

“¿QUÉ ES UN BALANCE DE ENERGÍA Y POR QUÉ ME DEBE IMPORTAR?”

*Presentado en la Conferencia RETA 2017
Septiembre 26 –Septiembre 29, 2017 –Hershey, Pennsylvania*

Juan Parra / Andrew Fiala
Project Professional / Sr. Project
Professional
SCS Tracer Environmental
6470 Kahuna Rd # B
Kapaa, HI 96747
Tel: 561 866-6157
Email: jparra@scsengineers.com
Fax: 760 744-8616

Todos los sistemas de refrigeración comienzan y terminan con un balance de materia y energía. ¿Qué es la refrigeración como la conocemos? Refrigeración es el proceso que permite agarrar el calor de un lugar, materia o material específico, removerlo y enviarlo a otro lugar. Este proceso está típicamente asociado con la reducción de temperatura de la materia o el material. El calor siempre se transferirá del lugar de mayor temperatura hacia el de menor temperatura.

Este artículo se enfocará en la definición real de calor, la importancia de un balance de energía, cómo calcular un balance de energía y los inconvenientes enfrentados por el personal de mantenimiento durante el día a día en el intento de asegurar que el calor necesario sea removido y el producto se mantenga frío.

Calor es una forma de energía. Existen 2 tipos de calor:

- Calor Sensible el cual ocasiona un cambio de temperatura en la substancia ($Q_s = M \times C_p \times \Delta T$).
 - Q_s = calor sensible
 - M = masa de la substancia
 - C_p = calor específico de la substancia
 - ΔT = diferencial de temperatura
- Calor Latente ocasiona un cambio de fase en la substancia ($Q_l = M \times hl$)
 - Q_l = calor latente
 - M = masa de la substancia
 - hl = contenido de calor latente

El Calor Total será la suma de ambos, sensible y latente ($Q = Q_s + Q_l$), el cual se puede medir en BTUs.

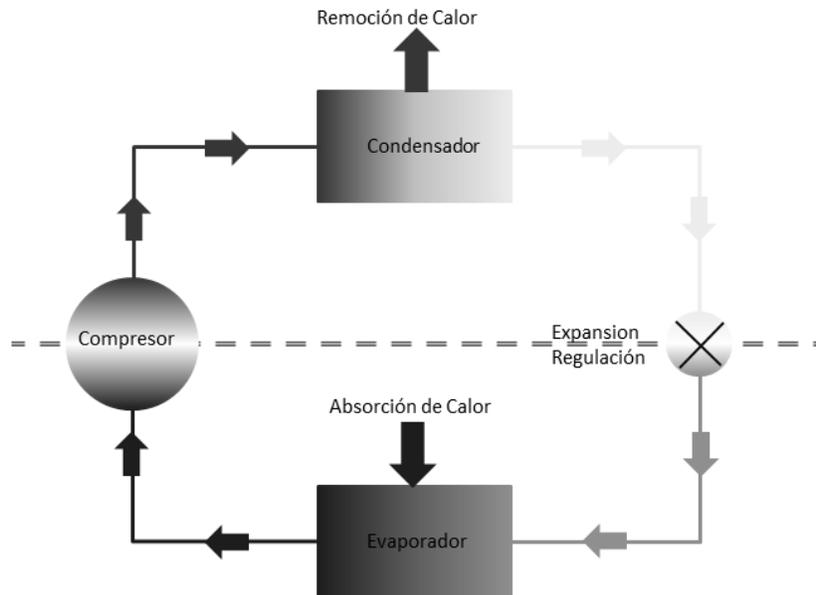
¿Por qué un balance de energía es importante en la refrigeración?

Para poder responder esta pregunta, primero es necesario entender el ciclo básico de refrigeración. Todos los sistemas de refrigeración poseen los siguientes 4 componentes



principales: evaporador, compresor, condensador y válvula de expansión/dispositivo regulador (Figura 1).

Figura 1: Ciclo Básico de Refrigeración



Fuente: Preparado por SCS Engineers.

Cada componente tiene una función específica en el sistema:

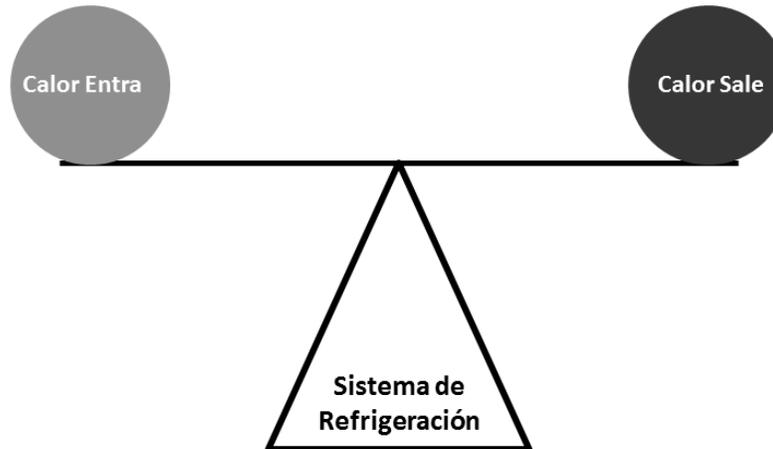
- El Evaporador permite que el calor del área, producto, materia, etc. se absorba y transmita al refrigerante. Esto obliga al refrigerante a cambiar de fase líquida a gaseosa.
- El Compresor incrementa la presión/temperatura del refrigerante.
- El Condensador permite que el calor sea removido del refrigerante, generando un cambio de fase gaseosa a líquida.
- El Dispositivo de Expansión o Regulación permite una disminución de la presión/temperatura del refrigerante.

La Primera Ley de la Termodinámica establece que la energía no se crea ni se destruye, sólo se trasforma. Un sistema de refrigeración transforma la energía a través del movimiento de calor de un lugar no deseado a un lugar deseado. Para poder asegurar que



la cantidad de calor deseada sea removida de forma eficiente es necesario que exista un balance entre todos los componentes del sistema. En otras palabras tiene que existir un balance de energía. (Figura 2).

Figura 2: Balance de Energía en un Sistema de Refrigeración



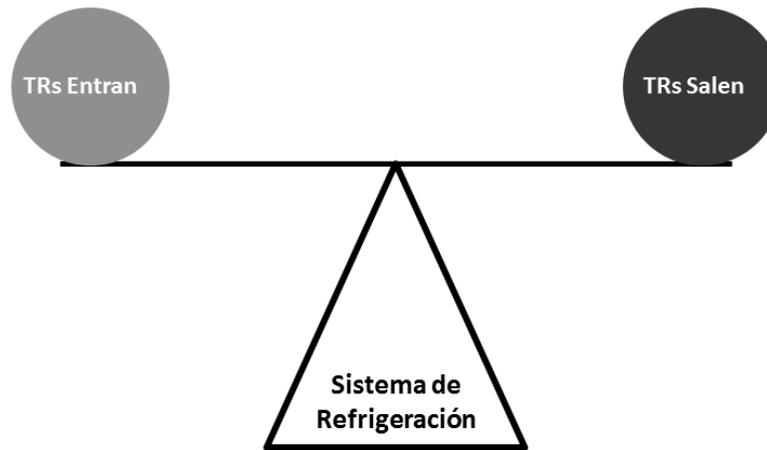
Fuente: Preparado por SCS Engineers.

En la industria de refrigeración de los Estados Unidos es común usar el término “Tonelada de Refrigeración” (TR), la cual es una unidad que representa la tasa de remoción de calor o capacidad de remoción de calor. Otra unidad común es el BTU/h, donde $1 \text{ TR} = 12,000 \text{ BTU/h}$.

Analizando la Figura 2 se puede decir que en un sistema de refrigeración eficiente la cantidad de toneladas de refrigeración que entra al sistema tiene que estar balanceada con la cantidad de toneladas de refrigeración que sale del sistema. Es decir, la cantidad de calor que es removido de un área o producto a través del sistema de refrigeración (calor que entra al sistema) tiene que estar balanceada con la cantidad de calor que el sistema de refrigeración es capaz de enviar a la atmósfera (calor que sale del sistema) (Figura 3).



Figura 3: TRs Entran / TRs Salen en un sistema de refrigeración



Fuente: Preparado por SCS Engineers.

En la industria de refrigeración los equipos tienen un índice de su capacidad nominal de movilizar calor desde / hacia el amoníaco o refrigerante. En los Estados Unidos el índice es usualmente establecido por el fabricante y normalmente sus unidades referidas como TR o BTUs. Adicionalmente, éste puede variar en diferentes tipos de equipos dependiendo de la operación del sistema. Típicamente los sistemas de refrigeración son diseñados considerando su ubicación geográfica incluyendo tendencias climáticas, temperatura deseada del área o producto, tipo de operación, cantidad de personas, fuentes de calor adicionales como luces, entre otros. Esto significa que el índice establecido por el fabricante puede variar dependiendo de si el sistema se está utilizando en condiciones de diseño o si se han hecho modificaciones en la operación del sistema para cumplir ciertos requerimientos específicos. Al final del día, el sistema de refrigeración debe estar balanceado para que opere de forma correcta. **Para los propósitos de este artículo se asumirá que los equipos se usarán en condiciones de diseño, sin embargo, es importante recordar que las capacidades nominales de los equipos están asociadas con los diferenciales de temperatura del producto, aire, refrigerante, etc. Mientras**



mayor sea el diferencial de temperatura también será mayor será la cantidad de calor asociada.

Observemos un simple balance de energía en un sistema de refrigeración de una etapa.

Se puede empezar por sumar todas las cargas de los evaporadores, intercambiadores de calor, etc. Esto proveerá las TRs totales que deben procesar los compresores (Cuadro 1).

Cuadro 1: Ejemplo de Cargas de Evaporación

ID #	Description	Manufacturer	Model #	Serial #	Tonnage (TR)	Suction Temp.	Comments
T1	TANK	-	NA	NA	4.5	24F	
T2	TANK	-	NA	NA	6	24F	6TD / 60,000GAL
EV1	EVAPORATOR	KRACK	NA	NA	5.6		DX
EV2	EVAPORATOR	EVAPCO	NA	NA	47.9		DX
EV3	EVAPORATOR	EVAPCO	NA	NA	47.9		DX
EV4	EVAPORATOR	KRACK	NA	NA	9.9		DX
EV5	EVAPORATOR	EVAPCO	NA	NA	9.9		DX
HX1	PLATE AND FRAME	ALPHA-LAVAL	NA	NA	251	26F	
HX2	PLATE AND FRAME	FES/APV	NA	NA	120		
HX3	TUBE-IN-TUBE	FELDMEIER	NA	NA	75		
TOTAL HIGH STAGE LOADS:					577.7		

Fuente: Preparado por SCS Engineers.

Para determinar si los compresores son capaces de manejar las cargas nominales de los evaporadores es necesario evaluar las TRs que ellos pueden procesar (Cuadro 2).

Cuadro 2: Ejemplo de Capacidad de Compresión

Machine ID#	Type	Model	Serial #	Tonnage	HP	Operating Temp	Comments
C1	Screw	RWB-II134	NA	271	300		
C2	Reciprocating	448B	NA	112.8	150		
C3	Screw	RWB-II134	NA	271	300		
C4	Screw	RWB-II100	NA	203	250		
TOTAL COMPRESSOR CAPACITY:				857.8			
TOTAL MOTOR HP:				1000			

Fuente: Preparado por SCS Engineers.



Comparando el Cuadro 1 y el Cuadro 2, se determina que los compresores son capaces de procesar todas las cargas de evaporación (Cuadro 3).

Cuadro 3: Cargas de Evaporación vs Capacidad de Compresión.

High Stage Loads	577.7 Tons
High Stage Compressor Capacity	857.8 Tons
Balance	280.1 Tons

Fuente: Preparado por SCS Engineers.

Se debe analizar la capacidad de condensación (Cuadro 4) y compararla con la de compresión del Cuadro 2. Adicionalmente, los condensadores deben poder disipar el calor de compresión infligido al refrigerante por los compresores (*Heat of Rejection*) (Cuadro 5).

Cuadro 4: Ejemplo Capacidad de Condensación

Condenser ID #	Description	Model #	Serial #	Discharge/TR @ 96F	Discharge/TR @ 68F	Sump Design	Comments
EC-1	EVAPCO	PMCB-XXXX	NA	709			
EC-2	EVAPCO	ATCE-XXXX	996205M-3M	180			
EC-3	BAC	VXMC-NXXX	NA	187.9			
TOTAL CONDENSER CAPACITY:				1076.9			

Fuente: Preparado por SCS Engineers.

Cuadro 5: Ejemplo de Balance de Energía en un Sistema de Refrigeración por Amoníaco.

High Stage Compressor Capacity	857.8 Tons
Heat of Rejection (HP X 2545)/12000	212.1 Tons
Total High Stage Load Capacity	1069.9 Tons
Condenser Capacity	1076.9 Tons
Balance	7.0 Tons

Fuente: Preparado por SCS Engineers.



Del Cuadro 5 se puede determinar que el sistema está balanceado. Esto significa que los compresores son capaces de procesar las TRs que provienen de los evaporadores y los condensadores pueden manejar las TRs de los compresores a carga completa.

Analizando el Cuadro 1 y el Cuadro 2, se podría decir que para procesar las cargas de evaporación no es necesaria la operación de uno de los compresores de 300 HP. Se asumirá que este es un compresor de respaldo para situaciones de alta demanda como por ejemplo enfriamiento de un cuarto, de la temperatura ambiente a una temperatura menor deseada, o una necesidad de mantenimiento, entre otras.

¿Quién Dejo la Puerta Abierta y Por Qué le Importa a Mantenimiento?

Esta pregunta se responderá a través de un ejemplo. Imaginemos un cuarto congelador que debe mantenerse a 0°F. Afuera del cuarto hay un área de carga que debe mantenerse a 40°F con 3 puertas que conectan el cuarto congelador con el área de carga para permitir el flujo del producto.

Si la abertura de cada puerta mide aproximadamente 8 ft x 12 ft; cada 30 minutos que una sola puerta se mantenga abierta puede representar aproximadamente 10 TR [1] de carga de calor adicional que deberá ser procesado por el sistema de refrigeración. Comparando esta información con el análisis que se hizo entre los Cuadros 1 y 2, se podría decir que este sólo hecho podría hacer necesario que el compresor de respaldo arranque.

Típicamente, un compresor de tornillo sin un variador de frecuencia (VFD) que esté cargado al 20% consumirá el 52 % de la potencia que consumiría si estuviese cargado al 100% [2]. Para los propósitos de este artículo se asumirá que la eficiencia es 1.

$$\text{Costo Adicional} = 300 \text{ HP} \times 0.745 \frac{\text{kW}}{\text{HP}} \times 52\% \times \text{Run Hours} \times \text{Energy Cost}$$

Una sola puerta que permanezca abierta por un mes puede llegar a representar:



$$\text{Costo Adicional} = 300 \text{ HP} \times 0.745 \frac{\text{kW}}{\text{HP}} \times 52\% \times 720 \text{ hours} \times 0.1 \frac{\$}{\text{kWh}}$$

$$\text{Costo Adicional} = \$8,379$$

Conseguir puertas de cuartos congeladores abiertas no es algo fuera de lo común, existen muchas circunstancias que frecuentemente toman prioridad antes de la ejecución de reparaciones de manera oportuna. Por nombrar algunas comunes:

- Cultura del operador.
- Cumplir con metas financieras mensuales.
- Dificultad en conseguir repuestos.
- Daños no reparables.

Es importante tomar en cuenta que este razonamiento se puede aplicar a prácticamente cualquier parte del sistema. Algunos ejemplos:

- Incrustaciones en los condensadores no permiten una transferencia de calor eficiente generando presiones de descargas más altas. Las superficies de intercambio de calor de los condensadores deben ser examinadas para verificar que no existan incrustaciones y que la distribución de agua cubriendo los serpentines sea eficiente. En el Libro 1 de Refrigeración Industrial de RETA (*RETA's Industrial Refrigeration Book 1*) se establece que incrustaciones de 1/32 in de espesor que estén cubriendo los serpentines de condensación pueden reducir su capacidad hasta un 30% [3]. La reducción en la capacidad del condensador generará mayores presiones de descarga y por ello los compresores requerirán mayor potencia (HP). Gases no condensables existentes en el sistema también pueden ocasionar mayores presiones de descarga, por esta razón también deben ser removidos. Estudios han mostrado que una reducción en la presión de descarga/condensación, por tanto, reducción de la temperatura de condensación puede producir ahorros de energía en compresores hasta de 1.5% por °F[4].



- Motores quemados y superficies de intercambio de calor sucias en evaporadores reducirán la eficiencia total del sistema. Frecuentemente la pérdida de eficiencia por estas razones es compensada disminuyendo la presión de succión en la sala de máquinas. Estudios han demostrado que incrementar la presión de succión, por ende la temperatura de succión, puede generar ahorros de energía en compresores de hasta 2% por °F [4].

En su mayoría, los fabricantes de compresores usan una presión de succión de 31.5 psig y una presión de descarga de 151 o 181 psig para establecer su índice de capacidad nominal. Para fines de nuestro ejemplo asumamos que tenemos un sistema que opera con una presión de succión de 30 psig (17 °F) y una presión de descarga de 184 psig (96°F). Si a través de la ejecución de mantenimiento de forma correcta y oportuna en los evaporadores y condensadores se logra incrementar la presión de succión a 31.5 psig (18 °F) y disminuir la presión de descarga a 181 psig (95 °F) esto, podría representar 3.5% de ahorro de energía en compresores.

Dicho mantenimiento involucra superficies de intercambio de calor limpias, motores/bombas operando correctamente, específicamente en los condensadores, tratamiento de aguas que prevengan/remuevan exceso de incrustaciones, boquillas de agua que estén limpias y provean la distribución de agua adecuada, etc.

Analizando el ejemplo anterior, donde 3 de 4 compresores operan normalmente, se podrían generar los siguientes ahorros mensuales:

$$\text{Ahorros} = 700 \text{ HP} \times 0.745 \frac{\text{kW}}{\text{HP}} \times 3.5\% \times \text{Run Hours} \times \text{Energy Cost}$$

$$\text{Ahorros} = 700 \text{ HP} \times 0.745 \frac{\text{kW}}{\text{HP}} \times 3.5\% \times 720 \text{ hours} \times 0.1 \frac{\$}{\text{kWh}}$$

$$\text{Ahorros} = \$1,314$$



En ocasiones, el efecto no se refleja directamente en el sistema de refrigeración sino en el producto. Lotes enteros de productos se pueden dañar, metas de producción pueden no ser alcanzadas, entre otros. A veces algo tan simple como dejar una puerta abierta puede desequilibrar el balance de energía y obligar a que el sistema de refrigeración se detenga.

Por medio del estudio de este sencillo ejemplo es evidente la importancia de entender con claridad el rendimiento de nuestro sistema de refrigeración y el balance de energía es una herramienta muy útil para ello. Las regulaciones de PSM exigen que las plantas tengan su balance de energía incluido en su programa de PSM. Como se ha expuesto aquí, existe valor tangible en entender en detalle la capacidad, operación y eficiencia de nuestro sistema lo cual puede traducirse anualmente en substanciales ahorros monetarios. Los ahorros podrían ser reinvertidos en las instalaciones. Esto también puede ser una herramienta para pedir fondos para necesidades de mantenimiento o para evitar el intento de ahorros financieros al posponer reparaciones oportunas. Calcular las consecuencias totales de operar un sistema de refrigeración desbalanceado es algo más complejo, pero existen grandes beneficios económicos por operar un sistema de refrigeración que esté balanceado energéticamente.



Referencias:

- [1] "IRC Infiltration Load Estimator," Distributable Version 10.121-3D (9/03/16), Industrial Refrigeration Consortium, University of Wisconsin-Madison, <http://www.irc.wisc.edu/>.
- [2] Cascade Energy, Inc. 2010. "Chapter 4. Best Practices for Equipment, Systems and Controls". *Industrial Refrigeration Best Practice Guide*. Third Edition. USA, pp 62.
- [3] RETA. 2010 "Chapter 9. Condensers and High Pressure Receivers". *Industrial refrigeration Book 1*. Revision 11/27/2010. USA. pp 9-22
- [4] Cascade Energy, Inc. 2010. "Chapter 4. Best Practices for Equipment, Systems and Controls". *Industrial Refrigeration Best Practice Guide*. Third Edition. USA, pp 49,52.

