

ANÁLISIS DE UN HEAT PIPE CON DIFERENTES FLUIDOS DE TRABAJO

Por Prof. Marcell Maldonado, yo3141562@hotmail.com

RESUMEN

En un artículo anterior se presentó el cálculo del coeficiente total de transferencia de calor U para un tubo de calor (*heat pipe*) utilizando el refrigerante H134a. En esta oportunidad se trabajaron comparativamente varios fluidos, y se realizaron los cálculos por dos vías diferentes, una teórica y una empírica. Relacionando ambos resultados se pudo evaluar la eficiencia del equipo con cada uno de los fluidos seleccionados. Además, se calculó el COP también por dos vías; en la primera se utilizó el calor disipado contra la energía consumida por el ventilador y en la segunda un COP basado en Carnot por temperaturas de referencia.

DESCRIPTORES

Columna de calor, calor transferido, eficiencia, coeficiente total de transferencia, refrigerantes, fluidos de trabajo

ABSTRACT

In a previous article it was presented calculation of total heat transfer U coefficient for a heat pipe using the coolant H134a. On this occasion several fluids were comparatively worked and performed calculations in two different ways, a theoretical and an empirical. Linking both results could assess the efficiency of the equipment with each selected fluids. Furthermore, the COP was calculated also in two ways; the first using the heat dissipated against the energy consumed by the fan and the second a COP Carnot-based reference temperatures.

KEYWORDS

Column of heat, heat transferred, efficiency, total coefficient of transference, refrigerants, fluid workflow

ANÁLISIS DE UN HEAT PIPE CON DIFERENTES FLUIDOS DE TRABAJO

INTRODUCCIÓN

En un artículo anterior se presentó el cálculo del coeficiente total de transferencia de calor U para un tubo de calor (*heat pipe*) utilizando el refrigerante H134a. En esta oportunidad se trabajaron comparativamente varios fluidos refrigerantes y se realizaron los cálculos por dos vías diferentes, una teórica y una empírica. Relacionando ambos resultados se pudo evaluar la eficiencia del equipo con cada uno de los fluidos seleccionados. Además, se calculó el COP también por dos vías; en la primera se utilizó el calor disipado contra la energía consumida por el ventilador y en la segunda un COP basado en Carnot por temperaturas de referencia. Ambas eficiencias determinadas por diferente método no coinciden lo que plantea la interrogante de por qué difieren los dos métodos.

Columna de calor

Consiste en un tubo cerrado por ambos extremos en cuyo interior hay un fluido a una presión adecuada para que se evapore y condense en un rango determinado de temperatura. Al aplicarle calor en un extremo se evapora el líquido de ese extremo y se desplaza al otro lado, ligeramente más frío, condensándose y transfiriéndole el calor. En informática se utiliza este tipo de dispositivos para disipar el calor que producen algunos componentes de hardware, como los microprocesadores, chipset, GPU o cualquier otro tipo de componente al cual se le desee aplicar refrigeración silenciosa. Tiene la ventaja que no emite ningún ruido, a diferencia de los ventiladores

Coeficiente de transporte térmico

Bird, Stewart, Lightfoot (1997) plantean la ley de Fourier que establece una proporción entre el calor por unidad de área y la diferencia entre temperaturas en una distancia. Para hacer esta proporción una igualdad se agrega una constante la cual depende de cada sustancia o mezcla de ellas. Esta constante depende las condiciones de estado, y es llamada coeficiente de transporte térmico. Usualmente es tomada de valores de tablas, datos empíricos, pero esta depende tanto de la temperatura como de otras consideraciones que dependen más del estado de la materia.

PROCEDIMIENTO

En una edición anterior (Maldonado, 2010) se trabajó con un solo fluido de trabajo, el H134a a diversas presiones con lo que se identificó que el fenómeno de *heat pipe* consta de varios factores: el primero de ellos es la presión interna la cual determina la fase en que se encuentra el equipo. Los experimentos realizados se enfocaron únicamente en la presión, lo que determino que la mayor transferencia de calor se da cuando el sistema se encuentra en estado líquido, cercano a punto burbuja. Esto se debe a que el calor latente de evaporación es mucho mayor que el calor sensible para todas las sustancias.

Dado que el calor sensible depende de cada sustancia, se estableció una nueva hipótesis de trabajo, la cual es la siguiente: *entre mayor sea la entalpía de vaporización del fluido utilizado, mayor será la transferencia de calor, obteniéndose con ello una mayor eficiencia de operación del equipo.* Para poder evaluar esto se realizaron una serie de pruebas de laboratorio en las cuales se utilizó el mismo equipo pero se cambió el fluido de trabajo.

Los fluidos de trabajo y sus condiciones de operación se resumen en la tabla siguiente. Como prueba final se utilizó aire como referente de enfriamiento por transferencia conductiva únicamente.

Tabla No.1. Fluidos de trabajo y condiciones de operación

Fluido de trabajo	Presión de operación [kPa]
H134a en fase líquida	810
Metanol	59
Agua	27
Isopropanol	41
Aire	74

Fuente propia

Para comprobar la hipótesis se calculó el calor transferido en cada uno de los casos, midiéndose las temperaturas entre cuatro distintos puntos del equipo para cada fluido. El primer punto, llamado base, mide la temperatura de la fuente de calor. El segundo punto, llamado placa, mide la temperatura por encima del colector. El tercer punto, llamado medio que se encuentra donde inicia el disipador, mide la temperatura del fluido antes del efecto *heat pipe*. Por último, el punto superior se encuentra donde termina el disipador, que mide la temperatura del fluido ya enfriado.

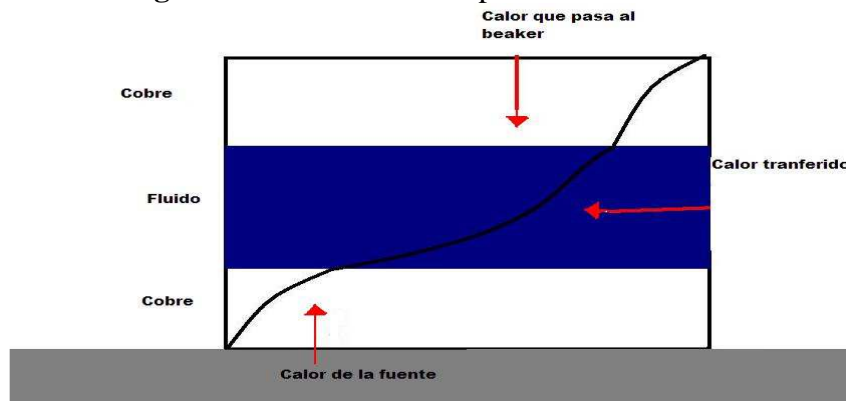
El equipo consta de tres partes:

1. La primera es una *platina de cobre perforada* la que llamaremos colector la cual analizamos como una resistencia térmica que consta de tres partes para su análisis. Primero, el material es cobre buen conductor térmico; en otras palabras es una mala resistencia. Segundo, en la parte interna consta de un líquido el cual se evapora; consta de dos características importantes en el análisis térmico: se encuentra debajo del punto de evaporación por lo que consume calor sensible para aumentar su temperatura, llegando al punto de burbuja donde se evapora utilizando calor latente el cual es mucho mayor que el sensible. Otro detalle que hay que tomar en cuenta es que entre más baja sea la presión mayor es la diferencia al punto crítico por tanto la entalpía de vaporización es mayor, pero en este punto hay que detenerse un poco mas ya que entre más baja sea la presión se dan dos problemas el primero de ellos es practico ya que llegar a las presiones es complicado si no se posee una bomba capaz de generar presiones bajas, el segundo es un juego entre la presión de vapor y la temperatura de burbuja, ya que una depende de la otra, en pocas palabras una presión baja es una tempera de burbuja bajo, pero si esta temperatura es más baja que la ambiental el equipo se encontrara permanente operando. Lo que reduce su utilidad, así que se debe

de utilizar una temperatura superior a la ambiental pero dentro de un rango útil, por esto se decide trabajar en un rango de unos $40^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$. Regresando al análisis del colector se asumen el siguiente sistema: primero una resistencia de cobre, luego la del fluido y por último otra de cobre. Pero en la del fluido se pierde calor en forma de fluido evaporado.

En esta sección se realiza una suposición, ya que existe un área en la cual no existe contacto con el fluido, lo cual produce una mayor dificultad para su cálculo, pero como el calor se trasfiere por gradientes de temperatura este se da en del cobre al fluido con lo que se obtiene una que el área del colector que es de 0.01 m^2 se trasfiere completamente a el área interna de los tubos que es de 0.011 m^2 .

Figura No. 1. Perfil de temperatura del colector



Fuente: propia

- La segunda parte a analizar son los *tubos de transporte* los cuales únicamente ejercen la función del transporte de fluido de un punto a otro, pero esta parte es difícil de delimitar ya que al no encontrarse aislado, toda la tubería se convierte en disipador que es la siguiente parte a analizar. Pero su análisis se basa que en el centro del tubo sube el vapor y por las paredes desciende el líquido, sin que exista un intercambio de calor. Por lo que únicamente se puede analizar que entre mayor sea el flujo de líquido menor es el diámetro para el gas lo que produce que tenga una velocidad mayor. Cuando se llega a estado estable se produce un equilibrio y ambas partes fluyen a la misma tasa, con el mismo flujo másico, pero hay que tomar en cuenta que usualmente se trabaja con diferencias de densidades de 300 a 1,000 veces.
- El *disipador*, como se mencionó en el párrafo anterior, consiste prácticamente en toda la tubería. El análisis es un poco complicado ya que al alcanzar el estado estable se llega a varios equilibrios: el primero ya mencionado es el de flujo másico del vapor y del líquido. El segundo es el de transferencia de calor el cual se explica a continuación.

Asúmanos que el equipo es un tubo vertical de diámetro uniforme sellado en el tope y en el fondo el ingresa el vapor y sale el líquido. Conforme sube el vapor este va condensando lo que produce un flujo másico a la fase líquida, mayor en algún punto en el medio por el contacto con la fase líquida ya que esta se hace cada vez más mas delgada con forme se sube por el tubo. En la parte baja la fase líquida su grosor es máximo y el área de contacto

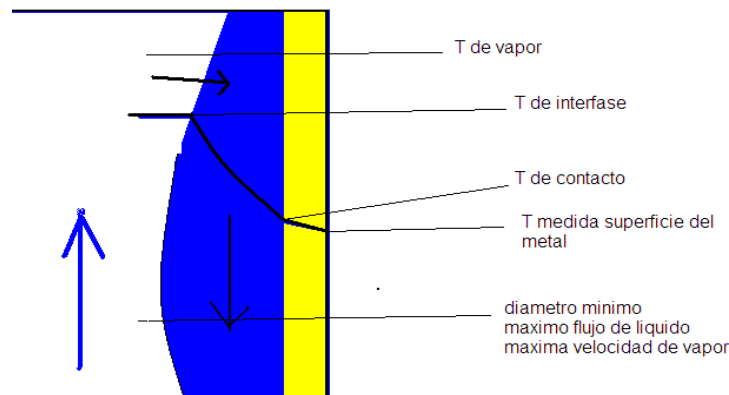
es mínima por lo que el flujo másico, la condensación es poca. En un punto que llamaremos medio la relación entre el vapor y el líquido produce un máximo de transferencia en el cual el vapor baja su densidad. La forma de medir esto es mediante dos datos el primero de ellos es la temperatura la cual se va de gradientes en el interior en el vapor es a la temperatura de la fuente luego desciende a temperatura de saturación en la interfase liquido vapor continua descendiendo hasta llegar a temperatura media en la siguiente interfase liquido pared y finalmente desciende un poco en la pared del tubo la cual es la que se puede medir. Las temperaturas intermedias no son importantes solo la teórica interna del vapor y la externa que es variable si se mide diferencialmente y conociendo el coeficiente total se puede conocer el grosor de la película. Otra forma de medir el diferencial es mediante la refracción del sonido ya que cada capa posee distinta velocidad del sonido se produce una refracción, un ligero cambio de ángulo de salida. Ambos casos no se realizaron ya que se trabajo de un punto inicial a uno final tomando las temperaturas al inicio del condensador y al final de este, siendo los datos de medio y superior.

El calor es una variable que no se puede medir fácilmente, así que se obtiene una medida del cambio de temperatura contra una masa conocida; con estos datos se aplica la ecuación de calor mediante la capacidad calorífica a presión constante, C_p . Este valor se calcula para un beaker lleno con 80 ml de agua y a contacto directo con la fuente de calor y otro igual en contacto con el equipo, se resta el valor obtenido de ambos beakers. Esta resta da una serie de datos que se linealizan utilizando tiempo vrs calor, y se obtiene una función del tipo $y=mx+b$, que al derivarse genera el flujo térmico en Watts. Este no es un valor directo sino únicamente para el área de los beakers. Se realiza la respectiva conversión y se obtiene el calor total trasferido.

$$Q = mC_p\Delta T \quad \text{Ec. 1}$$

Como lo que se busca es comparar varios fluidos de trabajo se realiza esto mediante dos medio. El primero con el diferencial de temperatura entre el punto bajo y la base, y el segundo el COP de calores. Ambos métodos quedaron mencionados en un artículo anterior (Maldonado, 2010). Los resultados obtenidos se muestran en la figura no. 2.

Figura No. 2. Perfil de temperaturas en la tubería y el condensador



Fuente: propia

RESULTADOS

La primera sustancia trabajada es el metanol líquido. El problema es que para poder utilizarlo como fluido de trabajo en el rango de 30 a 70 °C hay que disminuir bastante su presión hasta unos 20 kPa. Para ello se utilizó una bomba de vacío, la misma que se usó para vaciar la tubería para el H134a. El inconveniente es que su presión límite es de 60 kPa siendo un triple de la de operación, lo cual afecta al momento de operar el equipo, ya que solamente se obtiene un gradiente de temperatura de 11 °K.

Las pruebas se realizaron con 4 variables independientes: dos presiones 65 y 60 kPa y dos condiciones de convección externa natural y forzada, equivalentes al uso o no de un ventilador. Se realizó un filtro de los resultados para estandarizarlos, utilizando aquellos en el rango más cercano a la presión de operación. Además, se tomaron en cuenta solamente los datos de estado estable y con ventilador operando.

Los datos obtenidos fueron la temperatura medida directamente de la fuente y del otro lado del colector, la temperatura se mide en °C cada 10 segundos por 100 muestras, a esta elevada cantidad de medidas se les realiza un promedio y luego una varianza con lo que se obtiene un dato por corrida, para el metanol con ventilador a 60 kPa se obtienen 11.293 °K con una varianza de 0.068°K como valor máximo, con el H134a se obtiene con ventilador el máximo obtenido es de 36.010 °K, con una varianza de 4.073°K. Es obvio que este valor es mucho mayor ya que ya se encuentra operando a condiciones menos estables.

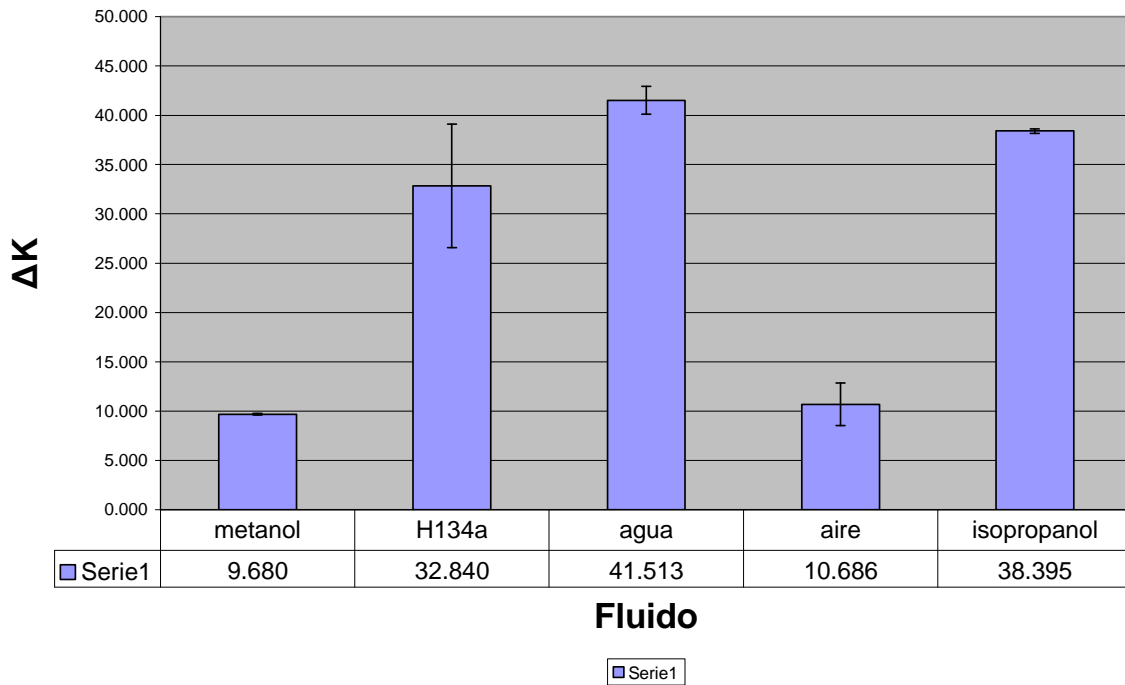
El siguiente sustancia fue el agua a 27 kPa con 40.979 °K con varianza de 1.181°K. Luego el Isopropanol a 40 kPa 38.863 °K con varianza de 0.198 °K finalmente el aire con el cual se comprueba que fuera de la zona de operación el gradiente obtenido es mínimo obteniendo 10.070 °K con una varianza de 1.202 °K. Como se realizaron varias corridas se obtuvo un promedio de promedios y de varianzas que se muestran en la figura no. 3.

ANÁLISIS DE RESULTADOS

La figura no. 4 nos muestra los COP de cada uno de los fluidos utilizados. En este caso se busca que sea lo más alto posible bajo el concepto de COP el cual cada uno el que nos indica cada unidad de energía suministrada al sistema proporciona tal cantidad de refrigeración.

Figura No. 3. Gradientes de temperatura

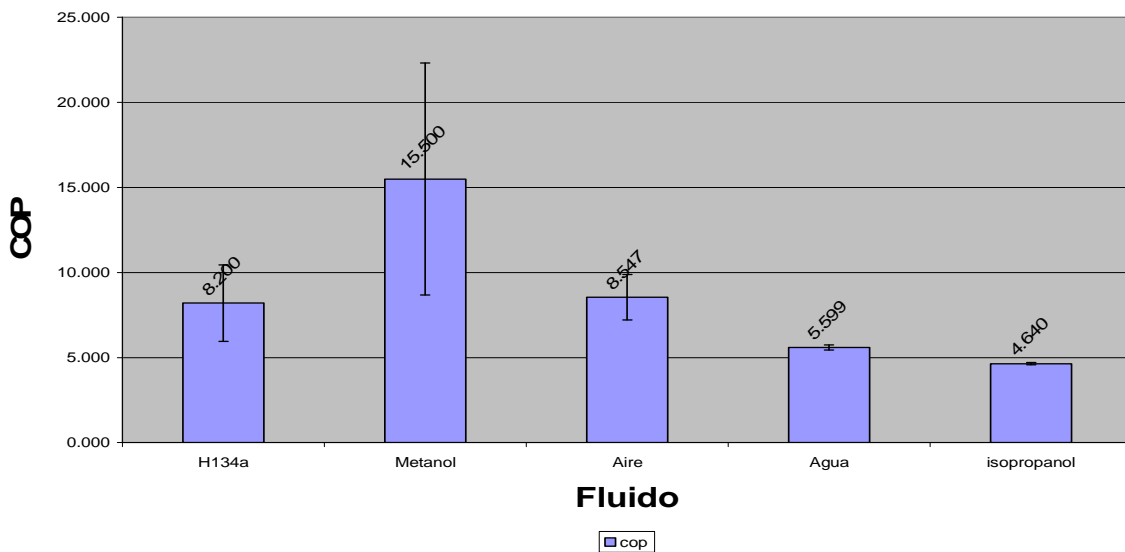
Gradiente de Temperatura



Fuente: propia

Figura No. 4. COP promedio para cada fluido utilizado en el experimento

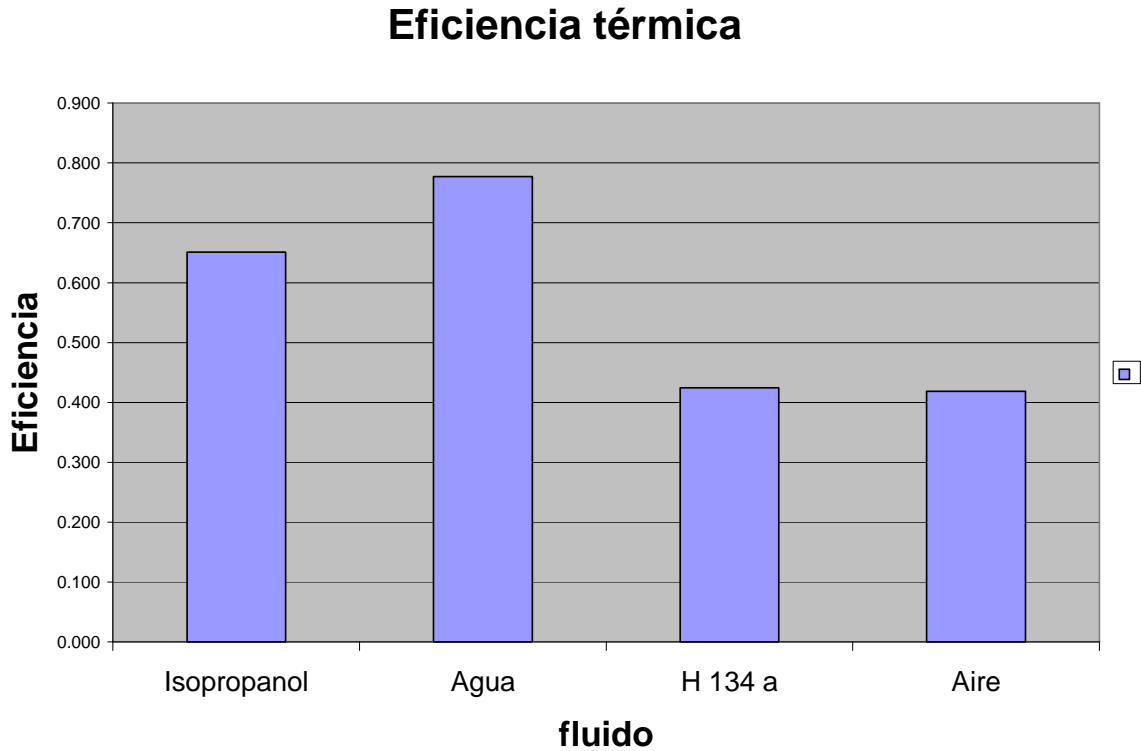
cop



Fuente propia

Traslada la información a términos de eficiencia se expresan los resultados obtenidos en la siguiente gráfica.

Figura No. 5. Eficiencia térmica de los fluidos de trabajo



Fuente propia

Pero un mejor dato es el calor trasferido para cada uno de los fluidos el cual se presenta la siguiente tabla.

Tabla No. 2. Calores transferidos para cada fluido de trabajo

Fluido de trabajo	Calor trasferido W	Potencia consumida	COP práctico	COP teórico	Eficiencia
Isopropanol	10.461	3.6	2.906	4.462	0.651
Agua	15.25	3.6	4.236	5.45	0.777
H134a	12.985	3.6	3.607	8.497	0.424
Aire	11.733	3.6	3.259	7.783	0.419

Fuente propia

Ya que la mayor cantidad de calor trasferido es con el agua, 15.250 W, lo cual da una eficiencia basada en COP practico y teórico de 77.7%

Desde el aspecto técnico se determina que el fluido de trabajo más eficiente es el agua, pero para obtener un estudio completo se agrega un análisis de los costos.

En primer lugar se calculan los costos de comprar los fluidos. Para ello se estandarizaron los costos y las masas. Se calculó la cantidad de masa cargada. Luego en base a los costos de compra y cotizaciones se establecieron los costos por gramo. Este valor lleva a obtener el costo del fluido. El siguiente paso es el costo de la carga del fluido y este depende del método. En el caso de agua e isopropanol se utilizó una estufa eléctrica de 1 kW durante 2 horas en base a la tarifa eléctrica de 1.6 Q/kWh. Para el H134a se utilizó hielo seco el cual tiene un costo de Q55 por kilogramo.

Tabla No. 3. Costos de adquisición de los fluidos de trabajo

	Masa en gramos	Costo del fluido Q/grs	Costo del fluido Q	Costo de carga Q	Costo total Q
Isopropanol	57.9	0.0424	2.46	3.2	5.66
Agua	56.4	0.0008	0.05	3.2	3.25
H 134 a	110.0	0.1050	11.55	55	66.55

Fuente propia en base a cotizaciones

Con lo que se concluye una vez más que el agua es la mejor opción es la de menor costo. Finalmente se comparan los fluidos utilizados con una sumatoria ponderada para los riesgos y toxicidades de cada uno de ellos.

Tabla No.4. Riesgos de operación de los fluidos de trabajo

	Inflamabilidad	inhalación	piel	ojo	ingestión	medio ambiente	riesgo total
Isopropanol	5	3	2	3	3	3	19
Agua	0	2	0	0	0	0	2
H 134 a	0	2	1	2	3	2	10

Fuente: Wikipedia, 2010

Bajo la siguiente clave

Tabla No. 5. Valoración de riesgo

Valor	Riesgo de inflamabilidad	Toxicidad
5	muy alto	letal
4	Alto	muy toxico
3	Moderado	toxico
2	Bajo	irritación
1	muy bajo	irritación menor
0	Nulo	Ninguno

Fuente: Wikipedia, 2010

Y nuevamente el agua es la mejor opción en este caso la selección es obvia ya que el agua es considerada el fluido vital.

CONCLUSIONES

El mejor fluido de trabajo es el agua. Esto debido a que es la sustancia que proporciona el mayor gradiente de temperatura 41.513 ± 1.421 K, la mayor eficiencia 77% basada en COP Carnot y COP practico. Es el fluido de menor costo con un total de Q 3.25 y un riesgo mínimo. Su eficiencia se base especialmente en que es el fluido que comparativamente posee el mayor calor latente de evaporación.

RECOMENDACIONES

- Aun hace falta determinar una ecuación semiempírica para el coeficiente interno.
- Analizar el funcionamiento a distintos diámetros, inclinación y distintos empaques internos.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue realizado en las instalaciones del TEC Landívar y contó con el apoyo técnico de TI Arturo Espinosa encargado del laboratorio de Metal Mecánica, TI Verlin Claudio encargado de mantenimiento, Ing. Jorge Mario Rodas encargado del Laboratorio de Refrigeración y Aire Acondicionado, Ing. Salvador Tuna encargado del Laboratorio de Ciencias Básicas e Ing. Federico Salazar encargado de investigación de la Facultad de Ingeniería. Además al apoyo financiero del Ing. José Arturo Ruano director de la Carrera de Ingeniería Mecánica.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BROOKE, TOM (2007). *Neural Air Units with Heat Pipes in Chilled Water Systems*. Heat Pipe Technology, Inc. Consultado en:

http://www.heatpipe.com/mktg_materials/News_Letters/Neutral%20Air%20Units%20with%20Heat%20Pipes%20in%20Chilled%20Water%20Systems.pdf

ENERTRON (2006). *Heat Pipe Selection*. Consultado en: <http://www.enertron-inc.com/enertron-products/heat-pipe-selection.php>

HEAT PIPE TECHNOLOGY, INC (2010). *Heat Pipe Structure*. Consultado en Internet el 06-10-2009 en: <http://www.heatpipe.com/heatpipes.htm>

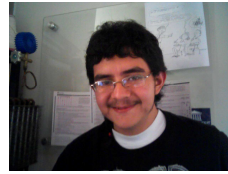
KERN, DONALD Q. (1999). *Procesos de transferencia de calor*. (Trad. N Ambrossi) Mexico. Mcgraw-Hill. Inc. (original publicado en 1965)

MALDONADO, MARCELL (2010) *Análisis de un Heat Pipe cargado con H134A a tres distintas presiones operando en el rango 30-70°C*. consultado en Internet el 4/10/2010 http://www.tec.url.edu.gt/boletin/URL_18_MEC01_HEAT.pdf

MCCABE, W.L., SMITH, C.S., HARRIOTT, P.
(1991). *Operaciones unitarias en Ingeniería Química*.
(Trad. Formento, E.G.). España, McGraw-
Hill/Inteamericana de España, S.A. (original en 1985)

WIKIPEDIA (2010). *Heat pipe*. Consultado el 06-
10-2009 en: http://en.wikipedia.org/wiki/Heat_pipe

WIKIPEDIA (2010). *Propiedades de sustancias*.
Consultado el 06-10-2009 en: <http://en.wikipedia.org/>

MARCELL MALDONADO

Estudiante del
decimo semestre de
la Carrera de Inge-
nería Química de la
Facultad de Ingenie-
ría de la Universidad
Rafael Landívar.

Pertenece al Club de Ciencias de esta
universidad, y es aficionado a la
astronomía.