0 \qquad \frac{dW}{d p_{i3}} = 0 \text{ etc.}$$

$$p_{i2}^2 = p_{i1} p_{i3} \qquad (6)$$

$$p_{i3}^2 = p_{i2} p_{i4} \qquad (7)$$

$$p_{i(\eta-1)}^2 = p_{i(\eta-2)} p_2 \qquad (8)$$

De estas cuatro últimas ecuaciones se puede escribir:

$$\frac{p_{i1}}{p_1} = \frac{p_{i2}}{p_{i1}} = \frac{p_{i3}}{p_{i2}} = \dots = \frac{p_2}{p_{i(\eta-1)}} = r$$

O sea la relación es la misma en todos los estados. La condición para el trabajo será el mismo en todos los estados.

$$r_1 \times r_2 \times r_3 \times \dots \times r_\eta = \frac{p_2}{p_1}$$

$$r^\eta = \frac{p_2}{p_1} \qquad r = \sqrt[\eta]{\frac{p_2}{p_1}} \qquad (9)$$

Substituyendo en la ecuación (9) y en la (3)

$$W_{N \text{ etapas}} = \frac{NKP_1V_1}{K-1} \left[ 1 - \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{K-1}{nK}} \right] \quad (10)$$

Los compresores son generalmente diseñados para dar igual trabajo en todas las etapas, no solamente porque esto conduce al trabajo mínimo sino también desde el punto de vista mecánico.

Ahora aplicaremos y con esta fórmula se calculará la potencia del compresor de que se ha venido hablando, o sea de tres etapas.

Se busca el volumen inicial de la siguiente manera, ya que se conoce el gasto masa  $281,25 \frac{\text{lbs}}{\text{hr}}$

En condiciones normales:

$$x = \frac{44 \text{ grs} \times 281,25 \times 22,4}{453 \times 281,25} = 65.000 \frac{\text{lbs}}{\text{hr}}$$

Ahora:

$$65.000 \times \frac{278}{273} = 66.300 \frac{\text{lbs}}{\text{hr}}$$

$$66.300 \frac{\text{lbs}}{\text{hr}} \times \frac{1 \text{ pie}^3}{28,32 \text{ lit}} = 2340 \frac{\text{pies}^3}{\text{hr}}$$

$$2340 \frac{\text{pies}^3}{\text{hr}} \times \frac{1 \text{ hr}}{60 \text{ min.}} = 39,2 \frac{\text{pies}^3}{\text{min.}}$$

Aplicando la fórmula anterior se tiene que:

$$W = \frac{3 \times 1.40 \times 14.7 \times 144 \times 39,2}{0.40 \times 33,000} \left[ 1 - \left( \frac{970}{14.7} \right)^{\frac{1.40-1}{1.40 \times 3}} \right]$$

De donde;

$$W = 26,4 [ 1 - (0,095 \times 1,82) ]$$

$$W = 26,4 (1 - 1,49)$$

$$W = 26,4 \times - 0,49 = - 12,9 \text{ H. P.}$$

El signo menos indica que el trabajo es hecho en el sistema de acuerdo a la convención establecida en esta clase de problemas.

Los H. P. encontrados por el diagrama son:

$$5 + 4,43 + 2,62 = 12,05 \text{ H. P.}$$

Los H. P. encontrados por la fórmula son  $- 12,9$  lo cual es un resultado bastante aproximado.

		CALOR ESPECIFICO MOLAL EN $\frac{\text{col}}{\text{gr}}$ DEL CO <sup>2</sup>						
P en atmósferas		10,2	13,6	20,4	27,2	34,0	40,8	47,6
P en $\frac{\text{lbs}}{\text{pulg}^2}$		150	200	300	400	500	600	700
T. en °C								
- 30		10,186	11,88					
- 25		" "	11,70					
- 20		" "	11,53					
- 15		" "	11,35	12,85				
- 10		" "	11,13	12,63				
- 5		" "	11,00	12,41	15,05			
- 0		" "	10,82	12,19	14,52	17,42		
+ 5		" "	10,65	11,97	14,04	16,72		
+ 10		" "	10,47	11,75	13,55	16,02	19,80	
+ 15		" "	10,30	11,48	13,02	15,27	18,52	24,07
+ 20		" "	10,12	11,26	12,54	14,52	17,25	21,56
+ 25		" "	9,94	11,04	12,06	13,81	15,97	19,10
+ 30		" "	9,72	10,82	11,57	13,11	14,70	16,63

VOLUMENES ESPECIFICOS

°C	°F	Vap. saturado		Líquido saturado		Sólido	
		lit.	pies <sup>3</sup>	lit.	pies <sup>3</sup>	lit.	pies <sup>3</sup>
		kgr	lb.	kgr	lb.	kgr	lb.
31	87,8	2,156	0,03453	2,156	0,03453		
30	86	2,990	0,04789	1,6768	0,02686		
25	77	4,167	0,06675	1,4168	0,02269		
20	68	5,258	0,08422	1,2876	0,02078		
15	59	6,329	0,10138	1,2226	0,01958		
10	50	7,519	0,12044	1,1655	0,01867		
5	41	8,850	0,14176	1,1197	0,01793		

Buenaventura Durán S.

0	32	10,383	0,16632	1,0813	0,01732		
— 5	23	12,141	0,19448	1,048	0,01678		
— 10	14	14,194	0,22792	1,019	0,01632		
— 15	5	16,609	0,26606	0,994	0,01592		
— 20	— 4	19,446	0,31188	0,971	0,01555		
— 25	— 13	22,885	0,36659	0,950	0,01521		
— 30	— 22	27,001	0,43251	0,931	0,01491		
— 35	— 31	32,008	0,51272	0,913	0,01462		
— 40	— 40	38,164	0,61132	0,897	0,01447		
— 45	— 49	45,809	0,73378	0,881	0,01411		
— 50	— 58	55,407	0,88752	0,867	0,01388		
— 55	— 67	67,620	1,0832	0,853	0,01366		
— 56,6	— 69,9	72,220	1,1568	0,849	0,01360	0,661	0,01059
— 60	— 76			0,840	0,01345	0,657	0,01052
— 65	— 85					0,652	0,01044
— 70	— 94					0,649	0,01036
— 75	— 103					0,643	0,01030
— 80	— 112					0,639	0,01023
— 85	— 121					0,635	0,01017
— 90	— 130					0,632	0,01012
— 95	— 139					0,629	0,01007
— 100	— 148					0,627	0,01004
— 110	— 166					0,623	0,00998
— 120	— 184					0,619	0,00992
— 130	— 202					0,615	0,00985
— 183	— 297,4					0,599	0,00910

CALOR ESPECIFICO MOLAL EN  $\frac{\text{cal}}{\text{gr}}$  PARA EL CO<sup>2</sup> GASEOSO

°C	°F	Cv	Cp	Cp. Calculado	Cv	Cp O °C
—80	—112	6,085	8,166	8,176	1,342	
—70	—94	6,150	8,229		1,338	
—60	—76	6,216	8,292	8,280	1,334	
—50	—58	6,282	8,335		1,330	
—40	—40	6,349	8,419	8,397	1,326	
—30	—22	6,417	8,484		1,322	
—20	—4	6,485	8,548	8,506	1,318	
—10	+14	6,555	8,614		1,314	
0	32	6,625	8,680	8,612	1,310	8,680
+100	212	7,192	9,220		1,281	8,927
200	392	7,656	9,670	9,585	1,263	9,338
300	572	8,081	10,077		1,241	9,398
400	752	8,476	10,468	10,402	1,235	9,537
500	932	8,822	10,838		1,225	9,737
600	1112	9,146	11,133	11,082	1,217	9,897
700	1292	9,449	11,433		1,210	10,098
800	1472	9,724	11,708	11,644	1,204	10,268

Proyecto para Planta de Hielo Seco

900	1652	9,950	11,947		1,200	10,437
1000	1832	10,173	12,157	12,106	1,195	10,569
1100	2012	10,357	12,346		1,192	10,698
1200	2192	10,528	12,518	12,488	1,189	10,808
1300	2372	10,680	12,666		1,186	10,925
1400	2552	10,817	12,807	12,810	1,184	11,047
1500	2732	10,964	12,949		1,181	11,168
1600	2912	11,092	13,077	13,083	1,179	11,277
1700	3092	11,220	13,206		1,177	11,407
1800	3272	11,351	13,338	13,347	1,175	11,527
1900	3452	11,472	13,457		1,173	11,648
2000	3632	11,612	13,598	13,597	1,171	11,768

Entalpia de CO<sup>2</sup> liquido en  $\frac{\text{cal}}{\text{kgr.}}$       Entalpia de CO<sup>2</sup> sólido en  $\frac{\text{cal}}{\text{kgr.}}$

T en °C	Entalpia	T en °C	Entalpia
Temperatura crítica	133,50	— 56,6	25,21
+ 30	125,90	— 60	23,71
+ 25	118,30	— 65	21,49
+ 20	114,00	— 70	19,59
+ 15	110,10	— 75	17,93
+ 10	106,50	— 80	16,73
+ 5	103,10	— 85	16,41
+ 0	100,10	— 90	14,98
— 5	96,91	— 95	13,59
— 10	94,09	— 100	10,88
— 15	91,44		
— 20	88,93		
— 25	86,53		
— 30	84,19		
— 35	81,88		
— 40	79,59		
— 45	77,30		
— 50	75,01		
— 55	72,72		
— 56,6	71,97		

La entalpia se puede buscar por la fórmula siguiente:

$$i = 169,34 + (0,1965 + 0,000115 t) t - 8,3724 \frac{P}{\left[\frac{T}{100}\right]^{\frac{10}{3}}}$$

$$(1 + 0,007424 p) \quad p = \frac{\text{kgrs}}{\text{cm}^2} \quad T = \text{°K} \quad t = \text{°C}$$

T °C — 56,6 — 60 — 70 — 80 — 90 — 100 — 110  
 Cp 16,41 16,06 15,00 14,8 13,24 12,54 11,92  
 CALOR ESPECIFICO MOLAL DEL CO<sup>2</sup> SOLIDO

Maass y Bernes obtuvieron el promedio de 12,496  $\frac{\text{cal}}{\text{gr}}$  entre  
 — 115° C y — 183, 1 °C.

De — 56° a — 110° C se calcula de la fórmula:  
 Cp = 44 (0,400 — 0,00283 T + 0,0000125 T<sup>2</sup>).

CALOR DE SUBLIMACION

142,4  $\frac{\text{cal}}{\text{gr}}$  a — 78 y 1 atmósfera

129,9 " en el punto triple  
 140,7 " a — 103, 1° C  
 144 " a — 133, 1° C

Luego por la fórmula

$$L_s = L_o - 0,2409 T + 0,0014957 T^2 - 0,00000431 T^3 \quad L_o = 158,96$$

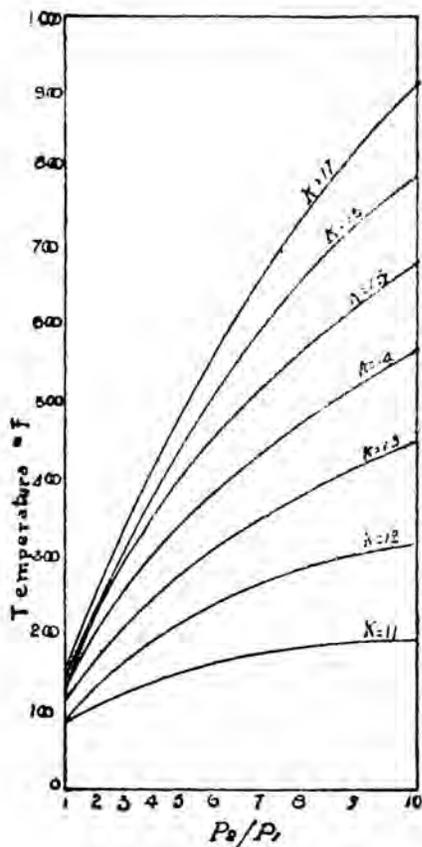
t °C	P. atm	Ls. $\frac{\text{cal}}{\text{gr}}$
— 56,6	5,112	129,88
— 60	4,048	131,35
— 65	2,838	133,38
— 70	1,959	134,93
— 75	1,329	136,13
— 78,9	0,986	136,89
— 80	0,885	137,08
— 85	0,577	137,88
— 90	0,367	138,57
— 95	0,228	137,19
— 100	0,137	139,77

Equivalencia de presiones, temperatura y demás cantidades mostradas en el diagrama cuantitativo del capítulo cuarto.

75 $\frac{\text{lbs}}{\text{pulg}^2}$	=	5,25 $\frac{\text{kgrs}}{\text{cm}^2}$	
350 "		=	24,6 "
970 "		=	68 "
450 "		=	30,6 "
2.500 "		=	170 "

Proyecto para Planta de Hielo Seco

2.750	lbr	"	=	1.243	kgrs.
1.775,25	"	"	=	850	"
2.974,75	"	"	=	1.350	"
6.750	"	"	=	3.062	"
4.974,75	"	"	=	2.250	"
20	pulgadas	"	=	51	cms.
10	"	"	=	25,4	"
40	grados	Fahr	=	4,5	grados C.
80	"	"	=	26,2	" "
50	"	"	=	10	" "
-40	"	"	=	-40	" "
20	"	"	=	-6,5	" "
-70	"	"	=	-56,7	" "
88,43	"	"	=	31	" "
90	"	"	=	32	" "



## CAPITULO QUINTO

**Cálculo de un intercambiador de calor para 1.200 pies cúbicos por hora, de anhídrido carbónico.**

El problema se puede enunciar así:

Se tienen 1.200 pies cúbicos por hora de anhídrido carbónico gaseoso a una presión manométrica de 75 libras por pulgada cuadrada y a 267 grados Fahr, para enfriarlos a 40 grados Fahr.

El gas circula por dentro de los tubos de cobre que tienen un diámetro externo de una pulgada, calibre 18 de la escala B. W. G.

Cada tubo está rodeado por otro tubo de cobre de diámetro externo de una y media pulgadas, calibre 16 de la misma escala B. W. G.

El agua fluye en contracorriente a través del espacio anular a una velocidad de dos pies por segundo y, entra al intercambiador a 36 grados Fahr.

Se supondrá la velocidad del gas a 25 pies por segundo.

Averiguaremos en este cálculo, el número de tubos; temperatura del agua que sale; calor transmitido; superficie de calentamiento, etc.

El calor específico del anhídrido carbónico se tomará igual a 0,204.

### SOLUCION:

Se verá primero cómo se encontró el dato del enunciado del problema que se refiere a la temperatura de 267 grados Fahr.

Se tiene que el anhídrido carbónico gaseoso sufre una compresión desde 14,7 libras por pulgada cuadrada hasta 75 libras por pulgada cuadrada y, mi propósito es averiguar el aumento de temperatura debido a esa compresión.

En una compresión adiabática todo el trabajo aparece representado en forma de energía en el gas comprimido.

Esto significa que la temperatura ha sufrido un aumento porque la energía es independiente de la presión.

El aumento de temperatura puede ser obtenido de la siguiente ecuación: (7, 17 en Chemical Engineering Thermodynamics).

$$\frac{T^2}{T^1} = \left(\frac{P^2}{P^1}\right)^{\frac{k-1}{k}}$$

La temperatura se toma en grados Rankin y las presiones en libras por pulgada cuadrada.

$T^1 = 40$  grados Fahr.

$P^2 = 75$  libras por pulgada cuadrada.

$P^1 = 14,7$  " " " " "

$k = 1,30$

Reemplazando se tendrá:

$$\frac{T^2}{500} = \left(\frac{75}{14,7}\right)^{\frac{1,30-1}{1,30}}$$

## Proyecto para Planta de Hielo Seco

$$T^2 = 5,1^{\circ} \times 231$$

$$T^2 = 727 \text{ grados Rankin}$$

$$T^2 = 727 - 460 = 267 \text{ grados Fahr.}$$

Este mismo resultado podrá obtenerse gráficamente a entropía constante.

Con este dato de temperatura empezaremos la resolución del problema.

### I — NUMERO DE TUBOS

Se averiguará el área interna del tubo de cobre de una pulgada. (Apéndice V de Badger y Mc. Cabe, página 635).

Area interna para una pulgada de diámetro externo = 0,683 pulgadas cuadradas.

$$0,638 \text{ pulg}^2 \times \frac{1 \text{ pie}^2}{144 \text{ pulg}^2} = 0,00443 \text{ pies}^2$$

Como la velocidad del gas es 25 pies por segundo, cada tubo llevará por hora:

$$0,00443 \text{ pies}^2 \times 25 \frac{\text{pies}}{\text{seg.}} \times 3600 \frac{\text{seg.}}{\text{hr.}} = 352 \frac{\text{pies}^3}{\text{hr.}}$$
$$\frac{1200}{352} = 3,42$$

Aproximadamente cuatro tubos en paralelo.

### II — CALOR PERDIDO POR EL GAS

El peso de un pie cúbico de anhídrido carbónico a 75 libras por pulgada cuadrada y a 267 grados Fahr es, de acuerdo con Bradger y Mc Cabe, página 8, igual a:

$$\frac{44}{359} \times \frac{75 + 14,7}{14,7} \times \frac{460 + 32}{460 + 267} = 0,505 \text{ lbs.}$$

Peso molecular del anhídrido carbónico 44.

El peso total del gas para ser enfriado es por lo tanto:

$$0,505 \times 1200 = 606 \text{ libras por hora.}$$

El calor transmitido o perdido por el gas será:

$$Q = m C_p dt.$$

$$606 \times 0,204 (267 - 40) = 28100 \text{ Btu.}$$

### III — TEMPERATURA DEL AGUA QUE SALE

Area interna del tubo de una pulgada y media .....	1,473 pul <sup>2</sup>
Area externa del tubo de una pulgada ..	0,785 "
Area del espacio anular .....	0,668 pul <sup>2</sup>

Como son cuatro tubos en paralelo, el paso del agua será:

$$0,668 \times 4 = 2,672 \text{ pulg}^2$$

La velocidad es de dos pies por segundo.

$$W = v \times s \times p$$

$$2,672 \times \frac{1 \text{ pie}^2}{144 \text{ pulg}^2} \times 2 \frac{\text{pies}}{\text{seg}} \times 3600 \frac{\text{seg}}{\text{hr}} \times 62,42 \frac{\text{lbs.}}{\text{pie}^3} = 8600 \text{ libras por hora}$$

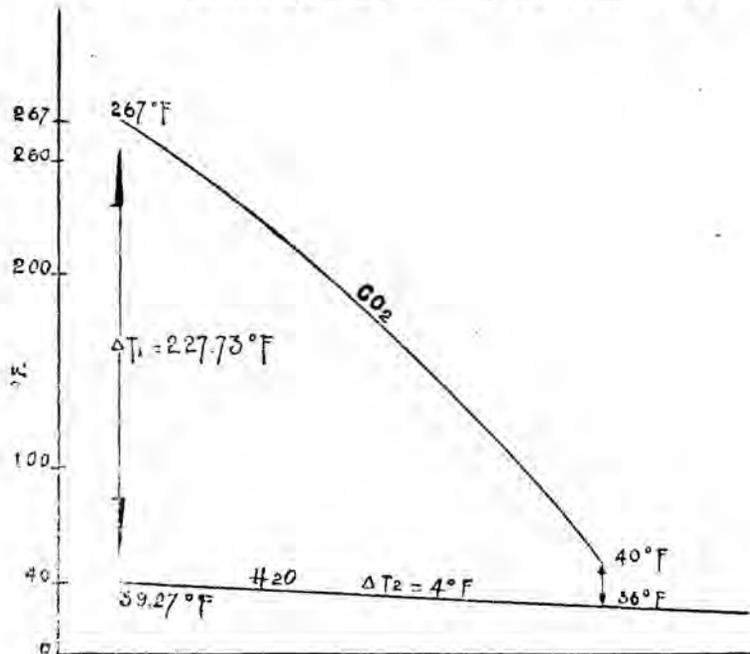
El aumento en temperatura será de:

$$\frac{28100}{8600} = 3,27 \text{ grados Fahr.}$$

La temperatura del agua que se usó en el enfriamiento del anhídrido carbónico gaseoso es:

$$36 + 3,27 = 39,27 \text{ grados Fahr.}$$

#### IV — TEMPERATURA MEDIA LOGARITMICA



Escala: 5mm. = 20 grados Fahr.

Representación gráfica de la temperatura media logarítmica.

$$dT^1 = 267 - 39,27 = 227,73 \text{ grados Fahr.}$$

$$dT^2 = 40 - 36 = 4 \text{ grados Fahr.}$$

$$dT_m = \frac{227,73 - 4}{2,3} = 56 \text{ grados Fahr.}$$

$$\log \frac{227,73}{4}$$

### V — COEFICIENTE FILMICO DEL GAS:

Con la ayuda de la ecuación de Dittus-Boelter (Badger y McCabe, página 134), para gases que no condensan se puede buscar este coeficiente.

Los valores usados para las propiedades del gas son tomados de la temperatura promedia entre 267 y 40 grados Fahr o sea a 150 grados aproximadamente y, todas las unidades serán expresadas en libras-pie-hora.

Como el gas va a ser enfriado, el coeficiente para el Prandtl será 0,3.

La fórmula de Dittus-Boelter queda expresada así:

$$h = 0,0225 \frac{k}{D} (Re)^{0,8} (Pr)^{0,3}$$

$$h = 0,0225 \frac{k}{D} \left(\frac{D v \rho}{u}\right)^{0,8} \left(\frac{C_p u}{k}\right)^{0,3}$$

$$k = 0,00898$$

Diámetro interno de una pulgada = 0,902 pulgadas.  
0,902 pulgadas = 0,0752 pies.

$$v_p = \frac{606}{4 \times 0,00443} = 34200$$

$$C_p = 0,204$$

$$u = 0,0189 \frac{\text{gr.}}{\text{cm} - \text{seg.}}$$

$$0,0189 \frac{\text{gr}}{\text{cm} - \text{seg}} \times \frac{1 \text{ lb}}{453 \text{ grs}} \times 3048 \frac{\text{cm}}{\text{pie}} \times 3600 \frac{\text{seg}}{\text{hr}} = 0,0456 \frac{\text{lb}}{\text{pie} - \text{hora}}$$

Reemplazando en la fórmula de Dittus-Boelter, tenemos:

$$h = 0,0225 \left(\frac{0,00898}{0,0752}\right) \left(\frac{0,0752 \times 34200}{0,0456}\right)^{0,8} \left(\frac{0,204 \times 0,0456}{0,00898}\right)^{0,3}$$

$$h = 0,00268 \times 56500 \times 1,037$$

$$h = 0,00268 \times 0,8 \log 56500 \times 0,3 \log 1,037$$

$$h = 0,00268 (0,8 \times 4,752) (0,3 \times 0,01578)$$

$$h = 0,00268 \times 6340 \times 1,301 = 22,7$$

## VI — COEFICIENTE FILMICO DEL AGUA:

Diámetro exterior del tubo externo .....	1,5	pulgadas
Espesor de la pared, 2 x 0,065 .....	0,130	"
Diámetro interior del tubo externo .....	1,370	"
Area del círculo de 1,370 pulgadas de diámetro .....	1,474	pulgadas <sup>2</sup>
Area del círculo de una pulgada de diámetro .....	0,785	"
Area del espacio anular .....	0,689	"

## FACTOR DE FORMA:

$$\frac{0,689}{3,142 \times 12} = 0,01828 \text{ pies}$$

## DIAMETRO EQUIVALENTE:

$$4 \times 0,01828 = 0,07312$$

$$k = 0,333 \text{ (Perry, página 958, tabla 9ª).}$$

$$v = 2 \frac{\text{pies}}{\text{seg}} \times 3600 \frac{\text{seg}}{\text{hr}} = 7200 \frac{\text{pies}}{\text{hora}}$$

$$p = 62,42$$

$$u = 1,31 \times 2,42 = 3,170$$

$$h = 0,0225 \left( \frac{0,333}{0,07312} \right) \left( \frac{0,07312 \times 7200 \times 62,42}{3,170} \right)^{0,8} \left( \frac{1 \times 3,170}{0,333} \right)^{0,4}$$

El Prandtl es a la 0,4 porque el agua sufre calentamiento:

$$h = 0,1025 (10350)^{0,8} (9,523)^{0,4}$$

$$h = 0,1025 (0,8 \log 10350) (0,4 \log 9,523)$$

$$h = 0,1025 \times 1629 \times 2,463 = 410,2$$

## VII — COEFICIENTE TOTAL:

Como el coeficiente pelicular del gas es más bajo que el coeficiente pelicular del agua, el coeficiente total se aproximará al coeficiente filmico del gas; motivo por el cual se usará el área interna para calcular la superficie de calentamiento.

De la ecuación 65 (página 130 de Badger y Mc Cabe) se tiene:

$$U^1 = \frac{1}{\frac{1}{h^1} + \frac{D^1 L}{D_{\text{prom.}} K} + \frac{D^1}{D^2 h^2}}$$

Una ecuación análoga puede escribirse para el área interna y el área promedia.

Valores:

$$\begin{aligned} h^1 &= 22,70 \\ D^1 &= 1,000 - (2 \times 0,049) = 0,902 \text{ pulgadas} \\ &0,902 \text{ pulgadas} = 0,0752 \text{ pies} \\ D^2 &= 1,000 = 0,0833 \text{ pies} \\ D \text{ promedio} &= 0,00401 \text{ pies} \\ k &= 226 \\ h^2 &= 410,2 \end{aligned}$$

Reemplazando en la fórmula:

$$U^1 = \frac{1}{\frac{1}{22,70} + \frac{0,0752 \times 0,00401}{0,0792 \times 226} + \frac{0,0752}{0,0833 \times 410,2}}$$

$$U^1 = \frac{1}{0,0445 + 0,0000169 + 0,0022} = 22,40$$

Como es mucha la diferencia entre los dos coeficientes filmicos, la ecuación 66 puede ser usada.

$$U^1 = \frac{1}{\frac{1}{h^1} + \frac{L}{K} + \frac{1}{h^2}}$$

$$\begin{aligned} h^1 &= 22,70 \\ L &= 0,00401 \\ K &= 226 \\ h^2 &= 410,2 \end{aligned}$$

De donde:

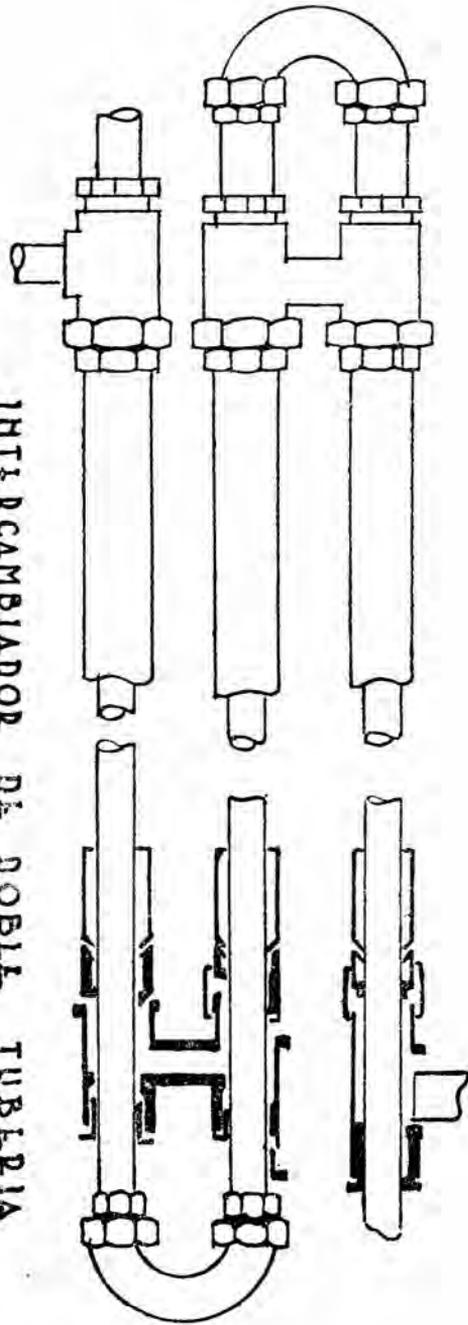
$$U^1 = \frac{1}{\frac{1}{22,70} + \frac{0,00401}{226} + \frac{1}{410,2}}$$

$$U^1 = \frac{1}{0,0445 + 0,0000177 + 0,00243}$$

$$U^1 = \frac{1}{0,0469477} = 22,70$$

El uso de la ecuación 65 fue innecesario.

INTERCAMBIAADOR DE DOBLE TUBERIA



### VIII — SUPERFICIE DE CALENTAMIENTO

La ecuación 89 de Badger y Mc Cabe se expresa así:

$$Q = U A dTm$$

Sustituyendo se obtiene;

$$28100 = 23 \times A \times 56$$

$$A = 21,7 \text{ pies cuadrados}$$

Por el apéndice 5º de Badger se tiene que a cada tubo corresponden 0,236 pies cuadrados de superficie interna por pie lineal y, como son cuatro tubos para usar en paralelo, la longitud será:

$$\frac{21,7 \text{ pies}^2}{4 \times 0,236 \frac{\text{pies}^2}{\text{pie}}} = 22,8 \text{ pies}$$

$$22,8 \text{ pies} \times 0,3048 \frac{\text{mts.}}{\text{pie}} = 6,85 \text{ mts.}$$

Significado de las convenciones usadas en el cálculo anterior.

- h = Coeficiente de transmisión de calor.
- D = Diámetro.
- k = Conductividad térmica.
- v = Velocidad lineal.
- p = Densidad.
- u = Viscosidad.
- C = Calor específico.
- dT = Diferencia de temperatura.
- U = Coeficiencia total.
- W = Gasto masa.
- Q = Cantidad de calor.
- L = Espesor.
- A = Area.
- h<sup>1</sup> = Coeficiente pelicular del gas.
- h<sup>2</sup> = Coeficiente filmico del agua.