



# Documento Técnico

IIAR Natural Refrigeration Conference

12-15 de marzo del 2023  
Long Beach, California

## RECONOCIMIENTOS

El éxito de la Conferencia Anual del IIAR se debe a la calidad de los documentos técnicos en este volumen y al trabajo de sus autores. El IIAR expresa su profundo agradecimiento a los autores, revisores y editores por sus contribuciones a la industria de la refrigeración con refrigerantes naturales.

## SOBRE ESTE VOLUMEN

Los documentos técnicos del IIAR están sujetos a una rigurosa revisión técnica por expertos en la industria. Las opiniones y puntos de vista expresadas en los artículos de este volumen son estrictamente las de los autores; mas no las del IIAR. Dichas opiniones no son parte de la política oficial del Instituto, y no están respaldadas oficialmente.

International Institute of Ammonia Refrigeration  
1001 North Fairfax Street, Suite 503  
Alexandria, VA 22314

703-312-4200 • [info@iiar.org](mailto:info@iiar.org) • [www.iiar.org](http://www.iiar.org)

© 2023 IIAR



## Trabajo Técnico #9

# Ecuaciones Simples para determinar el Flujo de Masa en sistemas de Refrigeración

Elaborado por Don Faust, Training Manager  
FRICK, a Johnson Controls Company

*Presentado por*

Mauricio Quiroga, Director de ventas Refrigeración Industrial  
Johnson Controls NOLA

### **Abstracto**

*El objetivo de cualquier sistema de refrigeración es remover calor. Y por eso la carga térmica total sería lo primero que un ingeniero de diseño debe de calcular. Esa carga térmica es la adecuada para dimensionar y seleccionar los evaporadores. Sin embargo, esa misma carga térmica es usada frecuentemente también para seleccionar otros componentes del sistema, que pudiera resultar en error. La carga térmica debe ser usada solamente par seleccionar componentes que transfieren calor*

*Este documento presenta la metodología y desarrolla ecuaciones simples para determinar el flujo de masa en sistemas de refrigeración industrial. Este método utiliza la técnica de balance de masa, el cual asume un sistema en condición estable donde la suma del flujo de masa que entra es igual a la suma de masa que sale en algún componente del sistema. La técnica de balance de masa ayuda a cuantificar el flujo de masa desconocido o difícil de calcular los otros métodos. Estas ecuaciones de flujo de masa se aplican a cualquier refrigerante en un ciclo de sistema de compresión típico.*

*Los sistemas de refrigeración modernos frecuentemente emplean varios niveles de temperatura y presión para mantener las varias condiciones de operación que se requieren en los proceso o cámaras de almacenaje en las plantas. Ejecutando el balance de masa es el único modo para dimensionar en forma más precisa, varios componentes y equipos, y el balance de masa abre la ventana dentro del sistema que pueden revelar estrategias tanto para el ahorro de energía como el ahorro de inversión inicial.*



## Introducción

El primer calculo en el diseño de un sistema de refrigeración es saber cuánto calor debe ser removido y a que temperatura (carga térmica). Es lógico asumir que la carga Térmica en el evaporador es el primer “Dato Preciso” que el ingeniero de diseño calcula y el resto del sistema depende de eso.

Las unidades TR o toneladas de refrigeración (kW en sistema internacional) es un rango de transferencia de valor, ya que tiene unidades de energía calórica dividido entre el tiempo. Es claramente aplicable a un evaporador. Y ciertamente es conveniente el poder dimensionar el equipo con base a la carga del evaporador. Un numero “sirve para todo” y no se puede muchas veces detener a un Ingeniero de diseño por hacer exactamente eso: Seleccionar componentes que NO intercambian calor, usando un dato referido al intercambio de calor

Basado en las tablas de capacidad y selección de nuestros fabricantes, uno pudiera pensar que la carga térmica en el evaporador es un método valido y aceptado para dimensionar todos los componentes en un sistema de refrigeración industrial. Virtualmente cada componente en un sistema de refrigeración tiene tablas y graficas que demuestran la “capacidad” del Equipo representados en Toneladas de Refrigeración – TR (o kW). Tuberías, recipientes, bombas, compresores y válvulas, todos tienen ya sea por fabricantes o compañías en la industria capacidades publicadas en Unidades de Transferencia de calor. Todas estas tablas incluyen pies de página, típicamente en letra pequeña, donde explican las suposiciones que fueron tomadas que permiten al diseñador a usar las unidades equivocadas para seleccionar o dimensionar sus equipos.

Si vemos cuidadosamente un equipo en un sistema, las unidades correctas para dimensionar ese equipo fundamentalmente serian las unidades relativas a la Función del equipo. Por ejemplo, un compresor podría ser visto como un dispositivo para reducir el volumen de un gas, y eso pudiera revelar la unidad fundamental de los

compresores – flujo volumétrico por unidad de tiempo. Recipientes para separación pueden ser vistas como puntos amplios de tuberías donde se baja la velocidad de vapor – por tanto, el flujo volumétrico puede ser también la unidad de medida apropiada para seleccionar recipientes. (nota, hay que recordar que algunos recipientes también pueden requerir considerar una capacidad de almacenamiento – independiente de los requerimientos de separación líquido y vapor).

### Unidades Apropriadas para selección de Equipos

EQUIPO	Unidad de Medida
Evaporadores	Carga térmica de refrigeración
Condensadores	Carga Térmica del Compresor
Compresores	Flujo Volumétrico de succión de Vapor
Recipientes	Flujo Volumétrico y Volumen de almacenaje
Dispositivos de Expansión	Masa o flujo volumétrico / Calidad
Tuberías y Válvulas	Masa o flujo volumétrico / Calidad
Bombas	Masa o Flujo Volumétrico

Uds. Pueden observar en la lista anterior, que las unidades apropiadas para dimensionar algunos de los equipos en un sistema de refrigeración, no es la transferencia de calor que sucede en los evaporadores. Haciendo un balance de masa nos permite saber el flujo de masa en cada pieza de equipo en nuestro sistema, y podemos convertir fácilmente el flujo de masa en la apropiada unidad de medida para dimensionar las diferentes piezas de equipo.

## LA Ecuación de Flujo de Masa

$$\Sigma \text{ Flujo de Masa Entrante} = \Sigma \text{ Flujo de Masa Saliente}$$

La técnica de flujo de masa para la solución de problemas se centra alrededor del concepto que para cada pieza de equipo – o grupo de piezas de equipo – el flujo de masa entrante debe ser igual al flujo de masa saliente en un estado de equilibrio estable. En nuestros procesos algunas cosas cambian frecuentemente de estado físico el cual afecta considerablemente el volumen – pero el flujo de masa debe estar balanceado. Cada componente del sistema tiene un flujo de masa de refrigerante entrante y saliente, y la suma de los flujos entrantes y salientes de cada pieza de equipo debe ser igual a Cero. El flujo de masa se aplica a cada pieza de equipo, o cada grupo de piezas de equipos. Masa entrante debe ser igual a masa saliente bajo condiciones de estado en equilibrio estable.

### ¿Están los sistemas de Refrigeración en estado en equilibrio estable?

Todos tenemos ejemplos de que suceden cosas en un estado no estable en nuestros sistemas de refrigeración. Congeladores en Espiral cuando arrancan en la mañana, condensadores que se llenan de líquido, recibidores que están “secos”. ¿Estas observaciones empíricas no concuerdan con la suposición del Estado de Equilibrio estable de un sistema de refrigeración? La respuesta es ambas SI y NO. SI, la suposición del estado de equilibrio estable no es responsable por las alteraciones del sistema y no es válido para escenarios temporales breves. Pero entre mas largo el tiempo del escenario, mas valido es la suposición de estado de equilibrio estable. Un desbalance en el Flujo de masa solo se presenta por periodos cortos de tiempo, por lo que la suposición de Estado de equilibrio estable si aplica a nuestros sistemas.

## El problema del Gas de Flasheo o Flash Gas

Uno de los problemas al usar la Carga térmica del evaporador para seleccionar otros equipos, es el considerar el trabajo del Gas de Flasheo No-Útil. Esto no es un problema con sistemas de una temperatura – ya que el Gas de Flasheo es normalmente considerado en las Capacidades del catalogo de los fabricantes. Cuando un sistema tiene múltiples temperaturas, y cada nivel remueve el gas de Flasheo para los niveles de temperatura menores - el sistema no se puede dimensionarse correctamente usando la carga térmica del evaporador.

La mayoría de los sistemas de refrigeración Industrial usan múltiples niveles de temperatura de succión, y como se maneje el gas de flasheo tiene mucho que ver con que tan eficiente es. Haciendo un balance de flujo de masa, es la única forma para considerar apropiadamente el gas de Flasheo en un sistema de múltiples temperaturas.

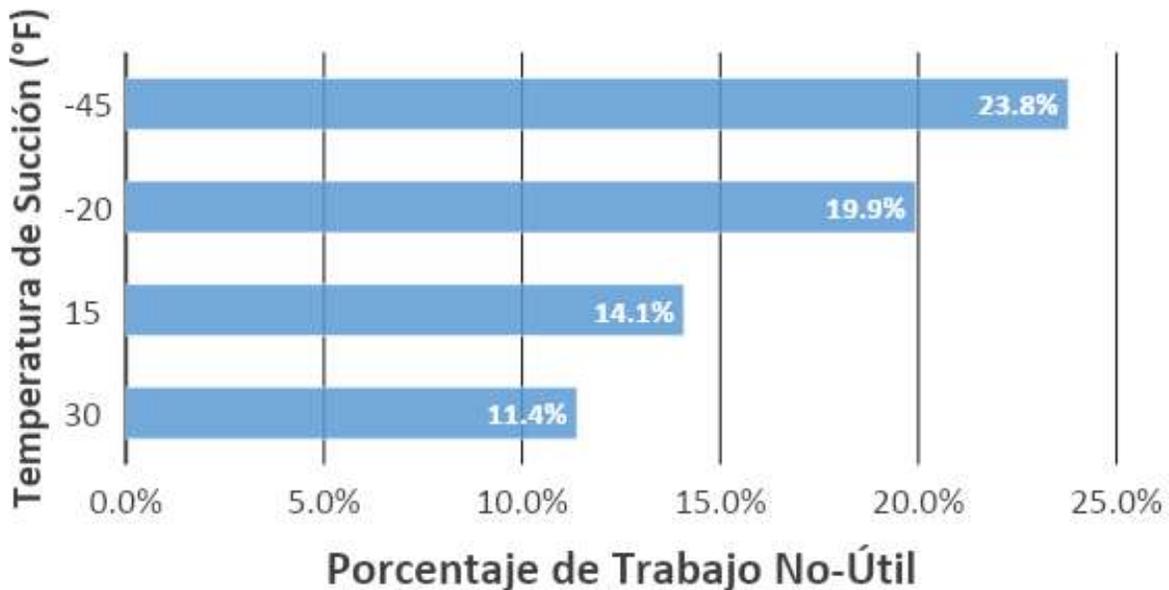


Figura 1. Porcentaje de masa del gas de flasheo.

El gas de flasheo no es una carga insignificante. Refiriéndonos a la Figura 1, la masa del gas de flasheo, dependiendo de la temperatura, esta entre un  $1/8$  y un  $1/4$  del total del flujo de masa a los compresores. Este hecho es clave en el porque el Balance de Masa es muy importante. El gas de flasheo es la carga más grande después de la carga térmica misma de refrigeración – y es muy significativa para solo adivinarla. Cuando sistemas de múltiple temperatura son utilizados – balance de masa es la única forma de poder calcular precisamente cuanto gas de flasheo puede ocurrir a cada nivel de temperatura.

Uds. Verán que estamos utilizando temperatura de condensación de  $85^{\circ}\text{F}$  ( $29.44^{\circ}\text{C}$ ). Una temperatura de condensación de  $95^{\circ}\text{F}$  ( $35^{\circ}\text{C}$ ) es más comúnmente usada para dimensionar condensadores, pero eso es basado en un 0.4% del Dia. La mayoría de los sistemas trabajaran alrededor de una temperatura de condensación de  $85^{\circ}\text{F}$  ( $29.44^{\circ}\text{C}$ ) la mayor parte del tiempo entonces es una buena suposición para buscar una típica – no el peor escenario – de la operación.

## **Cálculos Termodinámicos**

El calor latente de evaporación (CLE), el gas de flasheo (GF) y el efecto refrigerante neto (ER), son términos que el Ingeniero de Refrigeración esta familiarizado. Enfriamiento de liquido (EL) es un termino que el autor utiliza para cuantificar la carga del gas de Flasheo. Vean Figura 1 para la descripción visual del EL, ER y los terminaos de calor latente.

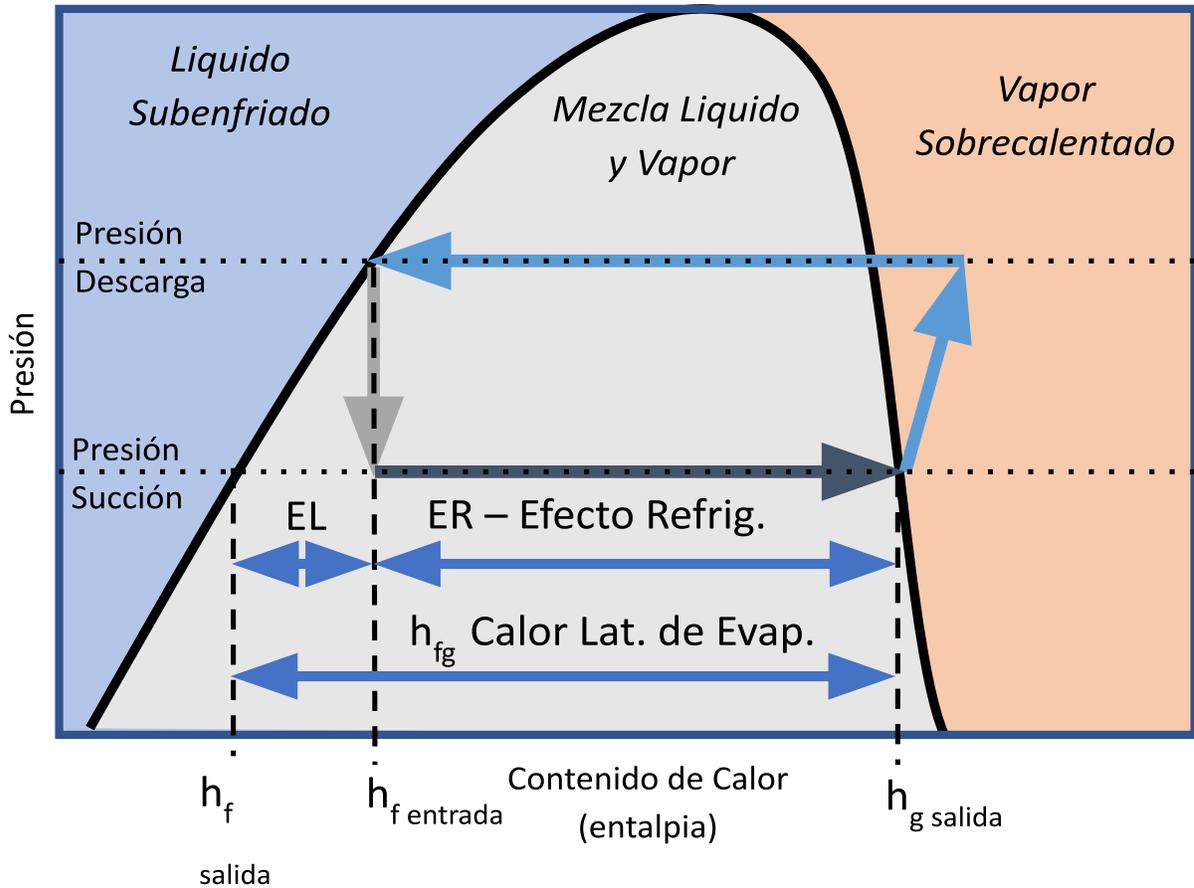


Figura 2. Diagrama de presión-entalpia mostrando ER y EL.

### **$h_{fg}$ , El Calor latente de Evaporación**

El Símbolo  $h_f$  es usado para representar la Entalpia de un líquido saturado, y  $h_g$  para la entalpia de vapor saturado. El símbolo  $h_{fg}$  representa el Calor latente de evaporación, o la diferencia entre la entalpia ente el líquido saturado y vapor saturado a una temperatura constante. Esto es frecuentemente enlistado en las tablas termodinámicas. Puede ser calculado restando la entalpia del líquido saturado de la entalpia de vapor saturado a la temperatura y presión en consideración.

$$\text{EQ (1)} \quad h_{fg} = h_f - h_g$$

### **Efecto Refrigerante Neto:**

El Efecto Refrigerante Neto (ERN) Es la diferencia en entalpia entre el líquido entrando y el vapor saturado (salida) en el proceso en consideración

La ecuación para calcular el Efecto Refrigeración Neto es:

$$\text{EQ (2)} \quad NRE = h_{fent} - h_{gsal}$$

Es Común usar el Valor Absoluto de este valor para que siempre sea un valor positivo

### **Enfriamiento de Liquido**

**Enfriamiento de Liquido (EL):** Trabajo, en forma de enfriamiento mecánico, debe ocurrir cuando hay una reducción de la temperatura en un refrigerante liquido en un sistema cerrado. Por ejemplo, Liquido caliente entrando a un evaporador frio, el líquido caliente debe ser enfriado hasta su temperatura de saturación. Esta carga de enfriamiento es la diferencia entre la entalpia de liquido entrando y la temperatura de liquido saliendo. Esta diferencia en entalpia se conoce como enfriamiento de liquido (EL)

$$\text{EQ (3)} \quad LC = h_{fin} - h_{fout}$$

## Flash Gas

Flash Gas (FG): Es el vapor generado cuando se enfría el líquido a la temperatura de saturación en el proceso que se está analizando. Calculando la cantidad de flash gas se requiere el uso de los términos descritos arriba para el efecto neto de refrigeración y el enfriamiento de líquido. La carga de flash gas producida es el producto del flujo de masa de líquido (L) y la diferencia de entalpía del enfriamiento del líquido (LC). El flash gas es simplemente esa carga dividida por el calor latente de evaporación ( $H_{fe}$ )

$$\text{EQ (4)} \quad FG = \frac{(L \cdot LC)}{h_{fg}}$$

## Desglosando el Calor Latente de Evaporación

La evaporación siempre ocurre en saturación. Sin embargo, no todos los procesos en un sistema de refrigeración ocurren con líquido saturado y vapor saturado. Por ejemplo, si líquido caliente es alimentado a un evaporador frío, el líquido debe enfriarse hasta su saturación antes de que se pueda evaporar – esto es llamado enfriamiento de líquido (LC). El resultado termodinámico de enfriar el líquido a saturación y luego su evaporación se conoce como el efecto neto de refrigeración (NRE). Una forma de determinar el Calor Latente de Evaporación es considerar la suma del Efecto Neto de Refrigeración (NRE) y el enfriamiento de líquido (LC)

$$\text{EQ (5)} \quad h_{fg} = h_f - h_g = NRE + LC$$

## Flujo de Masa para Evaporadores

El flujo de masa en el evaporador varía dependiendo el tipo de alimentación usado. Nosotros asumimos que todos los evaporadores les entra líquido, y lo que sale es Vapor o una mezcla de Vapor y líquido.

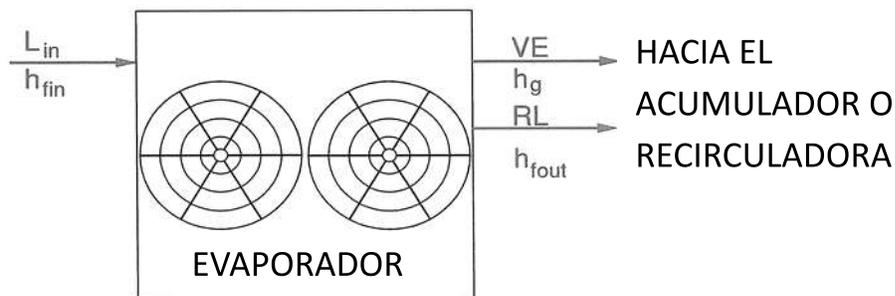


Figura 2. Diagrama de Flujo de un Evaporador

$L_{in}$  Flujo de Masa de Líquido al evaporador lb/min (kg/min)

$h_{fin}$  Entalpía del Líquido entrando al evaporador BTU/lb (kJ/kg)

VE Vapor generado por el Evaporador lb/min (kg/min)

$h_g$  Entalpía del Vapor generado por el evaporador BTU/lb (kJ/kg)

RL Retorno Líquido saliendo del evaporador lb/min (kg/min)

$h_{fout}$  Entalpía del Líquido saliendo del evaporador BTU/lb (kJ/kg)

Examinaremos dos Escenarios Diferentes:

### Alimentación DX

Líquido entra al evaporador a través de un dispositivo de expansión, se expande (flashea) hasta la temperatura de evaporación. El Vapor que sale del

evaporador esta seco (puro vapor). Todo el líquido alimentado al evaporador es evaporado  $RL = 0$

### **Sobrealimentado – Alimentación por Bombas o Inundado**

Líquido Se expande (flashea) en la Recirculadora, después es bombeado al evaporador. El líquido entra a la temperatura de evaporación – por lo que no se genera Flash Gas en el evaporador. El vapor saliendo del evaporador arrastra la sobre alimentación de líquido.

## **Evaporadores Alimentación DX**

No hay RL o Retorno de líquido, ya que la succión saliendo de un evaporador de expansión directa DX esta seca (sin Líquido). Nosotros consideramos que el dispositivo de expansión es parte del evaporador para propósitos de cálculos. Para DX (expansión Directa),  $n$ , la relación de recirculación es  $-1$

El vapor generado por el evaporador seria entonces la Carga de Refrigeración  $W$  dividido por el Efecto Neto de Refrigeración  $NRE$ .

$$\text{EQ (6)} \quad VE_{DX} = \frac{W}{NRE}$$

Donde  $W$  es la carga de Refrigeración (BTU/min)

[Para convertir Toneladas de Refrigeración (TR) a BTU/Min multiplicar por 200]

**Nota Importante:** La mayoría de los sistemas de expansión directa DX utilizan sobrecalentamiento del Vapor para controlar la cantidad de alimentación de líquido. Este sobrecalentamiento ofrece trabajo utilizable en enfriamiento. Para cuantificar apropiadamente la contribución de este sobrecalentamiento en el enfriamiento, usar  $h_g$  para la condición de sobrecalentamiento en el calculo del Efecto Neto de

Refrigeración. Sin embargo, si esos vapores sobrecalentados encuentran líquido saturado después en el sistema – en una tubería de retorno mojado o en un recipiente – el vapor sobrecalentado será enfriado a la temperatura de saturación. En este caso – el Efecto Neto de Refrigeración al sistema será el mismo usando la entalpia para el gas saturado a la evaporación. Los ejemplos de Balance de Masa usan esta aproximación – condiciones de saturación son usadas en la salida del evaporador de Expansión Directa DX

El líquido suministrado al evaporador será

$$\text{EQ (7)} \quad L_{in} = n * VE_{DX}$$

Para evaporadores de expansión directa DX  $n = 1$ , por lo tanto

$$\text{EQ (8)} \quad L_{DX} = VE_{DX}$$

NOTA: Evaporadores de Expansión Directa DX, típicamente obtienen líquido de un recipiente diferente al que retornan. Por ejemplo, El recibidor de Alta Presión alimenta el líquido al evaporador, y el vapor retorna al Acumulador de Succión. Esto es importante para mantener en mente cuando se hacen los balances de Masa en los recipientes. La mayoría de los evaporadores de Expansión Directa DX serán alimentados por el Recibidor de alta presión, pero algunos podrán ser alimentados de un origen diferente – y su alimentación de líquido debe ser añadido a la salida de líquido  $L_{out}$  del recipiente que surte el líquido

## **OF – Evaporadores Sobre alimentados (overfeed) – Bombeados o Inundados**

Los evaporadores sobre alimentados alimentan más líquido del que evaporan. Frecuentemente, este líquido es alimentado al evaporador a Líquido saturado,

El flash gas se queda en el recipiente del acumulador y el líquido es bombeado al evaporador. En estos casos, el evaporador tiene el lujo de trabajar con el completo Calor latente de Evaporación, en lugar de solo el Efecto Neto de Refrigeración. El punto malo con este arreglo es que la tubería de retorno debe traer ambos el vapor generado como la sobre alimentación de líquido

## Relación de Recirculación

Nuestra industria utiliza varias formas de expresar la misma idea: relación de sobrealimentación, rango de sobrealimentación, relación de recirculación, numero de circulación, rango de circulación, etc. Sin embargo, aun sin el acuerdo de como llamarlo, la definición del conceto se mantiene en todos los manuales y libros.

El Libro de Will Stoecker “Manuel de Refrigeration Industrial” – “Industrial Refrigeration Handbook”, p. 302, Define la relación de Recirculación como

$$\text{Relación de circulación } n = \frac{\text{Flujo de Refrigerante suministrado al evaporador}}{\text{Flujo de refrigerante Evaporado}}$$

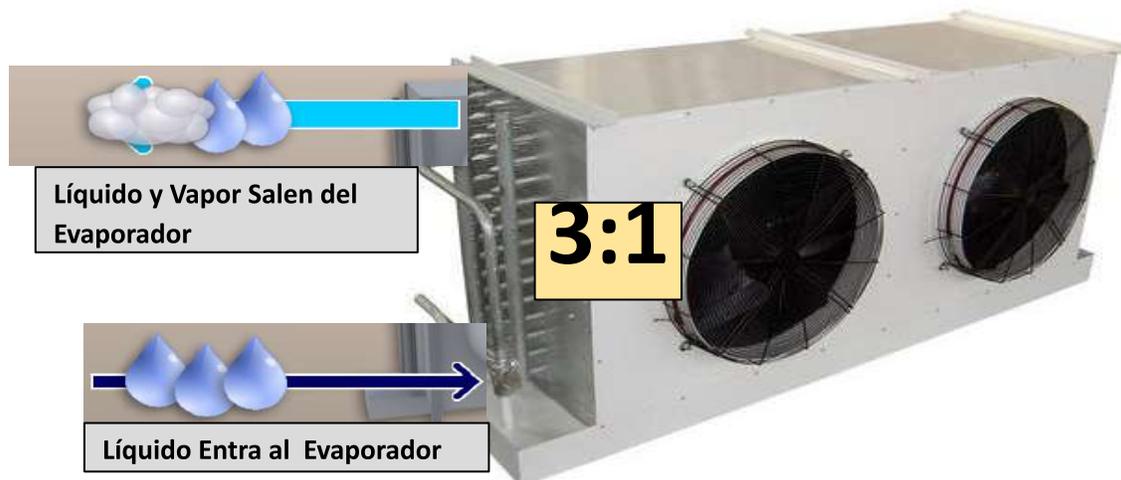


Figura 3. Numero de sobrealimentación.

El Manual libro de Refrigeración del ASHRAE, 2018, Pagina 4.4, menciona: “En sistema con liquido sobrealimentado, la relación de masa de liquido bombeado a la cantidad de liquido vaporizado es el número de Circulación o relación de recirculación.” La relación de circulación define la cantidad del refrigerante a la salida del evaporador. Si la Calidad de vapor es 50%, entonces es una relación de circulación 2:1. Si la Calidad de Vapor es 33%, la relación de circulación es 3:1. Es una relación simple entre la cantidad de vapor generado y la cantidad de liquido alimentado al evaporador, es la Inversa de la Calidad de Vapor

Una de las diferencias entre un CPR (Constant Pressure Receiver – Recibidor de presión Constante) y Sistemas bombeados es la temperatura del líquido alimentado a los evaporadores. En el caso de un sistema bombeado el liquido esta a su temperatura de saturación en el recirculador, donde la bomba lo presuriza (en efecto haciéndolo un líquido subenfriado) y empuja el liquido saturado salir a los evaporadores.

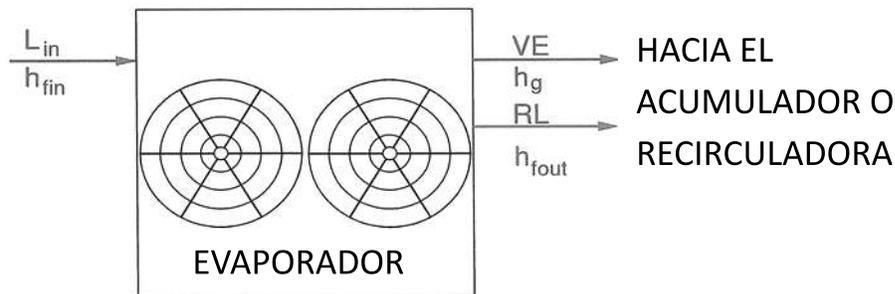


Figura 4. Diagrama de flujo de masa en el evaporador.

El vapor generado en el evaporador será:

$$\text{EQ (9)} \quad VE_{OF} = \frac{W}{NRE}$$

Donde W es la Carga de Refrigeración. Ecuación (9) trabaja para sistemas alimentación inundado o recirculación. Sin embargo, para alimentación recirculación con bombas, El efecto Neto de Refrigeración (NRE) es el mismo que el Calor latente

de evaporación ( $h_{fg}$ ). Entonces para Cargas de Recirculación la ecuación se simplifica a :

$$\text{EQ (10)} \quad VE_{OF} = \frac{W}{h_{fg}} \quad (\text{Solamente Recirculado})$$

Habr  casos en que el liquido alimentado con bombas o presión no estará a condiciones de saturación para el evaporador (por ejemplo, Sistemas CPR) – Por lo que es mejor usar el Efecto Neto de Refrigeración (EQ (9)) – que para la mayor numero de aplicaciones es el mismo que el Calor latente de Evaporación.

El Liquido suministrado al Evaporador seria:

$$\text{EQ (11)} \quad L_{in\ OF} = n * VE_{OF}$$

RL Es el líquido de retorno sobrealimentado

$$\text{EQ (12)} \quad RL_{OF} = (n - 1) * VE_{OF}$$

No hay carga del liquido sobrealimentado en un sistema de recirculación. En Sistemas CPR el líquido sobrealimentado creara una carga de refrigeración y debe de considerarse en el diseño

## Flujo de Masa en Recipientes

Utilizando el Balance de Masas – se puede resolver a cualquier pieza de equipo del sistema. Sin Embargo, los recipientes son donde realmente vamos a resolver el balance de masas para el sistema. Los recipientes son principales en términos de flujo de masas – reciben los flujos de masa de los evaporadores, los recipientes frecuentemente producen flash gas, y los compresores toman todo el vapor de los

recipientes. Los recipientes del sistema requieren entender donde el Flash Gas es separado para dimensionar los compresores apropiadamente

Conociendo cuanto vapor es generado por los evaporadores (VE) es el primer paso para desarrollar el balance de Masas. Eso contaría por el 80% de Vapor generado por el sistema y su trabajo utilizable. El resto 20% de Vapor es Flash Gas – que no produce un trabajo utilizable.

El más eficiente método para organizar un sistema es hacer que el Líquido de los condensadores vaya hacia abajo a través de todos los niveles de temperatura del sistema. Los recipientes de más alta temperatura suministran líquido al siguiente recipiente del nivel de temperatura. de esa Forma, el Líquido se “Flashea” en etapas, hasta que llega hasta el nivel mas bajo de temperatura del sistema. Note que el líquido alimentado al recipiente de  $-35^{\circ}\text{F}$  ( $-37.2^{\circ}\text{C}$ ) proviene del recipiente interenfriador de  $+25^{\circ}\text{F}$  ( $-3.9^{\circ}\text{C}$ ). El líquido del Recipiente de Alta Presión (HPR) es primero enfriado a  $+25^{\circ}\text{F}$  ( $-3.9^{\circ}\text{C}$ ) luego a  $-35^{\circ}\text{F}$  ( $-37.2^{\circ}\text{C}$ ).

Note que el sistema se muestra un sistema de Dos Etapas interenfriado. Este método generalizado trabaja para cualquier refrigerante – y es válido para tanto sistema de una o dos etapas de compresión. En un sistema de una Etapa, los valores de BD serán cero. Para un sistema de dos etapas interenfriado, el sistema se vería como este:

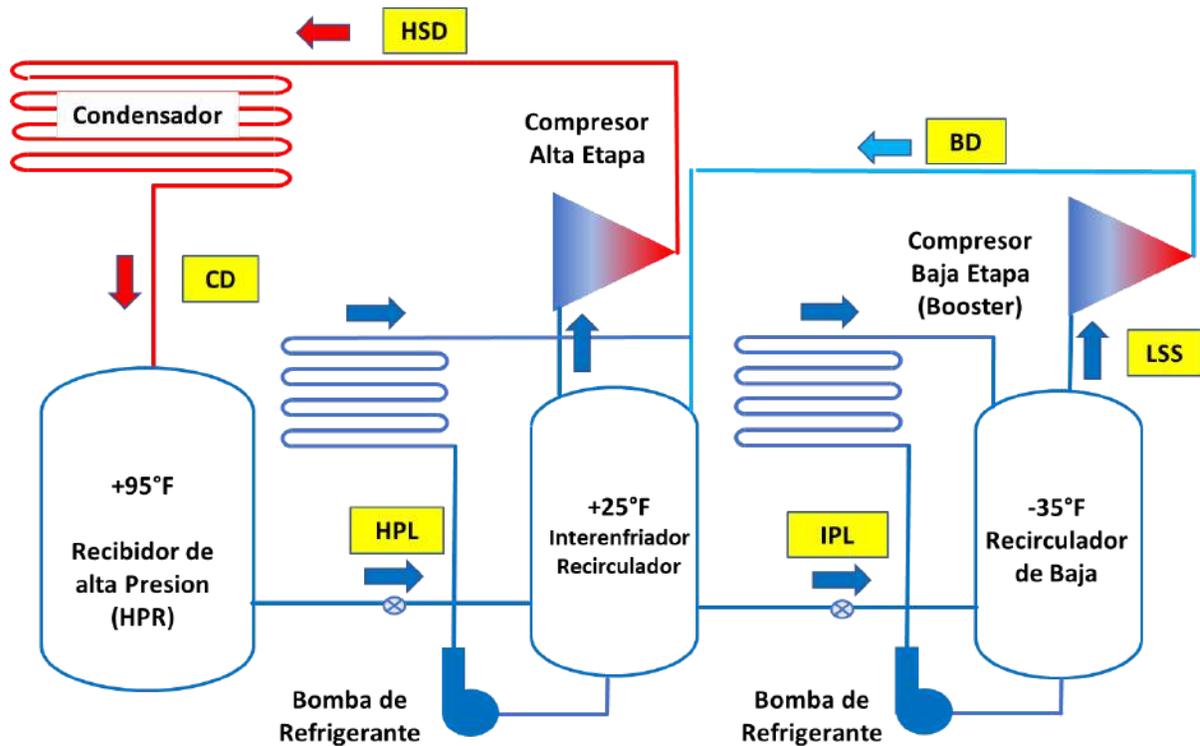


Figura 5. Sistema de dos etapas de compresión típico.

Nomenclatura:

HSD	High Stage Discharge – Descarga Alta Etapa
CD	Condenser Discharge – Descarga Condensador
HPL	High Pressure Liquid – Líquido Alta Presión
IPL	Intercooler Pressure Liquid – Líquido Presión Interenfriador
LSS	Low Stage Suction – Succión Baja Etapa
BD	Booster Discharge – Descarga del Booster o Compresor Baja Etapa

## Ecuaciones de Flujo de Masa en Recipientes

Para cualquier pieza de Equipo se debe cumplir lo siguiente:

$$\Sigma \text{Mass flows in} = \Sigma \text{Mass flows out}$$

La metodología demuestra aquí que funciona para cualquier recipiente, (excepto para un recipiente de presión controlada CPR, con un retorno de Líquido frío). Este enfoque generalizado incluye una provisión para un recipiente interenfriador – si el recipiente no interenfria, estos parámetros serían Cero

La suma de los flujos entrando y saliendo deben resultar cero, los flujos de masas son:

BD    Entra   Vapor sobrecalentado de los compresores Booster

VE<sub>OF</sub>    Entra   Vapor de retorno de los Evaporadores sobrealimentados

VE<sub>DX</sub>    Entra   Vapor de retorno de los Evaporadores DX

RL    Entra   Líquido de retorno de los evaporadores sobrealimentados

L<sub>in</sub>    Entra   Relleno de Líquido

V<sub>BD</sub>    Sale    Vapor generado por el desobrecalentamiento de la descarga de los compresores Booster más BD

VC    Sale    Vapor Seco a los Compresores

PL    Sale    Líquido bombeado a evaporadores

L<sub>out</sub>    Sale    Líquido alimentado con Presión para otro recipiente

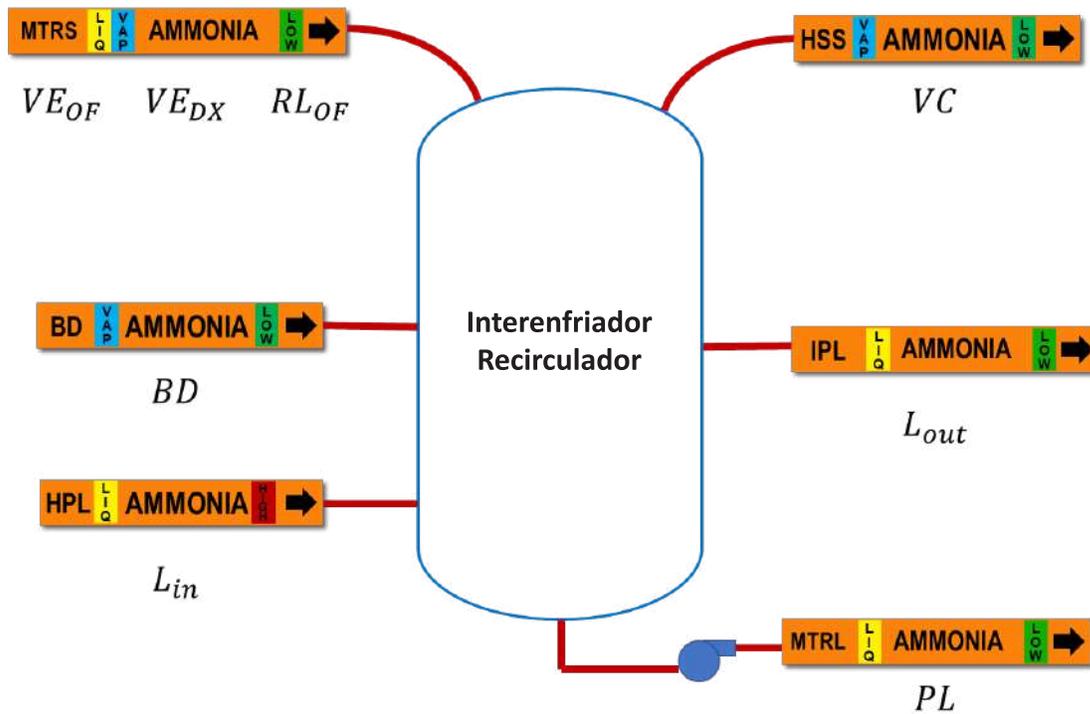


Figura 6. Variables de flujo de masas en un recipiente.

El vapor generado en los evaporadores (VE), y el liquido de relleno al recipiente ( $L_{in}$ ) son independientes del rango de recirculación. El único lugar donde el liquido recirculado entra en el cálculo, es para el rango de bombeo (PL) y la cantidad de liquido retornando en el cabezal de Succión Mojada (RL). El vapor al compresor (VC) es simplemente la suma del vapor generado en los evaporadores (VE), el enfriamiento realizado en la descarga de gases ( $V_{dsh}$ ) el flujo de masa de la descarga del Booster (BD) mas cualquier carga por Flash Gas.

Termodinámicamente, habrá cuatro entalpias que se tienen que considerar:

- $h_{fin}$  Entalpia del liquido entrante (HPL)
- $h_f$  Entalpia liquido saturado a la presión del recipiente
- $h_g$  Entalpia de vapor saturado a la presión del recipiente

$h_{BD}$  Entalpia de vapor sobrecalentado de la descarga de los booster a la presión del recipiente

El primer paso es resolver el flujo de masas usado en la Ecuación EQ (2) y EQ (3) para determinar RE y LC

Efecto Refrigerante

$$\text{EQ (2)} \quad NRE = (h_{fin} - h_g)$$

Liquido Enfriando

$$\text{EQ (3)} \quad LC = (h_{fin} - h_f)$$

## Interenfriadores

Si el recipiente en consideración es el Interenfriador, entonces EQ (13) – EQ (16) aplican al recipiente. Si el recipiente no es un Interenfriador estos valores son Cero

Para un recipiente Interenfriador, los compresores de alta Etapa deben comprimir el flujo de masas de los compresores de baja Etapa y deben también tomar el vapor generado por el desobrecalentamiento de los gases de descarga de los Booster o baja etapa, Asumimos en este ejemplo que la descarga de Booster esta desobrecalentado o a condiciones saturadas por usar entalpia Saturada ( $h_g$ ). Si ese no es el caso usar la entalpia a la condición del gas que se estará tener.

## VBD Carga del gas del Booster a Alta Etapa

La Carga es simplemente la diferencia de entalpia entre el gas sobrecalentado BD y el Gas Saturado. BD es un flujo de masas de los compresores de baja etapa (lb o kg/min)

$$\text{EQ (13)} \quad DSH = (h_{BD} - h_g)$$

Multiplicando esto por el flujo de masa se obtiene la carga

$$\text{EQ (14)} \quad \text{Booster Load} = DSH \times BD$$

Vapor generado por el desobrecalentamiento es esta carga dividida por el efecto refrigerante

$$\text{EQ (15)} \quad V_{dsh} = \frac{DSH \times BD}{NRE}$$

Para un Interenfriador, RE, el efecto refrigerante, es la diferencia de entalpia entre el vapor saturado en el Interenfriador, y la entalpia de la línea de relleno de líquido (típicamente HPL). El flujo de masa desde la descarga de los Booster es entonces agregado a la carga de desobrecalentamiento para el total de la carga de descarga de los Booster.

$$\text{EQ (16)} \quad V_{BD} = \frac{DSH \times BD}{NRE} + BD$$

## Balance de Masas en recipientes en General

La primera ecuación del interenfriador es un balance de Masas. Las masas que entran al recipiente son la entrada de Líquido ( $L_{in}$ ), El vapor generado por evaporadores (VE), y el retorno de Líquido (RL) mas la descarga del booster (BD). Las masas que

salen del recipiente son el Líquido bombeado (PL), el líquido que sale al siguiente recipiente,  $L_{out}$ ), y el vapor a los compresores (VC)

La suma de todo lo que entra y todo lo que sale de un interenfriador debe ser la misma

$$\text{EQ (17)} \quad L_{in} + VE_{OF} + VE_{DX} + RL + BD = PL + L_{out} + VC$$

### Líquido Bombeado

El Líquido bombeado que sale, en términos de flujo de masa, es igual al vapor de los evaporadores más el líquido de retorno

$$\text{EQ (18)} \quad PL = VE_{OF} + RL$$

### VC – El Vapor al Compresor

La carga a los compresores es la suma de el vapor de los evaporadores (VE) mas el flash gas del líquido que llega, y la carga de la descarga de los booster.

$$\text{EQ (19)} \quad VC = VE_{DX} + VE_{OF} + FG + V_{BD}$$

De la Ecuación EQ(3) el Flash Gas es

$$FG = L_{in} * \frac{LC}{h_{fg}}$$

Ecuación EQ(19) se puede reescribir como

$$\text{EQ (20)} \quad VC = VE_{DX} + VE_{OF} + V_{BD} + L_{in} * \frac{LC}{h_{fg}}$$

## Lin – La cantidad de Líquido de relleno (Makeup)

El líquido de relleno o makeup, consiste en la cantidad que se evapora en los evaporadores sobrealimentados, la carga de desobrecalentamiento al interenfriador, el flash gas generado por el líquido de relleno, mas cualquier alimentación de liquido saliendo a otros recipientes en el sistema ( $L_{out}$ ).

$$EQ (21) \quad L_{in} = VE_{OF} + V_{dsh} + L_{in} * \frac{LC}{h_{fg}} + L_{out}$$

No se requiere rellenar las cargas DX, entonces solo la porción evaporada en el evaporador cuenta para la alimentación de líquido.

Note que el termino  $L_{in}$  existe en ambas partes de la EQ(21), por lo que resolviendo EQ(21) para  $L_{in}$  se obtiene:

$$EQ (22) \quad L_{in} = \frac{VE_{OF} + V_{dsh} + L_{out}}{1 - \left(\frac{LC}{h_{fg}}\right)}$$

## $L_{out}$ – Alimentación con presión a Otros recipientes en el sistema

Aquí hay una situación. En realidad, no Podemos resolver para determinar el liquido que sale  $L_{out}$ . Pero debemos conocer que el líquido que sale esta antes que resolver las demás ecuaciones. Este hecho nos obliga a calcular el recipiente donde conocemos cual es el valor para la salida de liquido  $L_{out}$ . Y solo hay un lugar en el sistema donde conocemos el valor de  $L_{out}$ : es el Recipiente con la temperatura mas baja en el sistema,  $L_{out}$  es Cero para ese recipiente.

Todo análisis debe iniciar con el recipiente de la temperatura mas baja en el sistema y de ahí moverse adelante.  $L_{in}$  para el recipiente de más baja temperatura se convierte en  $L_{out}$  para el siguiente recipiente de nivel de temperatura y ahí sucesivamente.

Este modelo asume que el líquido DX proviene del recipiente de alta presión. Si el líquido DX proviene de otro origen – otro recipiente – entonces simplemente agregue esa cantidad de líquido al  $L_{out}$  de ese recipiente

### Flujos de entrada en recipientes

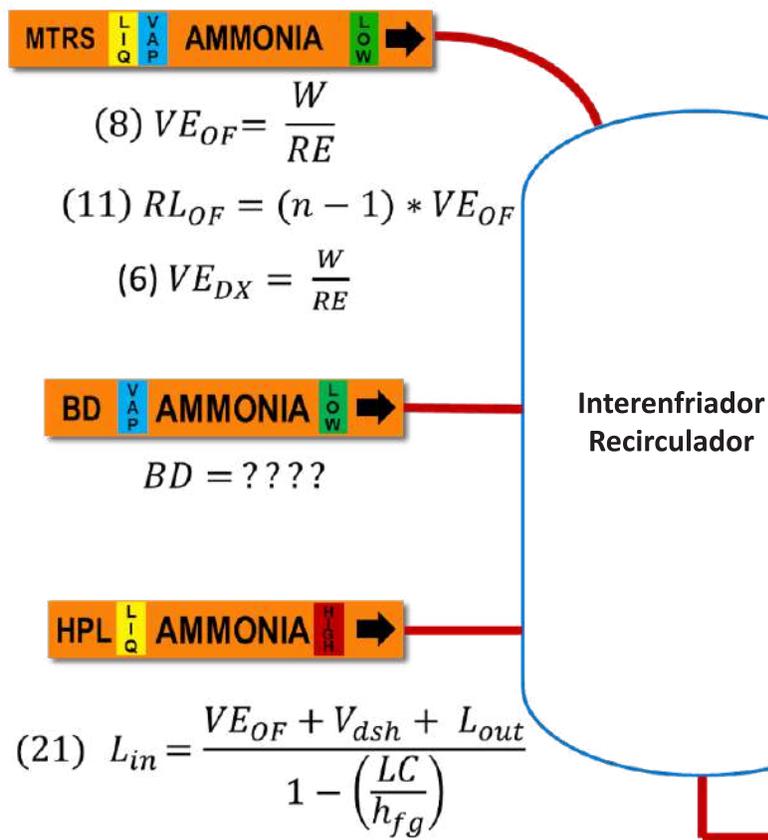


Figura 7. Ecuaciones de Flujo en recipientes.

*Flujo de Masa (lb/min o kg/min)*

BD	Entra	Vapor sobrecalentado de los compresores booster
VE <sub>OF</sub>	Entra	Vapor de retorno de evaporadores sobrealimentados
VE <sub>DX</sub>	Entra	Vapor de retorno de evaporadores DX
RL	Entra	Líquido de retorno de evaporadores sobrealimentados
L <sub>in</sub>	Entra	Líquido de relleno (makeup)
V <sub>BD</sub>	Sale	Vapor generado por el desobrecalentamiento de la descarga del booster de más BD
VC	Sale	Vapor Seco al compresor
PL	Sale	Líquido Bombeado a los evaporadores
L <sub>out</sub>	Sale	Líquido alimentado con presión a otros recipientes

*Otros Conceptos*

n	Radio de recirculación
W	Carga de refrigeración
RE	Efecto Refrigerante
h <sub>fg</sub>	Calor latente de evaporación
DSH	Diferencia Entalpia desobrecalentamiento

### Flujos de salida del Recipiente

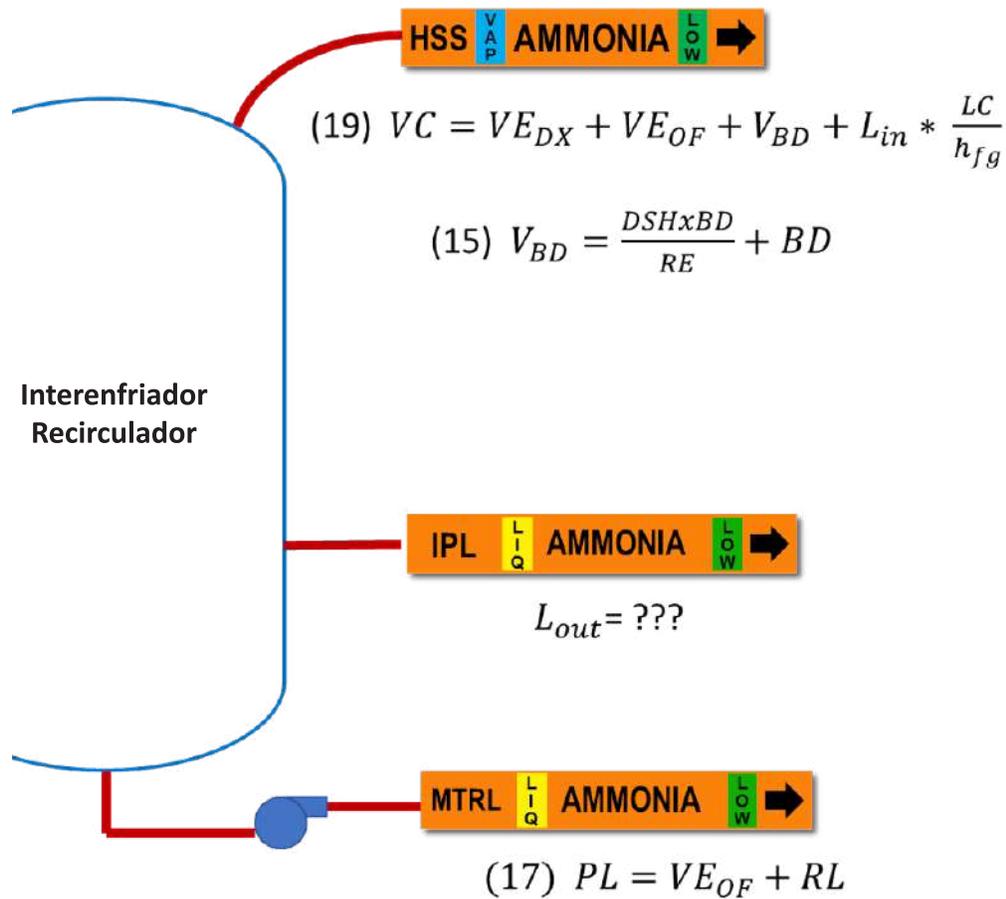


Figura 8. Ecuaciones flujos de salida en recipientes.

#### Flujo de Masa (lb/min o kg/min)

- BD Entra Vapor sobrecalentado de los compresores booster
- $VE_{OF}$  Entra Vapor de retorno de evaporadores sobrealimentados
- $VE_{DX}$  Entra Vapor de retorno de evaporadores DX
- RL Entra Liquido de retorno de evaporadores sobrealimentados

$L_{in}$	Entra	Líquido de relleno (makeup)
$V_{BD}$	Sale	Vapor generado por el sobrecalentamiento de la descarga del booster de más BD
VC	Sale	Vapor Seco al compresor
PL	Sale	Líquido Bombeado a los evaporadores
$L_{out}$	Sale	Líquido alimentado con presión a otros recipientes

### *Otros Conceptos*

n	Radio de recirculación
W	Carga de refrigeración
RE	Efecto Refrigerante
$h_{fg}$	Calor latente de evaporación
DSH	Diferencia Entalpia sobrecalentamiento

## **Aplicando Balances de Masa a sistemas**

Para realizar un Balance de masas Ud. Simplemente debe conocer

- Las cargas de evaporadores
- Las respectivas temperaturas del sistema (presiones)
- El tipo de alimentación a los grupos de evaporadores

Entonces usando las propiedades termodinámicas del refrigerante a utilizar, el resto de los cálculos se pueden realizar

Analizaremos un sistema con múltiples niveles de temperatura consistiendo de 4 niveles de temperatura en el sistema, incluyendo un sistema de dos etapas para la carga de baja-baja temperatura, las cargas de evaporador son:

Cargas Evaporador	Temp, °F	Carga, TR	Temp °C	Carga, KW
Alta Temperatura	30	150	-1.11	527.55
Media Temperatura	15	600	-9.44	2110.2
Baja Temperatura	-20	200	-28.89	703.4
Baja-Baja Temperatura	-45	500	-42.78	1758.5

En el Apéndice de este documento se muestran los resultados del análisis en una hoja de calculo del sistema tanto en unidades en (SI) Internacional como (IP) Imperial. Siempre tenga en mente que el análisis debe iniciar con el recipiente de más baja temperatura del sistema y de ahí continuar con el resto.

## Conclusión

Los balances de masas son fáciles de calcular – simplemente requieren de una a dos horas en una hoja de cálculo y estas ecuaciones pueden resolverse para cualquier refrigerante en cualquier temperatura. Desafortunadamente, lo que es fácil de hacer es más fácil no hacerlo. Muchos sistemas han sido diseñados sin realizar un balance de masas. Y, si el usuario es cuidadoso y observa todos los datos impresos en las hojas de selección – un sistema puede ser diseñado solo con las cargas del evaporador. Y los resultados serán cercanos a lo que realmente esta sucediendo. Pero para muchos de nuestros sistemas el acercarse no es suficiente – especialmente cuando puedes realizar un balance de masas y tener la certeza de todas las cargas en el Sistema. Con la disponibilidad ahora de computadoras y hojas de cálculo – todos los sistemas deben tener un Balance de masas.

## Referencias

ASHRAE, 2018, Refrigeration Handbook, SI Edition, Page 4.4, “4. Circulating Rate”

Wilbert “will” Stoecker, 1995, Industrial Refrigeration Handbook, Page 303, Secc. 8.4  
“Circulation Ratio”

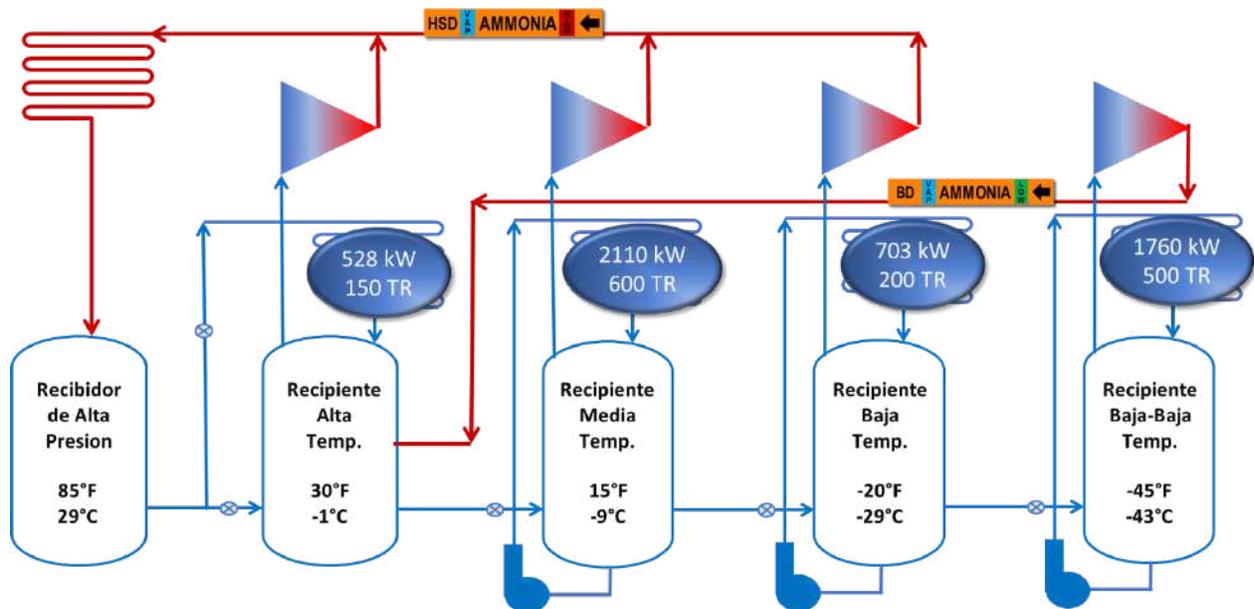
## APENDICE. Ejemplo Balance de Masas – Unidades IP

El ejemplo de balance de masas para este sistema consiste en 4 niveles de refrigeración. El recibido asume estara a condiciones normales – 85°F Temperatura de Condensacion por un 0.4% al dia, Las Cargas son:

Alta Temp	+ 30°F	150 TR	DX
Meda Temp	+ 15°F	600 TR	LR 1.2:1
Baja Temp	-20°F	200 TR	LR 2:1
Baja-Baja Temp	-45°F	500 TR	LR 4:1

Tabla A1. Balance de Masa.

Note que la Baja-Baja Temperatura es con un sistema de dos etapas – y descarga en el recipiente de Alta Temperatura



Las propiedades termodinámicas del refrigerante a las temperaturas seleccionadas de diseño (cortesía Frick Coolware)

Propiedades del Refrigerante (R717)	Baja-Baja Temp.		Baja Temp.		Media Temp		Alta Temp		Condensacion	
	Liquido	Vapor	Liquido	Vapor	Liquido	Vapor	Liquido	Vapor	Liquido	Vapor
T (°F)	-45	-45	-20	-20	15	15	30	30	85	85
P (psia)	8.9	8.9	18.3	18.3	43.1	43.1	59.7	59.7	166.4	166.4
V (ft³/lbm)	0.023	28.658	0.024	14.682	0.025	6.56	0.025	4.822	0.027	1.8
H (btu/lbm)	65.5	666.1	92.1	675.2	130	686.4	146.4	690.6	208.3	701.4
S (btu/lbm-°R)	0.171	1.62	0.233	1.56	0.316	1.488	0.35	1.461	0.469	1.374
U (btu/lbm)	65.4	618.8	92	625.6	129.8	634.1	146.1	637.3	207.5	646
X	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1
Mw (g/mol)	17.03	17.03	17.03	17.03	17.03	17.03	17.03	17.03	17.03	17.03
DewT (°F)	-45	-45	-20	-20	15	15	30	30	85	85
Density (lbm/ft³)	43.27	0.03	42.21	0.07	40.66	0.15	39.96	0.21	37.22	0.56

Propiedades Termicas						Notes
Temp. del Sistema	85	30	15	-20	-45	
Presion	166	60	43	18	9	°F psia
hf (bubble point)	208	146	130	92	66	btu/lbm
hg (dew point)	701	691	686	675	666	btu/lbm
Volumen Vapor	2	5	7	15	29	ft3/lbm
hg @ 165°FC		768	770			btu/lbm
hfg (LHE)	493	544	556	583	601	btu/lbm EQ (1)
RE		482	540	545	574	btu/lbm EQ (2)
LC		62	16	38	27	btu/lbm EQ (3)
Carga Evaporador						Notes
Temp. del Sistema	85	30	15	-20	-45	
Cargas Recirculacion		0	600	200	500	°F TR
W		0	120000	40000	100000	BTU/min (TR x 200)
n		0.0	1.2	2.0	4.0	:1 overfeed
Cargas DX		150.0	0	0	0	TR
W		30000	0	0	0	BTU/min (TR x 200)
Suma Cargas Evaporadores		<b>30,000</b>	<b>120,000</b>	<b>40,000</b>	<b>100,000</b>	BTU/min
Carga del Booster						Notes
Temp. del Sistema	85	30	15	-20	-45	
BD		182	0			°F Lb/min
DSH		77	84			btu/lbm EQ (12)
Carga Booster		14109	0			BTU/min EQ (13)
Vdsh		29	0			Lb/min EQ (14)
Vbd		212	0			Lb/min EQ (15)

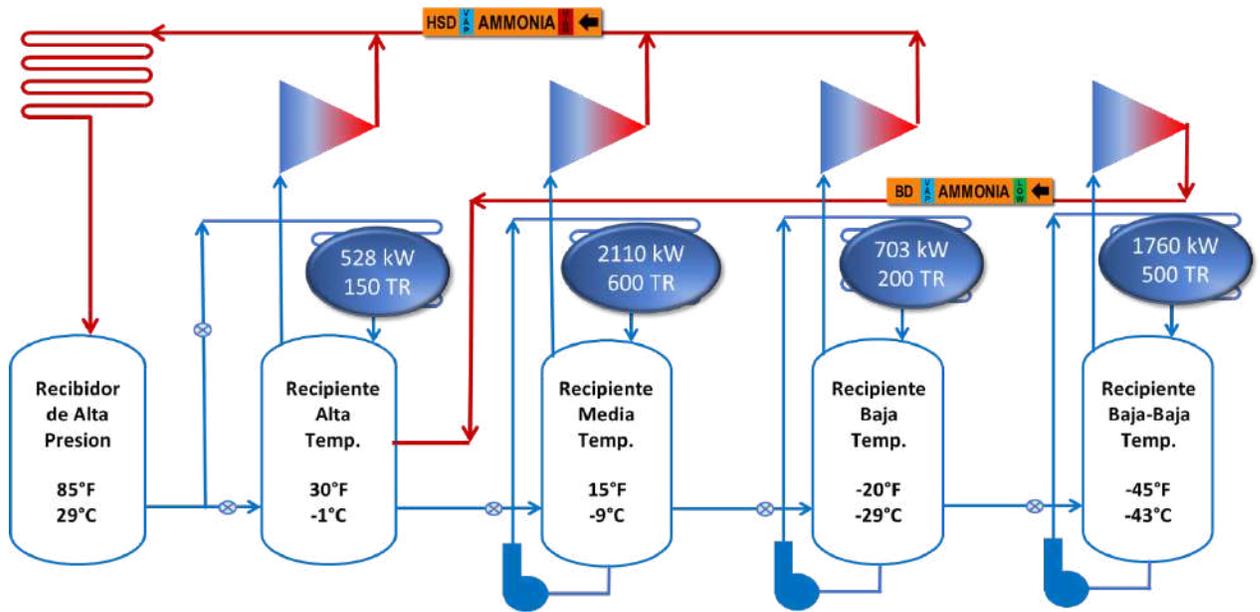
<b>Entradas Recipiente</b>							
Temp. del Sistema	85	30	15	-20	-45	°F	
VE OF		0	222	73	174	Lb/min	EQ (8)
VE DX		55	0	0	0	Lb/min	EQ (6)
<b>VE Total</b>		<b>55</b>	<b>222</b>	<b>73</b>	<b>174</b>	Lb/min	
BD		182	0			Lb/min	
RL		0	44	73	523	Lb/min	EQ (11)
Lin		609	511	273	182	Lb/min	EQ (20)
<b>Salidas Recipiente</b>							
Temp. del Sistema	85	30	15	-20	-45	°F	
PL		0	267	147	697	Lb/min	EQ (17)
Lout	609	511	273	182	0	Lb/min	
VC		336	237	91	182	Lb/min	EQ (19)
<b>Suma de Los Flujos</b>		<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	Lb/min	
<b>Selección del Compresor</b>							
Temp. del Sistema	85	30	15	-20	-45	°F	
VC		336	237	91	182	Lb/min	
<b>Flujo Volumetrico</b>		<b>1620</b>	<b>1557</b>	<b>1338</b>	<b>5224</b>	cfm	
<b>Flujo Total</b>	<b>9739</b>					cfm	

### Ejemplo Balance de Masas – Unidades SI

El ejemplo de balance de masas para este sistema consiste en 4 niveles de refrigeración. El recibido asume estar a condiciones normales – 85°F Temperatura de Condensación por un 0.4% al día, Las Cargas son:

Alta Temp	-1.1°C	1528 kW	DX
Meda Temp	-9°C	2110 kW	LR 1.2:1
Baja Temp	-29°C	703 kW	LR 2:1
Baja-Baja Temp	-43°C	1760 kW	LR 4:1

Note que la Baja-Baja Temperatura es con un sistema de dos etapas – y descarga en el recipiente de Alta Temperatura



Las propiedades termodinámicas del refrigerante a las temperaturas seleccionadas de diseño (cortesía Frick Coolware)

Propiedades del Refrigerante (R717)	Baja-Baja Temp.		Baja Temp.		Media Temp		Alta Temp		Condensacion	
	Líquido	Vapor	Líquido	Vapor	Líquido	Vapor	Líquido	Vapor	Líquido	Vapor
T (°C)	-42.8	-42.8	-28.9	-28.9	-9.4	-9.4	-1.1	-1.1	29.4	29.4
P (bara)	0.62	0.62	1.26	1.26	2.97	2.97	4.12	4.12	11.47	11.47
V (m³/kg)	0.00144	1.78903	0.00148	0.91658	0.00154	0.40949	0.00156	0.30103	0.00168	0.11236
H (kJ/kg)	152.3	1549.4	214.2	1570.6	302.3	1596.6	340.5	1606.2	484.6	1631.5
S (kJ/kg-K)	0.716	6.781	0.977	6.53	1.323	6.231	1.465	6.117	1.962	5.753
U (kJ/kg)	152.2	1439.2	214	1455.1	301.8	1474.9	339.9	1482.3	482.6	1502.6
X	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1
Mw (g/mol)	17.03	17.03	17.03	17.03	17.03	17.03	17.03	17.03	17.03	17.03
DewT (°C)	-42.8	-42.8	-28.9	-28.9	-9.4	-9.4	-1.1	-1.1	29.4	29.4
Density (kg/m³)	693.1	0.6	676.2	1.1	651.3	2.4	640.1	3.3	596.2	8.9

Propiedades Termicas							Notes
Temp. del Sistema	29	-1	-9	-29	-43		°C
Presion	11.47	4.12	2.97	1.26	0.62		bara
hf (bubble point)	485	341	302	214	152		kJ/kg
hg (dew point)	1632	1606	1597	1571	1549		kJ/kg
Volumen Vapor	0.11236	0.30103	0.40949	0.91658	1.78903		m3/kg
hg @ 74°C		1786	1791				kJ/kg
hfg (LHE)	1147	1266	1294	1356	1397		kJ/kg EQ (1)
RE		1122	1256	1268	1335		kJ/kg EQ (2)
LC		144	38	88	62		kJ/kg EQ (3)
Carga Evaporador							
Temp. del Sistema	29	-1	-9	-29	-43		°C
Cargas Recirculacion		0	2110	703	1759		kW
W		0	126612	42204	105510		kJ/min (kW x 60)
n		0.0	1.2	2.0	4.0		overCeed
Cargas DX		527.6	0	0	0		kW
W		31653	0	0	0		kJ/min (kW x 60)
Suma Cargas Evaporadores		31,653	126,612	42,204	105,510		kJ/min
Carga del Booster							
Temp. del Sistema	29	-1	-9	-29	-43		°C
BD		83	0				kg/min
DSH		180	194				kJ/kg EQ (12)
Carga Booster		14867	0				kJ/min EQ (13)
Vdsh		13	0				kg/min EQ (14)
Vbd		96	0				kg/min EQ (15)
Entradas Recipiente							
Temp. del Sistema	29	-1	-9	-29	-43		°C
VE OF		0	101	33	79		kg/min EQ (8)
VE DX		25	0	0	0		kg/min EQ (6)
VE Total		25	101	33	79		kg/min
BD		83	0				kg/min
RL		0	20	33	237		kg/min EQ (11)
Lin		276	232	124	83		kg/min EQ (20)

<b>Salidas Recipiente</b>						
<b>Temp. del Sistema</b>	<b>29</b>	<b>-1</b>	<b>-9</b>	<b>-29</b>	<b>-43</b>	°C
<b>PL</b>		0	121	67	316	kg/min EQ(17)
<b>Lout</b>	276	232	124	83	0	kg/min
<b>VC</b>		152	108	41	83	kg/min EQ(19)
<b>Suma de Los Flujos</b>		0	0	0	0	kg/min
<b>Seleccion del Compresor</b>						
<b>Temp. del Sistema</b>	<b>29</b>	<b>-1</b>	<b>-9</b>	<b>-29</b>	<b>-43</b>	°C
<b>VC</b>		152	108	41	83	kg/min
<b>Flujo Volumetrico</b>		46	44	38	148	m3/min
<b>Flujo Total</b>	<b>276</b>					m3/min

## Listado de Ecuaciones

1.  $h_{fg} = h_f - h_g$
2.  $NRE = h_{fin} - h_{gout}$
3.  $LC = h_{fin} - h_{fout}$
4.  $FG = \frac{(L*LC)}{h_{fg}}$
5.  $h_{fg} = h_f - h_g = NRE + LC$
6.  $VE_{DX} = \frac{W}{NRE}$
7.  $L_{DX} = VE_{DX}$
8.  $VE_{OF} = \frac{W}{NRE}$
9.  $VE_{OF} = \frac{W}{h_{fg}}$  (Recirculated only)
10.  $L_{inOF} = n * VE_{OF}$
11.  $RL_{OF} = (n - 1) * VE_{OF}$
12.  $DSH = (h_{BD} - h_g)$
13. *Booster Load = DSHx BD*
14.  $V_{dsh} = \frac{DSH \times BD}{NRE}$
15.  $V_{BD} = \frac{DSH \times BD}{NRE} + BD$
16.  $L_{in} + VE_{OF} + VE_{DX} + RL + BD = PL + L_{out} + VC$

$$17. \quad PL = VE_{OF} + RL$$

$$18. \quad VC = VE_{DX} + VE_{OF} + FG + V_{BD}$$

$$19. \quad VC = VE_{DX} + VE_{OF} + V_{BD} + L_{in} * \frac{LC}{h_{fg}}$$

$$20. \quad L_{in} = VE_{OF} + V_{dsh} + L_{in} * \frac{LC}{h_{fg}} + L_{out}$$

$$21. \quad L_{in} = \frac{VE_{OF} + V_{dsh} + L_{out}}{1 - \left(\frac{LC}{h_{fg}}\right)}$$



