



UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO

División de Ciencias e Ingeniería

Diseño, construcción y caracterización de un recuperador de energía tipo tubos de calor.

Tesis

para obtener el grado de

Ingeniero en Sistemas de Energía.

PRESENTA

Jesús Miguel Gallegos Rodríguez.

Director de Tesis

Dr. Fernando Enrique Flores Murrieta.

Asesores

Dr. José Hernández Rodríguez.

Dr. Omar Yam Gamboa.

Chetumal, Quintana Roo, México, Noviembre de 2012.



UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO

División de Ciencias e Ingeniería

Trabajo de Tesis elaborado bajo supervisión del Comité de Asesoría y aprobada como requisito parcial para obtener el grado de:

Ingeniero en Sistemas de Energía.

Comité de Tesis

Director: Dr. Fernando Enrique Flores Murrieta.

Asesor: Dr. José Hernández Rodríguez.

Asesor: Dr. Omar Yam Gamboa.

Chetumal, Quintana Roo, México, Noviembre de 2012

AGRADECIMIENTOS.

Ofrezco mis más sinceros agradecimientos a mi familia gracias a ellos que creyeron en mí y me apoyaron durante todos mis estudios.

A mi padre: Jesús Gallegos Díaz por su ejemplo, tenacidad, sacrificio y cariño que nos ha brindado siempre.

A mi madre: María del Rocío Rodríguez Stivalet por su amor, cuidado, consejo y sobre todo por haber creído siempre en mí dándome todo el apoyo que necesité para estudiar ésta carrera.

A mi abuela María del Pilar Stivalet por su amor que ha sido siempre incondicional, por todo el cariño que siempre me demostró y sobre todo por el apoyo en momentos muy difíciles para hacerme posible llegar hasta esta instancia en mi vida académica.

A mi abuelo Miguel Rodríguez Sánchez por haberme inspirado a cursar una ingeniería y por su apoyo en los momentos más difíciles y sobre todo por su cariño y consejo.

A todos mis maestros que durante esta carrera me demostraron que es posible llegar a donde uno quiera mientras haya dedicación, esfuerzo y sobre todo ganas de salir adelante.

Deseo expresar también un especial agradecimiento a mi director de Tesis el Dr. Fernando Enrique Flores Murrieta al cual considero como mi mentor ya que todo lo que me ha enseñado me ha sido de gran utilidad, también por su ejemplo, su apoyo incondicional y la fuerza que me dio en momentos de gran angustia.

A mi tutor: El Dr. José Hernández Rodríguez por apoyarme en la forma en que estudie la carrera además de brindarme siempre su ayuda cuando me encontraba lejos para poder inscribirme y seguir con mis estudios.

Al ingeniero Set Castillo por la actitud que demostró siempre para hacer posibles mis proyectos académicos y personales.

¡GRACIAS A TODOS!

RESUMEN.

En la actualidad la energía es fundamental para el desarrollo de las actividades humanas ya que es indispensable para hacer funcionar la mayoría de las cosas que nos hacen sentir modernos y civilizados es por eso que no se puede menospreciar la importancia de este recurso natural que en la mayoría de las ocasiones no es renovable.

La energía en sí misma no es un producto para el consumo final sino un recurso intermedio para satisfacer otras necesidades en la producción de bienes y servicios. Al ser un recurso escaso genera conflictos entre las naciones por su control.

Es aquí donde cobra especial importancia la utilización de nuevas tecnologías que permitan hacer un uso más eficiente de la energía con la que contamos, sobre todo donde se puede recuperar esta energía de un proceso para aprovecharse en otro, para que esto pueda ser posible se necesita un dispositivo que sea capaz de transferirla de un proceso a otro, a este dispositivo se le denomina recuperador de energía.

Ya que la climatización como necesidad de confort para el ser humano utiliza una gran cantidad de energía es necesario hacer más eficiente el funcionamiento de estos sistemas, para lograr este objetivo se deben reducir las pérdidas al mínimo.

Una forma eficiente de reducir estas pérdidas es mediante un recuperador de energía.

En este trabajo se realizó el diseño, construcción y caracterización de un recuperador de energía, que nos permita hacer una recuperación eficiente además de evitar el contacto entre los fluidos de trabajo, es por esto que se escogió la tecnología de tubos de calor.

Las mediciones tomadas en condiciones reales en las diferentes variables de temperatura y humedad de la estación experimental permitieron hacer un análisis de eficacia en la recuperación de energía, para definir la conveniencia de esta tecnología en una aplicación comercial.

INDICE GENERAL

	<i>Página</i>
NOMENCLATURA	6
Capítulo I Antecedentes.	10
1.1- Tecnología de Tubos de Calor.	10
1.2- Hipótesis.	10
1.3- Objetivos.	11
1.4- Justificación.	11
1.5- Metas.	12
1.6- Panorama energético nacional.	12
1.7- Porcentajes de consumo promedio del Hogar.	14
Capítulo II Recuperadores de Calor.	16
2.1- La energía en la edificación.	16
2.2- Recuperadores de energía.	18
2.3- Aplicaciones de recuperadores de energía basados en tubos de calor.	26
Capítulo III Tubos de Calor.	28
3.1-Tecnología de los Tubos de Calor.	28
3.2-Generalidades y funcionamiento de los tubos de calor.	28
3.3- Aspectos constructivos y de funcionamiento.	30
3.4- Propiedades y características de los tubos de calor.	31
3.5- Sistemas de tubos de calor.	32
3.6- Aplicaciones de los tubos de calor	35
3.7- Intercambiadores de calor	37
Capítulo IV.	
Diseño y construcción de un recuperador de energía tipo TC.	43
4.1- Diseño y construcción del banco de tubos de tubos de calor	44
4.2- Distribución de los tubos de calor	45
4.3- Cálculo del coeficiente de convección.	48
4.4- Construcción del banco de tubos de calor	51
4.5- Construcción de la cámara climática	53

4.6- Implantación del recuperador de energía en la instalación experimental.	54
4.7- Instrumentación de la instalación y monitoreo de variables	61
Capitulo V Experimentación y Análisis de Resultados.	64
5.1- Variables de estudio para la experimentación.	64
5.2- Condiciones experimentales.	65
5.3- Obtención de datos experimentales.	65
5.4. Resultados de Potencia (W).	66
5.5. Resultados de Energía (KWh).	67
5.6. Resultados de Eficiencia (%).	68
Conclusiones.	70
Bibliografía.	71

NOMENCLATURA

TC	Tubos de Calor
Q	Calor
P	Pitch (distancia entre centros de los TC)
Do	Separación exterior del tubo
D	Diámetro del Tubo
Sl	Distancia longitudinal entre tubos
St	Distancia Transversal ente tubos
Re	Número de Reynolds
V	Velocidad de Flujo
m/s	Metros por segundo
Dm	Diámetro transversal
D	Diámetro Equivalente
Pr	Número de Prandtl
C	Constante de correlación de distancia entre tubos (Tabla 4.1)
N	Constante de correlación de distancia entre tubos (Tabla 4.1)
mm	Milímetros
m³/h	Metros cúbicos por hora
m²	Metros cuadrados
Cp	Calor específico
T	Temperatura
K	Conductividad Térmica
Hm	Coeficiente de convección medio exterior.
A	Amperes
Vrms	Volts medición Real
Hz	Hertz
kWh	Kilowatt-Hora
W	Watts

INTRODUCCIÓN.

En un momento en que el ahorro de energía es fundamental para el equilibrio medio ambiental y para la competitividad en el sector industrial y comercial, la importancia de la recuperación de energía se multiplica. Asimismo, en virtud de que los equipos de acondicionamiento de aire generalmente constituyen el principal consumidor de energía en las edificaciones que cuentan con ellos, su uso racional y la implementación de nuevas tecnologías son de gran beneficio para el usuario y para el ambiente (Flores, 2008).

Es por eso que la implementación de dispositivos de recuperación de energía en este tipo de equipos se hace indispensable hoy en día.

La recuperación de energía presenta como principales ventajas las siguientes:

1. Reducción del consumo de energía en las instalaciones de climatización, reduciendo el impacto medioambiental y los gastos de explotación.
2. Reducir el tamaño de los equipos de generación de calor y frío, al reducir la necesidad de energía.
3. Menor cantidad de fluidos refrigerantes que pueden tener efectos medioambientales sobre la capa de ozono o provocar el efecto invernadero.

Un recuperador de energía es un dispositivo que permite reutilizar la energía residual de un proceso para maximizar la eficiencia de la instalación. Ésta energía es normalmente desechada a través de un fluido gaseoso o líquido directamente al ambiente circundante. El sistema más económico y eficaz será el que permita emplear directamente el fluido que la contiene en el mismo u otro proceso, pero este hecho raramente se da en las aplicaciones prácticas, por lo que hay que pensar en un equipo que permita intercambiar energía entre los fluidos involucrados en el proceso sin que exista un contacto directo entre ellos.

Es aquí donde la tecnología de tubos de calor, utilizada tanto para el transporte de energía como para otras aplicaciones como son disipación de calor residual toma una gran importancia ya que estos dispositivos permiten hacer un intercambio eficiente de calor sin poner en contacto los fluidos de trabajo.

Mediante el uso de los tubos de calor que se pretende construir el recuperador de energía que nos permita enfriar el aire de entrada al sistema de enfriamiento de tal manera que se reduzca la diferencia de temperatura entre el aire de entrada y las condiciones de confort que se está buscando. Para que el equipo de acondicionamiento de aire trabaje menos y esto se vea reflejado en un ahorro en la energía necesaria para la climatización.

Así para cumplir con los objetivos planteados, el siguiente trabajo de tesis se ha dividido de la siguiente forma:

Capítulo I Antecedentes.

En este capítulo se presenta un panorama energético nacional y mundial que resalta la importancia del uso de nuevas tecnologías que permitan hacer más eficientes los procesos que ocupan grandes cantidades de energía como lo es la climatización de interiores.

Capítulo II Recuperadores de calor:

Reseña de los diferentes tipos de recuperadores de calor utilizados comercialmente cuenta también con la explicación de cómo funciona cada uno de estos tipos de recuperador de calor, sus eficiencias aproximadas y la necesidad comercial o industrial que satisfacen, además de casos de éxito en la implementación de recuperadores tipo TC.

Capítulo III Tecnología de los Tubos de Calor.

En éste capítulo se encuentra toda la información referente a ésta tecnología, desde su historia, desarrollo, formas constructivas, implementación practica, los diferentes tipos que existen y también se explica detalladamente su funcionamiento interno.

Capítulo IV Diseño y construcción de un recuperador de energía tipo tubos de calor.

Aquí se detalla detenidamente el proceso de diseño y construcción del recuperador de energía que consta de un banco de tubos de calor, los materiales utilizados, las dimensiones y se hace referencia a la estación experimental donde se realizaran los experimentos para definir la eficacia en la recuperación de energía.

Capítulo V Resultados y Análisis.

Éste capítulo explica cómo se realizaron los experimentos, qué variables se tomaron en cuenta para las mediciones, el equipo utilizado para realizarlas, el proceso de análisis de datos, los resultados de las mediciones, los resultados de las pruebas realizadas al recuperador y el cálculo para obtener la eficacia total de recuperación de energía.

Conclusiones.

Contiene las conclusiones a las cuales se llegó tras el análisis de datos también se incluyen recomendaciones para los próximos trabajos de investigación referentes a ésta tecnología.

CAPITULO I ANTECEDENTES.

1.1. TECNOLOGIA DE TUBOS DE CALOR

Los primeros trabajos en el campo de la climatización que implementaron tubos de calor, fueron desarrollados por la NASA en 1969, en donde la función de los tubos era regular la temperatura interior de las naves espaciales. Asimismo, muchos de los estudios se enfocaron en el empleo de diversas fuentes de bajo nivel térmico para refrigeración y bombas de calor con el objeto de lograr el incremento del COP (Coeficiente de Operación), considerando la compacidad y menor costo (Mostofizadeh 1977). Khanh Dinh(1984) construyó una máquina portátil deshumidificadora de aire ambiente para naves espaciales. Dicho trabajo fue reconocido por la NASA y consistía de dos bancos de tubos de calor para enfriar y deshumidificar el aire ambiente (NASA 1986). Posteriormente, en el mismo campo de la climatización, Prieto (1994) diseñó y construyó un sistema de recuperación de energía mediante tubos de calor y Velasco (1998) desarrolló el estudio energético del mismo. En años recientes Herrero (2006) desarrolló un sistema combinado de recuperación de energía con tubos de calor y tubos cerámicos para lograr un proceso de enfriamiento evaporativo de acondicionamiento de aire. Asimismo, Flores (2008), también desarrolló un sistema similar, pero con ladrillos cerámicos huecos.

Por otro lado, hablando específicamente de instalaciones de aire acondicionado localizadas en *regiones tropicales*, existen estudios en donde se resalta la importancia de los bancos de tubos de calor para la recuperación de energía (FEES 1991) (Mike, 1993) (Milton, 1997), en donde el aire de entrada a una temperatura ambiente elevada puede ser pre-enfriado por una corriente de aire frío de escape antes de su entrada al equipo de enfriamiento (Ong y Alahi 2003). Así también, según Khanh Dinh (Heat Pipe Technology) las aplicaciones de tubos de calor en sistemas de climatización para zonas tropicales permiten bajar los niveles de humedad, manteniendo el confort térmico interior y logrando ahorros sustanciales de energía en diferentes tipos de edificaciones en Florida, U. S.

Por lo anterior, se puede mencionar que el empleo de los tubos de calor ofrece excelentes oportunidades de estudio con el fin de mejorar los desempeños de los equipos de intercambio térmico y coadyuvar a reducir el consumo energético, dado que por sus características de operación, implica el uso de la transferencia de calor con cambio de fase en un espacio muy reducido, sin requerir energía adicional de suministro al sistema, excepto para los ventiladores que impulsan las corrientes de aire (Paris, 2007). En ese sentido y dada la problemática de derroche energético que se da en las regiones cálidas y húmedas, como lo es el Estado de Quintana Roo, es importante desarrollar una propuesta que permita vislumbrar la posibilidad de amortiguar el consumo energético en las instalaciones, prioritariamente en la industria hotelera y en el sector comercial.

1.2. Hipótesis.

Un recuperador de energía tipo de tubos de calor permite recuperar al menos el 10% de la energía requerida para la climatización de la instalación experimental.

1.3. Objetivos.

Objetivo General:

Diseñar, construir y caracterizar un recuperador de energía tipo tubos de calor implementado en una instalación de climatización.

Objetivos específicos:

1. Diseño de un recuperador de energía tipo TC.
2. Construcción del recuperador de energía tipo TC.
3. Implantación del recuperador de energía en una instalación de climatización.
4. Instrumentación y calibración en la instalación.
5. Diseño experimental y monitoreo de variables que permitirán caracterizar al sistema.
6. Análisis de resultados y validación del sistema.

1.4. Justificación.

La energía es un elemento de suma importancia en el desarrollo social, tanto en la provisión y prestación de bienes y servicios como en su faceta de factor de producción y de utilización general, que puede representar una de las claves de la competitividad de muchos sectores económicos.

El aumento del consumo de energía, derivado del crecimiento económico y de la tendencia a satisfacer un mayor número de necesidades, hace cada vez más urgente la integración de aspectos medioambientales y de desarrollo sostenible en la política energética.

El desarrollo de recuperadores de energía tiene una vasta área de aplicación ya que el sector de acondicionamiento de aire es muy grande y está en constante crecimiento, siendo este rubro el más representativo en el consumo energético de las edificaciones en general.

Beneficios del trabajo de Tesis

- Un recuperador de energía tiene gran utilidad práctica ya que permite aumentar la eficiencia de los sistemas de acondicionamiento de aire y con esto reducir la cantidad de energía necesaria para su operación lo cual se traduce en un beneficio económico directo.
- Desde el punto de vista teórico este estudio pretende conocer de manera más confiable el comportamiento del recuperador de energía en condiciones reales de operación para conocer la eficacia y alcance de esta tecnología.

1.5. Metas.

1. Determinar la efectividad del recuperador de energía al implementarlo en una instalación de climatización.
2. Mejor control de la temperatura del aire de impulsión.
3. Determinar la energía recuperada
4. Amortiguar oscilaciones de la temperatura del aire de impulsión.

1.6. Panorama energético nacional.

1.6.1 Generación de Energía Eléctrica.

La energía eléctrica que usamos cotidianamente, no se encuentra directamente en la naturaleza, lo más común es generarla a partir de un trabajo mecánico, este trabajo mecánico se obtiene de alguna fuente de energía que puede ser una caída de agua como en las grandes hidroeléctricas, una corriente de aire que se aprovecha utilizando turbinas eólicas o una fuente de calor como es el caso de la geotérmica, nucleoelectrica, combustión interna, ciclo combinado, carboeléctrica y turbogas.

En el caso de las últimas cuatro siempre es necesario quemar algún tipo de combustible ya sea petróleo, gas natural o carbón, lo cual necesariamente genera un impacto negativo al ambiente ya que los combustibles fósiles producen contaminación desde su extracción hasta su combustión, además de que son un recurso no renovable que aumenta constantemente su precio en el mercado global, incentivando conflictos bélicos debido a la dependencia que el uso de estos combustibles genera a las economías industrializadas.

Esta dependencia se observa de manera muy clara en la Figura 1.1.

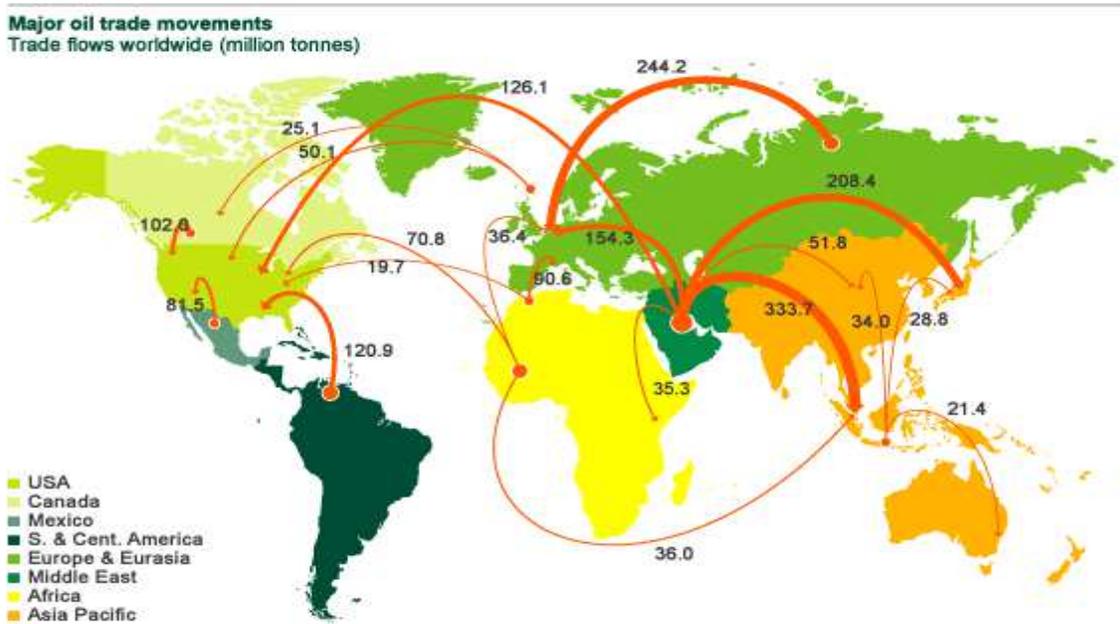


Figura 1.1 Mapa que muestra el flujo del petróleo en el mundo desde los lugares de extracción hasta el lugar donde se consume. (British Petroleum Co, 2008).

La Tabla 1.1 muestra los datos del origen de la energía eléctrica en México durante el 2010 procedentes de la página del Sistema de Información Energética, perteneciente a la Secretaría de Energía.

Tabla 1.1 Producción de energía eléctrica en megawatts-hora por tecnología durante el 2010.

Descripción	REALES-ANUAL	
	MWh	I/2010
Total		222,746,785.116
Termoeléctrica		75,248,804.747
Vapor		37,473,611.191
Ciclo combinado		105,145,168.286
Servicio Público		33,559,190.819
PIE		71,585,977.467
Turbogas		3,069,076.127
Combustión interna		1,146,926.610
Dual		14,126,185.204
Carboeléctrica		15,276,150.173
Geotermoeléctrica		6,041,008.725
Nucleoeléctrica		5,648,957.831
Eólica		146,617.930
Hidroeléctrica		34,673,083.039

Fuente: Sistema de Información Energética
con información de CFE, incluye Extinta LyFC

Cómo se aprecia en la Figura 1.2, en México los combustibles fósiles dominan la escena de la generación de energía eléctrica.

En la Tabla 1.2 se observa el consumo energético de cada sector en particular.

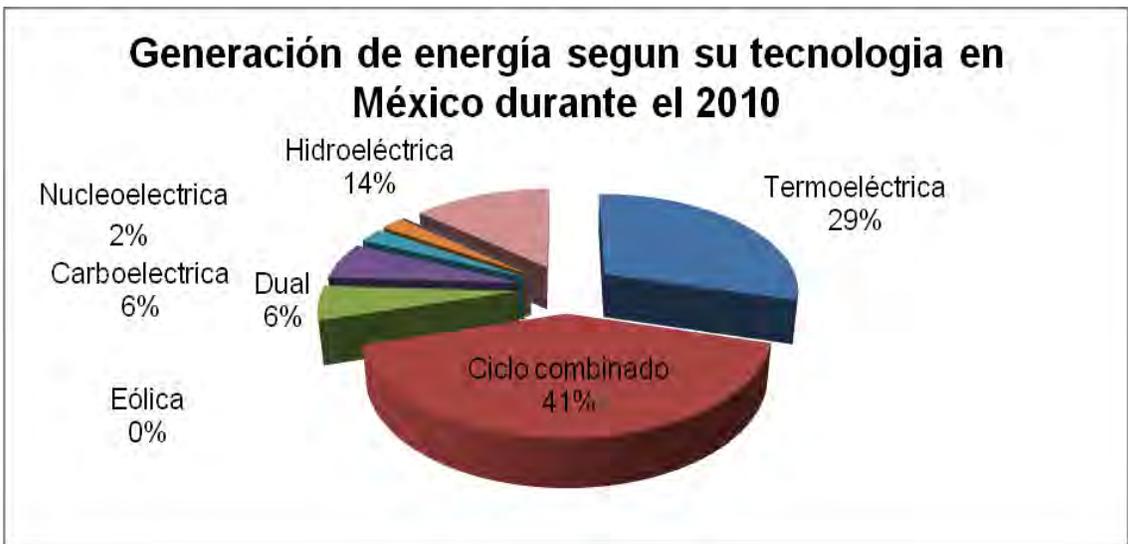


Figura 1.2 Muestra la distribución de la generación de energía eléctrica en México durante el 2010 según la tecnología utilizada. (SIE-SENER 2010).

En la Figura 1.3. Muestra que es la industria, la mayor consumidora de energía eléctrica con el 56% de la producción total por lo que los ahorros más importantes de energía se pueden lograr en la industria.

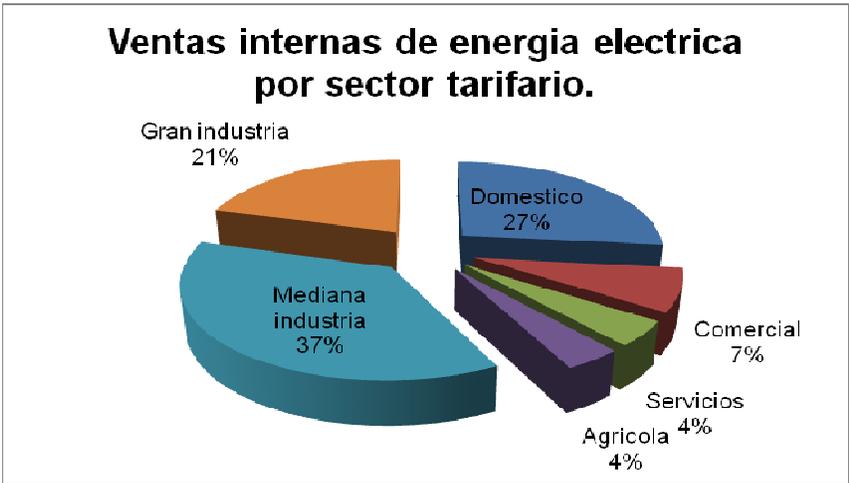


Figura 1.3 Ventas internas de energía eléctrica por sector tarifario durante el 2010 (SIE-SENER 2010).

1.7. Porcentajes de consumo promedio del Hogar

Es importante saber, qué parte del consumo eléctrico del hogar representa el aire acondicionado para poder dimensionar el impacto que tendría la recuperación de la energía en el ahorro que va a percibir el usuario final, en México se dan dos casos, por una parte los hogares que necesitan de climatización debido a su situación geográfica y por otra parte los hogares que sólo cuentan con refrigerador.

Como se aprecia en la Figura 1.4 el acondicionamiento del aire representa casi la mitad del consumo global de energía en el hogar.

Porcentajes de consumo eléctrico en un hogar promedio de México que cuente con climatización

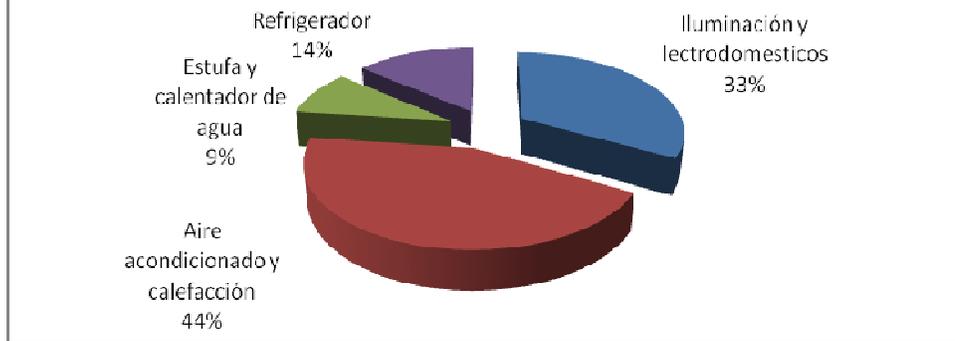


Figura 1.4. Porcentajes de consumo eléctrico en un hogar promedio que cuente con climatización [Página de la Comisión Nacional para el uso eficiente de la energía dirección]. www.conae.gob.mx/eventos/Queespaciosyaparatos.html

Por lo anterior, las opciones para usar la energía de forma sostenible, consideran:

- Uso más eficiente de la energía, especialmente en el punto de utilización final.
- Mayor utilización en las fuentes de energía renovable.
- Desarrollo de nuevas tecnologías energéticas de un menor impacto ambiental.

Capítulo II Recuperadores de calor.

2.1. La energía en la edificación.

Cuando en los años 70's ocurre la denominada "crisis del petróleo", los precios de los combustibles suben y es entonces cuando se comienza a tomar conciencia de la necesidad de racionalizar la energía y a considerar el uso de otras energías limpias o renovables. Asimismo, la climatización ha tenido una influencia significativa en nuestros hogares y en nuestras ciudades. El estado actual y las tendencias futuras de la climatización se muestran en la Figura 2.1

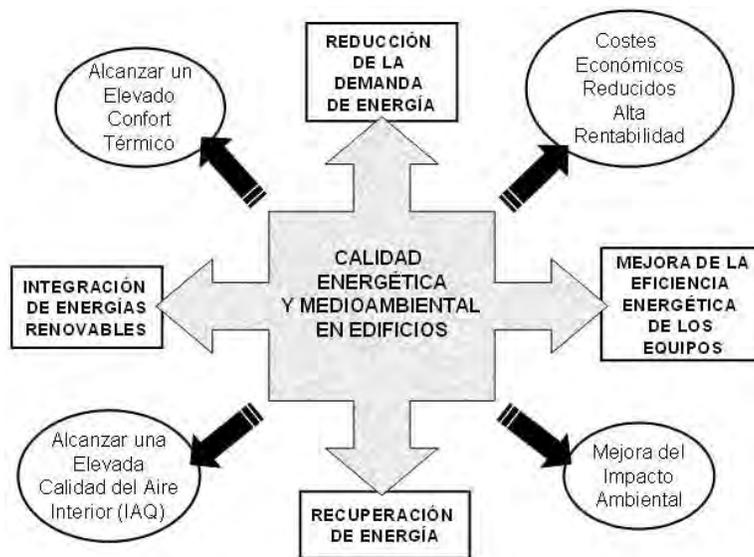


Figura 2.1 Estado actual de los sistemas de climatización (Rey-Velasco, 2006).

Los sistemas de climatización con mayores eficiencias requerirán menos energía eléctrica para proporcionar la misma carga, lo que reduciría las emisiones de gases de efecto invernadero basadas en los combustibles sólidos en la planta de potencia. En general, es posible señalar tres opciones para reducir el consumo energético de los edificios (Figura 2.2):

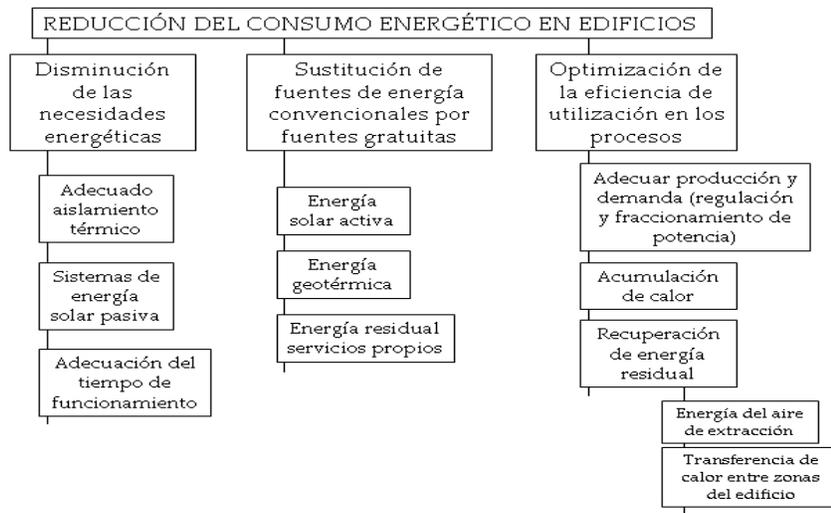


Figura 2.2 Procesos para reducir el consumo energético en edificios (Rey-Velasco, 2006).

La recuperación de energía es otro de los aspectos que hoy en día adquiere una gran importancia para el ahorro energético de los sistemas de climatización y que consiste en la reutilización de energías que normalmente son desaprovechadas en las instalaciones térmicas de la edificación y, en la mayoría de los casos, se evacuan al exterior perdiéndose totalmente.

A la hora de seleccionar los recuperadores, han de tenerse en cuenta diversos condicionantes, Rey y Velasco (2004) señalan los criterios a considerar en la selección, así como, aportan una clasificación de los sistemas recuperadores de energía más empleados (Figura 2.3), y una profusa descripción de todos ellos.

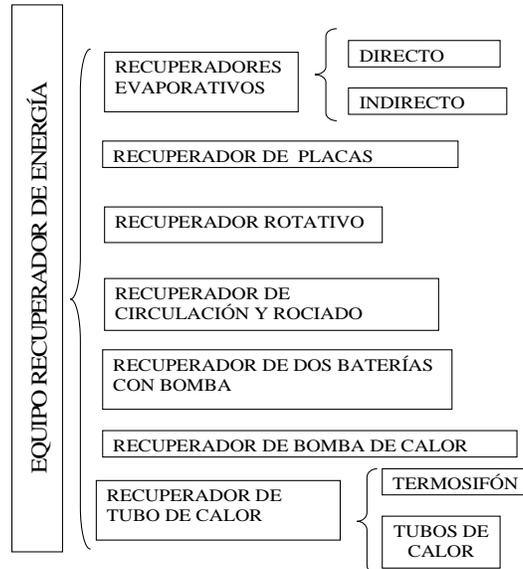


Figura 2.3 Principales sistemas utilizados en la recuperación de energía (Rey, 2004).

2.2. Recuperadores de energía:

Definición:

Se entiende por recuperador de energía a aquel dispositivo que permite la reutilización del calor residual de un sistema y cuyo objetivo final es alcanzar la eficiencia máxima de la instalación, dicho de otra forma, es un aparato de transferencia térmica destinado a recuperar energía residual (Flores, 2008).

Existen diferentes maneras de recuperar la energía residual:

- **Proceso a proceso:** El calor de extracción de un proceso industrial, por ejemplo, de un horno, se envía al circuito de suministro de una instalación para precalentamiento de aire, logrando una recuperación del 70% de calor sensible; el calor latente en este caso es prácticamente despreciable.
- **Proceso a confort.** El objetivo no es lograr la máxima recuperación de calor, sino un nivel adecuado de ésta. Aquí también se recupera calor sensible. La desventaja es que sólo funciona en invierno, por lo que no es reversible; y los efectos a considerar serán sobre todo los corrosivos, los contaminantes y los condensables del vapor.
- **Confort a confort.** Consiste en transferir energía del aire de extracción al de suministro. Una de las grandes ventajas es que la entalpía del aire de suministro baja en verano y se incrementa en invierno. Este tipo de recuperadores se clasifica a su vez en dos grandes grupos:
 - **De calor sensible.**
 - **De calor total.**

Los primeros transfieren sólo calor sensible (temperatura de bulbo seco). Los últimos transfieren calor sensible (temperatura de bulbo seco) y calor latente (humedad específica). Un ejemplo de estos mecanismos de transferencia se ilustra en la Figura 2.4 (Prieto, 1994) mediante un diagrama psicrométrico donde se aprecia que la diferencia entre un sistema de calor total y uno de calor sensible es importante.

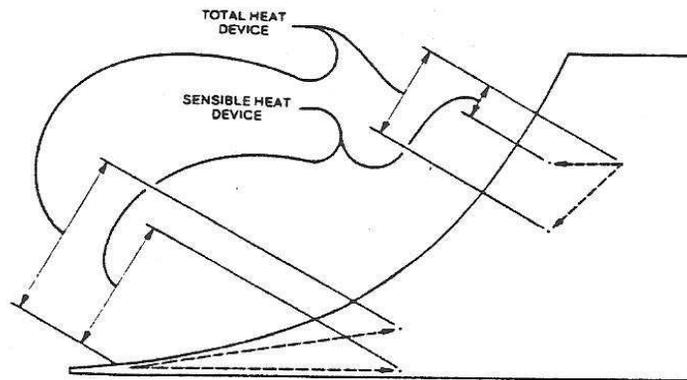


Figura 2.4 Comparativa de los anteriores recuperadores sobre el diagrama psicrométrico.

Con los recuperadores de calor sensible y total se consigue:

- Reducir la central energética (costos de inversión).
- Reducir el consumo de energía de funcionamiento (costos de explotación).

Los recuperadores de calor encuentran las mejores condiciones de aplicación en sistemas de climatización cuando se verifican una o más de las condiciones siguientes:

1 - Cuando los caudales de aire exterior de ventilación y de extracción son elevados. Como en instalaciones a todo aire exterior de hospitales, colegios, laboratorios, piscinas, aplicaciones industriales con elevadas cargas internas, etc.

2 - Cuando el número de horas de funcionamiento de la instalación de ventilación y de extracción sea elevado.

3 - Cuando la estación de verano está caracterizada por un elevado número de horas con temperaturas a bulbo seco y bulbo húmedo relativamente altas y la demanda energética de la instalación de climatización durante el año es elevada.

Los recuperadores de calor se emplean para la transferencia de calor entre dos fluidos (aire, gases de combustión, etc.) aplicados en climatización permitiendo una mejora en la calidad del aire interior.

Los recuperadores se calculan y seleccionan de forma individual para cada aplicación y la recuperación debe ser superior al 45% de rendimiento, en las condiciones más extremas de diseño.

Se debe tener en cuenta que toda recuperación de calor constituye un sistema integrado dentro de un proceso, de manera que se reduzca el consumo de energía con un costo global aceptable. Como consecuencia de esto, la recuperación de calor sólo podrá considerarse efectiva como parte integrante de un esquema bien concebido y cuidadosamente diseñado.

Para aplicaciones de climatización existen diferentes tipos de diseño de recuperadores de calor que se utilizan comercialmente, entre ellos existen:

Recuperadores de Calor Evaporativos.

Entre los recuperadores de calor evaporativos existen 3 clasificaciones:

1. Directos
2. Indirectos y mixtos
3. Indirectos.

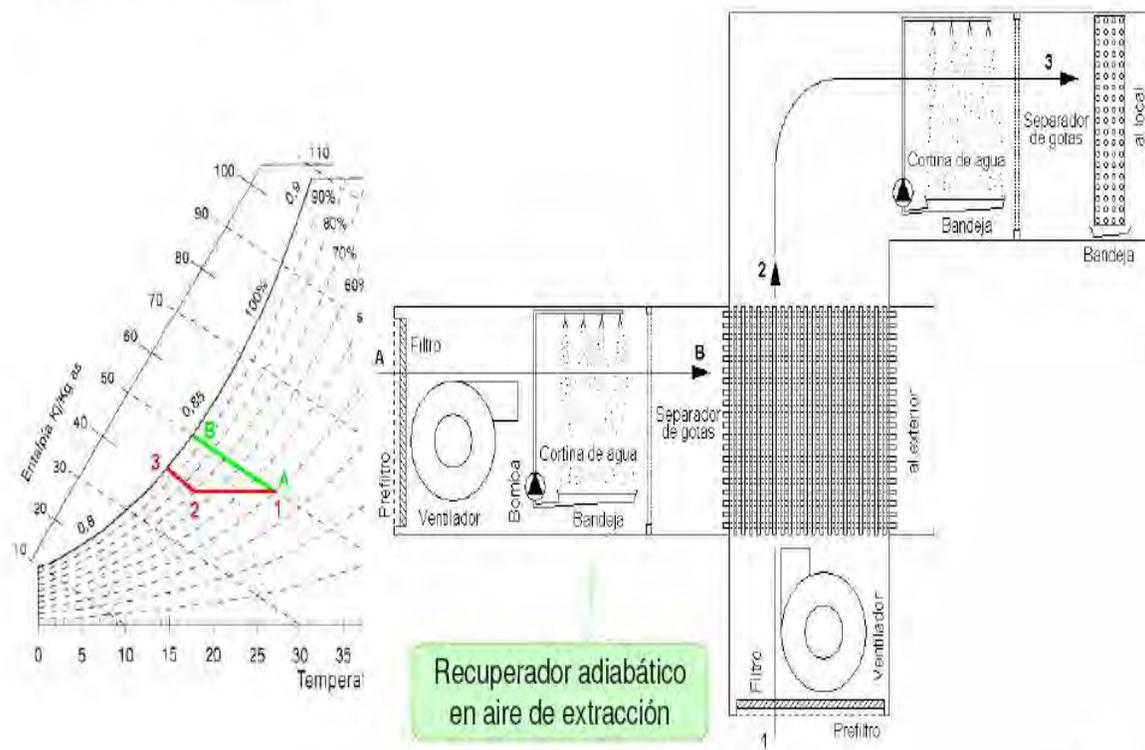
Los directos evaporan agua directamente al aire de entrada, para aumentar la humedad del aire y producir un enfriamiento sensible, aunque algunos autores incluyen a este tipo de equipos en la clasificación de recuperadores de energía, esto solo es cierto cuando mezclan una parte del aire de extracción con el de renovación,

de forma tal que se aprovecha de alguna manera las características higrotérmicas del aire de retorno. (Rey, 2006).

Los recuperadores indirectos y mixtos utilizan una corriente de aire auxiliar la cual es enfriada por medio de la evaporación en un proceso adiabático (A-B) como se muestra en la Figura 2.5 (Renedo, 2007).

El aire que se va a utilizar para el local (1) intercambia únicamente calor sensible con la corriente de aire auxiliar para pre enfriarse (2) esto sin que exista contacto entre ellos, posteriormente el aire que va al local es enfriado mediante un segundo proceso evaporativo (3) para obtener así las características de humedad y temperatura necesarias para alcanzar las condiciones de confort térmico.

• **Indirectos** (y Mixtos)



Recuperador adiabático en aire de extracción

Figura 2.5 Diagrama de un recuperador de calor mixto con su comportamiento en el diagrama psicrométrico (Renedo, 2007).

Los recuperadores indirectos utilizan una corriente de aire auxiliar la cual es enfriada por medio de la evaporación en un proceso adiabático (A-B) como se muestra en la Figura 2.6 (Renedo, 2007).

El aire que se va a utilizar para el local (1) intercambia únicamente calor sensible con la corriente de aire auxiliar para pre enfriarse (2) esto sin que exista contacto entre ellos, para no alterar las condiciones de humedad del aire que entra al local.

• Indirectos

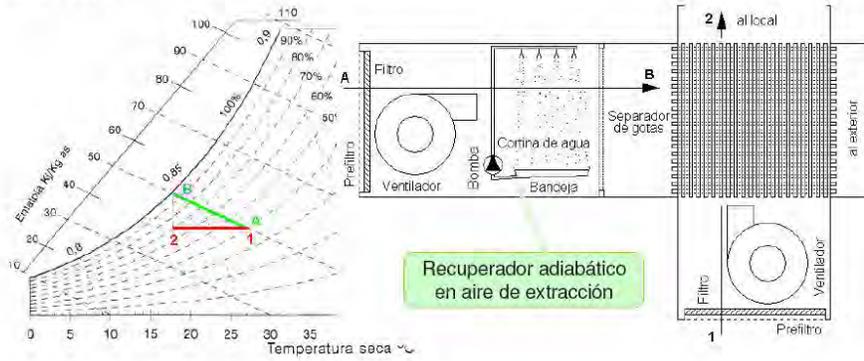


Figura 2.6 Diagrama de un recuperador de calor indirecto con su comportamiento en la carta psicrométrica. (Renedo, 2007).

El Recuperador de doble batería (RUN A ROUND): consiste en intercalar unas baterías intercambiadoras (aire-agua) en las corrientes de aire de expulsión y de aire exterior. Estas se conectan hidráulicamente entre sí, en un circuito cerrado, por el que se bombea generalmente agua glicolada (anticongelante-refrigerante).

El agua extrae calor del flujo más caliente, transfiriéndolo al más frío por medio de la segunda batería. El rendimiento de estos equipos se sitúa en un 40 a 50% y recupera únicamente calor sensible. Presenta las ventajas de su fácil adaptación al sistema y su economía, frente a otros dispositivos recuperadores.

En la Figura 2.7 se aprecia el sistema de doble batería, este sistema no es muy utilizado dada su baja eficiencia térmica y la necesidad de una bomba para el fluido.

No requiere juntar los conductos
Menor eficacia térmica

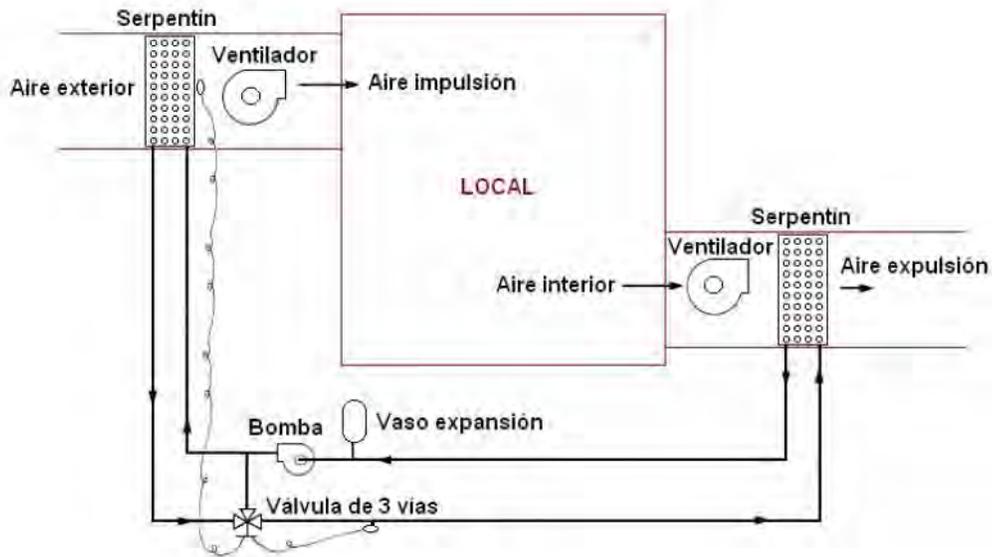


Figura 2.7 Diagrama de un sistema de doble batería con bomba de circulación de agua. (Renedo, 2007).

Recuperador estático ó de placas: el intercambio de calor se produce a través de una placa corrugada, al provocarse dos flujos de aire cruzados que no llegan a mezclarse (Figura 2.7.).

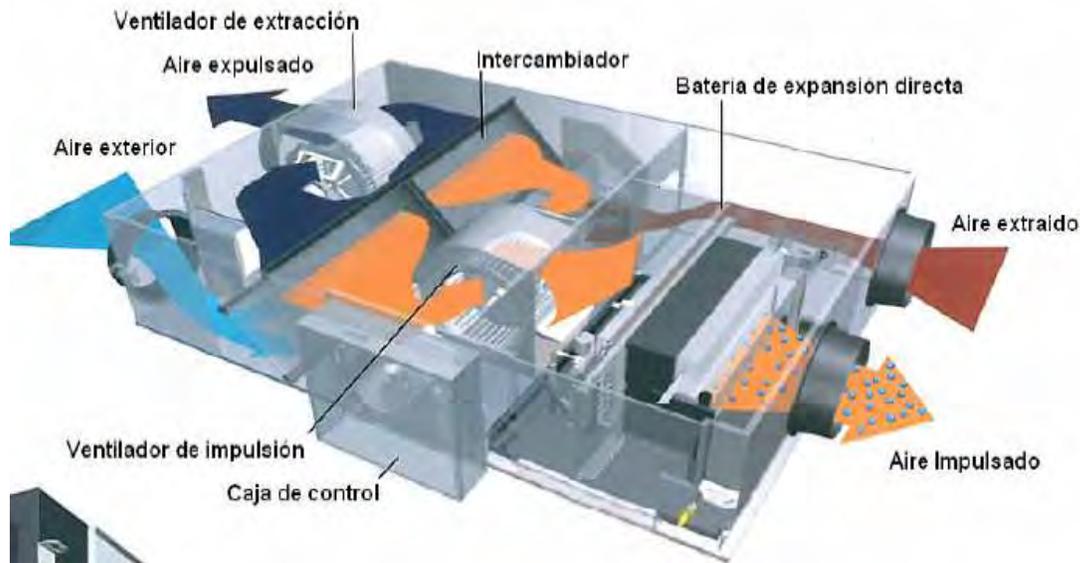


Figura 2.8 Diagrama de funcionamiento de un recuperador de calor de placas. (Renedo, 2007).

Funcionamiento:

Los rendimientos de recuperación suelen ser más elevados que en los casos anteriores, situándose entre el 60 y 70%. Para caudales de aire no muy elevados tiene una buena relación precio/prestaciones y la ventaja adicional de carecer de elementos móviles, lo que provoca un mantenimiento mínimo. Igual que los citados anteriormente, este sistema recupera únicamente calor sensible.

Recuperador rotativo/entálpico: el intercambio energético se produce por termo acumulación en una aleación resistente a la corrosión revestida de un absorbente inorgánico (Figura 2.9). (Renedo, 2007).

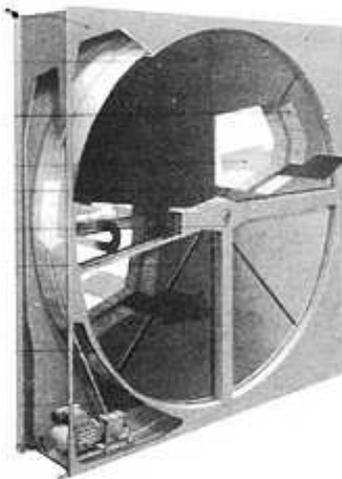


Figura 2.9 (Renedo, 2007).

La masa acumuladora permeable, capta calor del flujo de aire caliente y al girar, lo cede al flujo de aire frío. La eficiencia del recuperador varía con la velocidad de rotación, la velocidad frontal del aire y la densidad del rotor.

La velocidad de rotación puede ser constante, tarado por el fabricante o variable mediante regulación electrónica, que optimiza la eficiencia del intercambio térmico.

El recuperador cuenta con una cámara de purga, que impide las fugas de aire como consecuencia de la rotación.

Estos recuperadores captan la temperatura y la humedad del aire de extracción y su rendimiento puede llegar al 80%.

Recuperador por circulación y rociado:

La Figura 2.10 muestra un diagrama de un sistema de circulación y rociado donde el intercambio de calor entre el aire de extracción y el de renovación se realiza poniendo en contacto los dos flujos con un liquido higroscópico, rociado en contracorriente a cada flujo de aire sobre el lecho de relleno de dos intercambiadores, constructivamente semejantes a torres de enfriamiento y disponibles tanto en la versión de flujo vertical como en horizontal (caracterizada por una eficacia ligeramente inferior) (Rey, 2006).

- No requiere juntar los conductos
- Menor eficacia térmica
- Permite humectar
- Calentador auxiliar en invierno

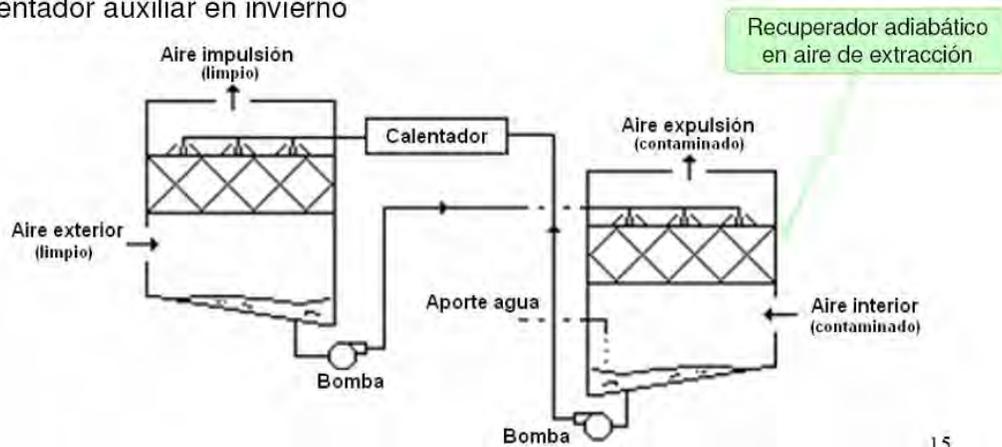


Figura 2.10 Diagrama de una recuperador de calor de circulación y rociado. (Rey, 2006).

Dos bombas aseguran la circulación de la solución higroscópica entre las dos torres, mientras que el aire a la salida pasa a través de un separador de gotas para evitar el arrastre de la solución entre las corrientes de aire.

Normalmente la envoltura de las torres está realizada en acero y protegida por un tratamiento anticorrosivo.

No se precisan otras especificaciones, si bien hay que tener cuidado con los requerimientos específicos vigentes relativos a la Legionella, para este tipo de dispositivos en lo que se produce evaporación de agua en una corriente de aire.

En invierno la solución higroscópica absorbe calor y vapor de agua de la corriente de expulsión y lo transfiere por contacto al aire exterior de renovación, análogamente en verano la solución absorbe calor y vapor de agua del aire de renovación y lo transfiere al aire de extracción, mas frio y más seco que el aire exterior.

El funcionamiento de estas instalaciones en la estación invernal puede perfeccionarse notablemente con la instalación de un calentador de la solución envidada a la torre de tratamiento del aire exterior (calor de apoyo), con lo que se consigue suministrar aire exterior a una temperatura constante.

En estas condiciones es necesario instalar también una tubería de agua de aportación en la torre del aire de retorno para evitar la concentración excesiva de la solución y garantizar el suministro de aire con humedad específica prácticamente constante durante todos los meses de invierno.

Como ventajas principales pueden señalarse las facilidades de este sistema para su instalación en obra, puesto que las torres de aire de extracción y renovación son totalmente independientes y solamente están unidas por tuberías por lo que pueden instalarse en la posición más favorable, no es necesario que los conductos de extracción y renovación estén adyacentes como en otros sistemas de recuperación con lo que se consiguen importantes ahorros. Por último, la separación de las torres de tratamiento impiden eficazmente cualquier contaminación de partículas solidas entre los dos flujos de aire, mientras que la contaminación gaseosa llega de un modo limitado por la solubilidad de dicho gas en la solución absorbente, es importante notar que las soluciones absorbentes son bacteriostáticas por lo que actúan como filtros biológicos.

Recuperador tipo bomba de calor:

Este sistema utiliza una máquina a compresión que transfiere energía de una fuente fría a una caliente, utilizando un fluido intermedio que absorbe o cede calor al recorrer un ciclo termodinámico (Figura 2.11). En el caso de que opere como recuperador de energía en sistemas del tipo aire/aire, una unidad se encuentra en el aire de extracción y la otra en la del aire de renovación. (Rey, 2006).

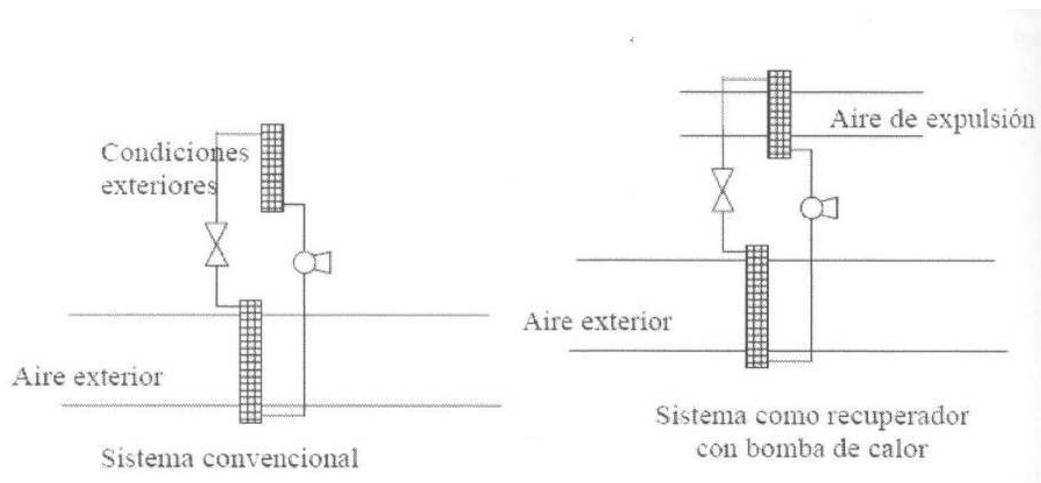


Figura 2.11 diagrama de un sistema de recuperación de tipo bomba de calor.

Recuperador por tubo de calor: la captación de energía se produce a través de una batería intercambiadora, cargada con un fluido bifásico (gas refrigerante), que incorpora una separación intermedia que la divide en dos zonas, por donde se harán pasar el aire expulsado y el aire exterior.

Los flujos de aire se establecen a contracorriente.

El fluido bifásico, en fase líquida, recibe el flujo caliente, se evapora, pasando en fase gaseosa al flujo frío y cediéndole calor. Al cederle calor, condensa y regresa por capilaridad o gravedad en fase líquida para reiniciar el ciclo.

Sus rendimientos oscilan entre el 50 y 60%.

Tiene la ventaja de que su funcionamiento es autónomo, sin necesidad de aportes energéticos exteriores, es de fácil adaptación a un Climatizador o en conductos y carece de mantenimiento mecánico.

Los recuperadores de tubos de calor presentan algunas ventajas que conviene citar:

- Están adaptados esencialmente a la recuperación de calor sensible
- Son indicados para recuperaciones en las cuales es imperativo que los caudales de aire primario y secundario no deban mezclarse jamás, ni siquiera por accidente o ruptura del recuperador.
- Pueden ir incorporados en el climatizador o conectados directamente a los conductos de aire de extracción y retorno.

La Figura 2.12 muestra un equipo de recuperación de energía comercial de Tubos de Calor aire-aire utilizado comúnmente en sistemas de climatización.



Figura 2.12. Recuperador de calor comercial del tipo "Heat Pipes" marca Innergytech disponible en <http://www.innergytech.com/>

Eficiencias típicas de los recuperadores de Energía.

Tabla 2.1 muestra las eficiencias típicas de los diferentes tipos de recuperadores de energía (Renedo, 2007).

Recuperador	Eficiencia %
Rotativo	70 a 90 %
Placas	45 a 65 %
Tubos de calor	50 a 80 %
Dos baterías	40 a 60 %
Circulación y rociado	60 a 70 %
Evaporativo indirecto	50 a 70 %

2.3. Aplicaciones de recuperadores de energía basados en tubos de calor:

Los recuperadores de energía basados en la tecnología de tubos de calor tienen una muy extensa área de aplicación para la climatización de:

- **Hospitales.**
- **Hoteles.**
- **Escuelas y Universidades**
- **Bibliotecas**
- **Museos**
- **Cuartos Limpios**
- **Teatros**
- **Fabricantes de alimentos y bebidas**
- **Restaurantes**
- **Supermercados**

Pudiendo generar ahorros de hasta un 50% en los costos de energía eléctrica, a continuación tres ejemplos de éxito en la aplicación de este tipo de recuperadores de energía.

2.3.1 Casos de éxito en la implementación de recuperadores de energía tipo tubos de calor.

Un lugar donde fue aplicada la tecnología de recuperación de energía fue en la universidad de ST. JOHN.S RIVER COMMUNITY en Palatka, Florida en los Estados Unidos de América. (Khanh, 2006).

La tecnología de tubos de calor resuelve el problema de humedad y ahorra un 50% de energía.

El problema:

En un intento de reducir los niveles de humedad en el campus que se encuentra a la orilla del río, se utilizó un sistema para recalentar el aire del sistema de climatización, lo que resulta en facturas altísimas de energía eléctrica. En la Biblioteca los libros estaban cubiertos de moho y hongos, en el interior el aire estaba viciado y no saludable.

La solución:

Se instaló un sistema de recuperación de energía basado en tubos de calor en las manejadoras de aire, para deshumidificar el aire de entrada principal, el colegio resolvió así sus problemas de humedad y calidad del aire en interiores. Los tubos de calor también permitieron la eliminación de recalentamiento, lo que redujo considerablemente el consumo de energía.

"Estamos ahorrando US\$ 15,000 al año con una inversión de tan solo US\$ 7.000, el dinero que ahorramos en nuestras facturas de servicios públicos es dinero que se puede utilizar para mejorar nuestra escuela," dijo el vicepresidente de la universidad El Dr. Gary Lott. (Khanh, 2006)

El Dr. Lott agregó que el nuevo sistema ha resuelto los problemas del aire interior, e inhibió el crecimiento de moho y hongos que dañaban la biblioteca.

Museo Salvador Dalí

St. Petersburg, Florida (Estados Unidos de América.).

"Tecnología de punta para preservar el arte de vanguardia"

El problema:

150 millones de dólares de arte surrealista de renombre mundial estaban en riesgo debido a la humedad de San Petersburgo Florida. De hecho, los museos en todo Estados Unidos están encontrando que las técnicas de aislamiento modernas a veces promueven la creación de humedad en ambientes interiores que contribuyen a acelerar el deterioro de los materiales.

La solución:

Añadir un deshumidificador de tubos de calor en la Unidad de 40 toneladas en la azotea y Retirar el recalentamiento eléctrico. El Centro de Energía Solar de Florida (FSEC) seleccionó el Museo Salvador Dalí después de revisar otras 86 localidades nacionales para establecer un prototipo nacional para la conservación mediante el uso de deshumidificación basada en la tecnología de tubos de calor.

Resultado:

Un ahorro inicial de energía eléctrica del 46%, el arte podrá conservarse muchos años mas mientras el museo se ahorra 5000 dólares anualmente con una inversión de tan solo 9000 dólares. (Khanh, 2006)

BAYFRONT CENTER / Teatro Mahaffey

St. Petersburg, Florida

El Centro de Artes Escénicas sufre altos índices de Humedad lo que se traduce en malestar.

El problema:

La gente que asiste se queja de una sensación "pegajosa" y discomfort generalizado. Para corregir el problema, el personal del edificio tuvo que utilizar unidades eléctricas de recalentamiento para controlar la temperatura del teatro después de que el aire era subenfriado para retirarle la humedad.

Esta operación dio lugar a altísimos costos de energía.

La solución:

Instalación de un deshumidificador basado en la tecnología de tubos de calor, se elimina el recalentamiento eléctrico.

RESULTADO

Después de la instalación, los datos eléctricos que se reunieron durante el año indicaron que la reducción de la demanda total fue de 323 kW en invierno y 293 kW en el verano. El costo del proyecto de 120.000 dólares se recuperó a través del ahorro de energía y un descuento de la Florida Power Corporación, en tan sólo un año.

FPC ha reembolsado al cliente un total de \$ 48.900 que se dividió entre \$ 100/kW para la reducción de verano y \$ 60 /kW para el invierno. (Khanh, 2006)

Capítulo III

3.1 Tecnología de los Tubos de Calor

3.1.1 Introducción

La tecnología de tubos de calor es una solución al problema de transferir grandes cantidades de calor en espacios limitados ya que cuentan con una conductancia térmica muy elevada con respecto a una barra de material conductor macizo como el cobre, abriendo las posibilidades a muchas aplicaciones en el sector industrial, comercial y de servicios ya que hacen posible transferir la energía en grandes cantidades de un punto a otro por lo que se consigue mejorar la eficiencia de los sistemas.

3.1.2 Tecnología de los TC

Un TC es un dispositivo utilizado para transportar energía térmica de un punto a otro por medio de la evaporación, y posterior condensación del fluido refrigerante en el que se mantiene su circulación por fuerzas capilares. La descripción general de un TC es, en algunos aspectos, similar a la de un termosifón. De hecho, un breve repaso a la estructura y funcionamiento de éste, nos servirán para introducirnos en el estudio de los primeros.

3.2 Generalidades y funcionamiento de los tubos de calor.

En un termosifón se introduce una pequeña cantidad de líquido en un tubo, en el cual se ha evacuado el aire, y se sella. El extremo inferior del tubo se calienta, provocando la vaporización del líquido. El vapor se desplaza hacia el extremo frío del tubo, donde se condensa. El fluido condensado desciende hasta el extremo caliente por gravedad.

Dado que el calor latente de evaporación de los fluidos refrigerantes empleados es muy elevado, se pueden transportar cantidades de calor considerables con pequeñas diferencias de temperatura de extremo a extremo, por lo tanto, el termosifón tendrá una elevada conductancia térmica efectiva.

Este tipo de dispositivos se ha empleado durante varios años y con un variado campo de fluidos de trabajo. Pero el termosifón presenta una serie de limitaciones, la más importante es debida a que como el condensado regresa a la región de evaporación por gravedad, ésta debe situarse siempre en el extremo inferior del tubo. En el TC, incluso en posición vertical, el líquido condensado puede transportarse hasta el evaporador por los efectos de capilaridad, aunque éste se sitúe en la zona superior del tubo. En la figura 3.1 se presentan estos dos casos, en los que puede observarse sus diferentes mecanismos.

El TC es similar en construcción al termosifón, pero en este caso un relleno poroso o una malla metálica fina se fijan a la superficie interior del tubo, y debido a las fuerzas capilares, hacen que el condensado ascienda hasta el evaporador.

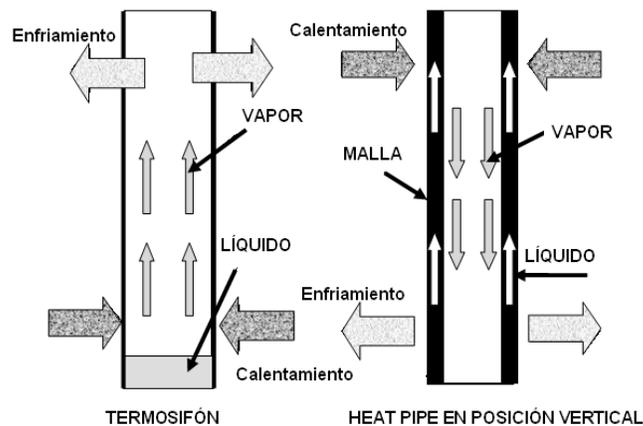


Figura 3.1 esquemas operativos de un termosifón y un tubo de calor (heat pipe) (FEFM, 2008).

En el TC la posición del evaporador no está restringida, pudiendo utilizarse en cualquier orientación. La posición más desfavorable es la mostrada en la figura 3.1., pues las fuerzas capilares deben vencer el efecto de la gravedad. Si el evaporador se encuentra en la parte más baja, las fuerzas gravitacionales contribuirán al transporte del líquido junto con las de capilaridad, aumentando la eficacia del tubo de calor. La posición habitual de un TC es horizontal, lo que proporciona dos ventajas principalmente:

1. Los efectos de la gravedad no dificultan las fuerzas capilares necesarias para el transporte de líquido hasta el evaporador.
2. Los dos extremos del tubo de calor pueden utilizarse igualmente como condensador o evaporador sin necesidad de realizar modificaciones.

La potencia calorífica recuperada disminuye en función de la inclinación. Para tubos de calor fabricados con relleno poroso, la reducción de potencia puede ser de hasta el 50% de la potencia máxima, pero cuando la estructura de fabricación es una malla, el

efecto de la gravedad es mucho más pronunciado y puede anular la operatividad del dispositivo.

3.3. Aspectos constructivos y de funcionamiento

En la figura 3.2 se presentan las zonas de funcionamiento de un TC comercial. Puede observarse como existe simetría constructiva, lo que posibilita la transmisión de calor en ambos sentidos dentro del dispositivo, sin variar la posición, únicamente cambiando la situación de los fluidos utilizados como fuente y sumidero de calor.

En dirección longitudinal, el TC está formado por una zona evaporadora y una zona condensadora. Es necesario separar estas dos partes, ya que el flujo de calor circulará en cada una de ellas en sentido contrario. Para ello es necesario definir una tercera zona en la que no se produce intercambio de calor, es la denominada zona adiabática.

La sección transversal de un TC presenta un contenedor (la pared del tubo), la malla o estructura porosa por la que circulará el líquido, y el espacio libre por el que se desplazará el vapor del fluido frigorígeno, desde el evaporador hasta el condensador.

Por tanto, un tubo de calor es un sistema evaporador-condensador en el cual el líquido regresa al evaporador por capilaridad, generalmente a través de una estructura porosa o una malla. Desde el momento en que el líquido y su vapor coexisten en equilibrio, la presión en el interior del tubo es igual a la presión de vapor correspondiente a la temperatura del tubo de calor.

La adición de calor a lo largo de una porción de la superficie del tubo causa la evaporación del líquido del material poroso, mientras que la extracción de calor en otra parte de la superficie causa la condensación del vapor. El gradiente de presión resultante de la acumulación de vapor en un extremo del TC y su agotamiento en el otro, causa el flujo de vapor en el interior (Silverstein, 1992).

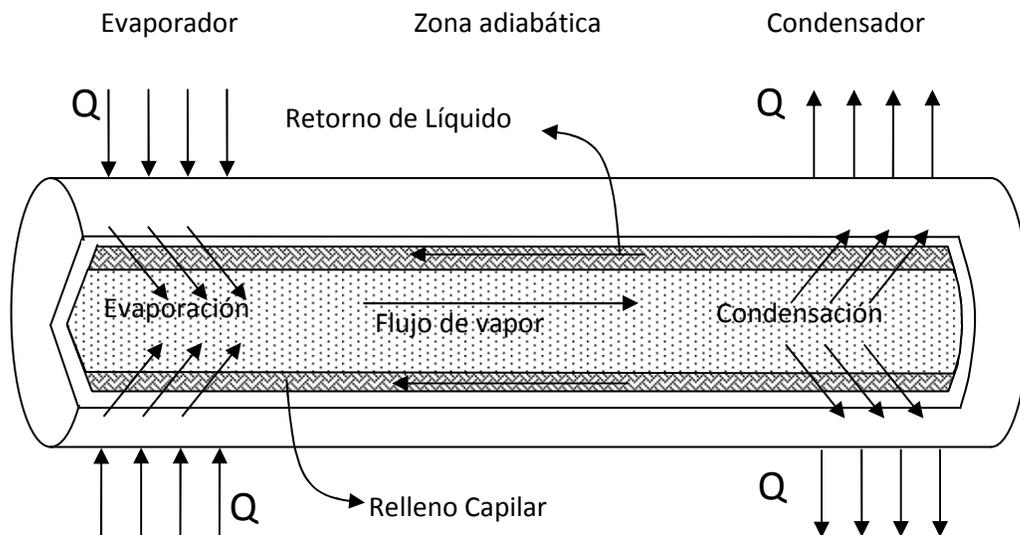


Figura 3.2 Zonas de funcionamiento de un tubo de calor (FEFM, 2008).

Como consecuencia de este hecho, se desarrolla una presión de capilaridad en los poros del material poroso, para equilibrar la diferencia de presión que existe a lo largo del TC entre las corrientes del vapor y el líquido que se mueven adyacentemente.

Para el diseño de un TC, se utilizan las diferentes expresiones asociadas a los gradientes de presión en el ciclo cerrado que recorre el fluido frigorígeno, que son:

1. Zona del condensador.- El vapor pasa a líquido.
2. Transporte de líquido.- Desde el condensador se transporta el líquido a través del relleno poroso hasta el evaporador.
3. Zona del evaporador.- El líquido pasa a vapor.
4. Transporte de vapor.- En el evaporador, el vapor se encuentra a mayor presión que en la zona del condensador. Esta diferencia de presión es la responsable del transporte del vapor desde el evaporador hasta el condensador.

3.4. Propiedades y características de los tubos de calor

Una característica importante de los tubos de calor es la posibilidad de transportar gran cantidad de calor entre zonas con diferencias de temperatura muy pequeñas. La transferencia de calor a través de un TC es prácticamente isoterma, pues la caída en la presión de vapor es normalmente del 1% o inferior, por lo que el cambio asociado a la temperatura del vapor saturado es entonces muy pequeño.

La conductividad térmica efectiva en la dirección de transporte del calor es generalmente al menos 4 o 5 veces mayor que la del cobre, luego la resistencia al transporte de calor desde el evaporador al condensador es muy pequeña, por lo que la mayor parte de la caída de temperatura, asociada al transporte de calor en un TC, se produce cuando se transfiere el calor en la pared del tubo y en el intercambio del material poroso o la estructura de malla con el espacio interior donde se produce el cambio de fase.

Una propiedad interesante de algunos tubos de calor es la posibilidad de modificar la densidad de flujo de calor, debido a que la cantidad de calor transferida ha de ser la misma en el evaporador y condensador, y la densidad de flujo de calor depende de modo inversamente proporcional a la relación de las áreas. Así, para reducir esa densidad de flujo 10 veces en el evaporador o en el condensador, el área de intercambio ha de ser 10 veces mayor que el del condensador o evaporador (figura 3.3.).



Figura 3.3 Modificación de la densidad de flujo de calor (FEFM, 2008)

Una de las propiedades más útiles de los tubos de calor es la posibilidad de transportar calor sin la necesidad de ningún dispositivo externo que haga circular el fluido. La eliminación de bombas y suministros de energía conducen a una mayor fiabilidad en el sistema de transporte de calor, ahorran peso, disminuye el consumo de energía y minimiza el riesgo de averías.

La posibilidad de funcionar por sí solos en el transporte de calor es una característica de los sistemas basados en la convección natural, y los tubos de calor son uno de éstos. La circulación del fluido de trabajo se mantiene ya que el fluido enfriado, o condensado, retorna a la zona de adición de calor bajo la influencia de la gravedad.

Para las aplicaciones de aire acondicionado, muchos tubos de calor se juntan de manera que formen baterías aleteadas, generalmente de muchas filas. Los conductos del aire se montan de manera que uno de los flujos atraviese una mitad del recuperador, y el otro flujo en contracorriente por la otra mitad de la batería (Pizetti, 1991).

A través del proceso antes descrito, se tendrá una transferencia de calor del flujo de aire más caliente al flujo de aire más frío. Por lo dicho anteriormente no es necesario ninguna conmutación estacional de los flujos de aire, lo que diferencia este tipo de recuperadores de energía con otros tipos en los que el aire frío o caliente, más o menos húmedo, etc., deben discurrir por determinados recorridos, y los cambios climáticos obligan a modificar su disposición, o a actuar mediante compuertas sobre el sistema de climatización.

3.5. Sistemas de tubos de calor

Tipos de TC.

Algunas de las clasificaciones que pueden realizarse en función de los diferentes parámetros que caracterizan los tubos de calor son:

Dependiendo de cómo se construye el dispositivo. La geometría más habitual de un sistema tubos de calor es de sección circular, el material con el que se fabrican suele ser rígido, etc., pero pueden encontrarse dispositivos con geometría planas, ovaladas, etc. y de materiales flexibles.

Atendiendo al tipo de fuerza que recircula el condensado a la etapa de evaporación. Además de las fuerzas de capilaridad, pueden utilizarse otros tipos de fuerzas para que se produzca el retorno del condensado, sobre todo

cuando se requieren conductancias efectivas muy elevadas. Estas fuerzas pueden ser centrípetas, de ósmosis, electro hidrodinámicas, etc. Dependiendo de las fuerzas empleadas, se obtienen determinados tipos de tubos de calor (Silverstein, 1992).

Atendiendo a los fluidos frigoríferos. La selección del fluido de operación se realiza dependiendo del campo de temperaturas en el que van a ser utilizados. (Dunn, 1994) Existen varios fluidos que pueden ser utilizados, los más empleados son el agua, metanol, diferentes tipos de freones, amoniaco y metales en estado líquido, como el sodio para elevadas temperaturas.

Dependiendo del tipo de estructura responsable de que se produzca la fuerza capilar. Dos grandes bloques en esta clasificación serían: los tubos de calor construidos con un relleno poroso y los construidos con una malla. Un ejemplo de las diferentes estructuras se muestra en la figura 3.6.

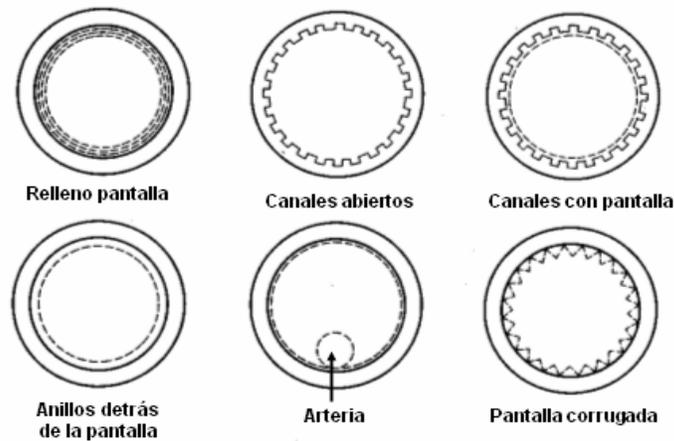


Figura 3.6 Estructuras capilares (Silverstein, 1992).

Tubo de calor simple

Es un tubo con una malla o un relleno poroso en su interior, que es la estructura que provoca la aparición de las fuerzas capilares que permiten enviar el condensado a la etapa de evaporación.

En la Figura 3.7 se presenta la geometría estructural de estos dispositivos.

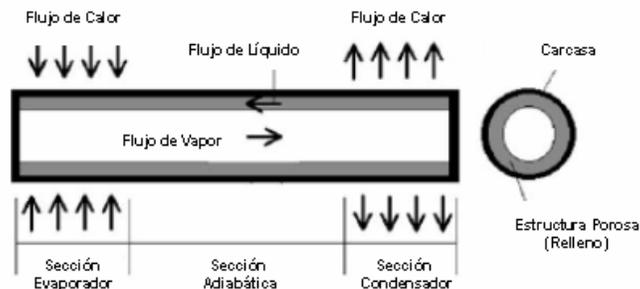


Figura 3.7 Esquema básico de un tubo de calor simple (FEFM, 2008).

Tubo de calor de conductancia variable

Los tubos de calor de conductancia variable tienen la capacidad de mantener su temperatura de operación dentro de un intervalo pequeño de valores. El control de la temperatura se realiza automáticamente variando la sección de la zona de condensación, en respuesta a los cambios en la entrada o salida del calor (silverstein, 1992).

Un ejemplo de este tipo de tubo de calor se presenta en la figura 3.8 el mecanismo de control está formado por una cámara de gas inerte con un volumen grande que permite mantener una presión constante en el interior del tubo de calor (heat pipe), al estar conectada al extremo del condensador (salida de calor).

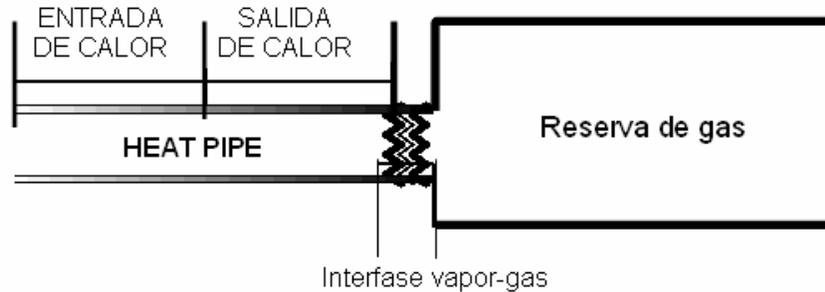


Figura 3.8 Esquema básico de un tubo de calor de conductancia variable (Silverstein, 1992).

TC cíclico con bombeo capilar

Las fuerzas de tensión superficial, son las responsables de que el fluido frigorígeno retorne a la etapa de evaporación. En la figura 3.9 se muestra un esquema de este dispositivo (Silverstein, 1992). El dispositivo sólo dispone de relleno capilar en la superficie que actúa como evaporador, mientras que la zona de condensación es sencillamente un tubo.

La zona de evaporación se encuentra a mayor presión que el resto de zona que actúa como condensador, siendo la estructura la que proporciona la caída de presión suficiente como para soportar esa diferencia de presión.

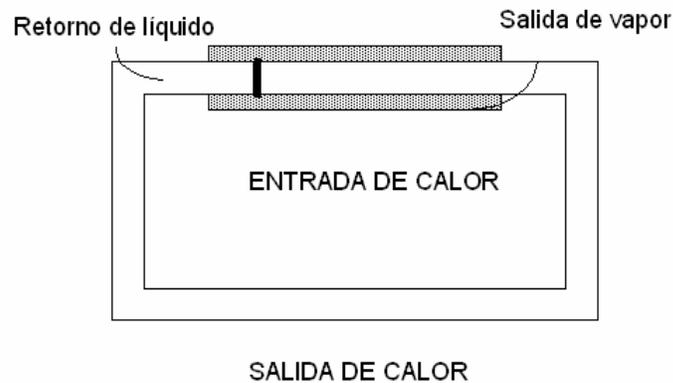


Figura 3.9 esquema básico de un tubo de calor cíclico con bombeo capilar (Silverstein, 1992).

Este sistema se utiliza en aplicaciones en las que se dispone una pequeña zona de evaporación, y el condensador puede seguir caminos tortuosos que dificultarían la instalación del relleno capilar, necesario en los tubos de calor convencionales.

Tubo de calor rotativo

Se denomina al dispositivo que utiliza la fuerza centrífuga generada por la rotación del tubo de calor para devolver el condensado a la etapa de evaporación. El sistema consiste en una estructura con una cavidad cerrada, que se extiende a lo largo de un eje, en la que coexisten el líquido y el vapor (Silverstein, 1992). Cuando el sistema gira alrededor del eje, el fluido forma una capa delgada sobre la pared. Si en algún punto se está cediendo calor al sistema, esa zona se convierte en el evaporador, generándose una capa delgada de líquido, y el resto actúa como condensador con una capa más gruesa de fluido, como se muestra en la Figura 3.10

Las fuerzas centrífugas aseguran el retorno del condensado al evaporador, y no depende de la presencia de la gravedad ni de fuerzas capilares, por lo que no precisa relleno. La capacidad de transporte de calor varía con la velocidad de giro del sistema.

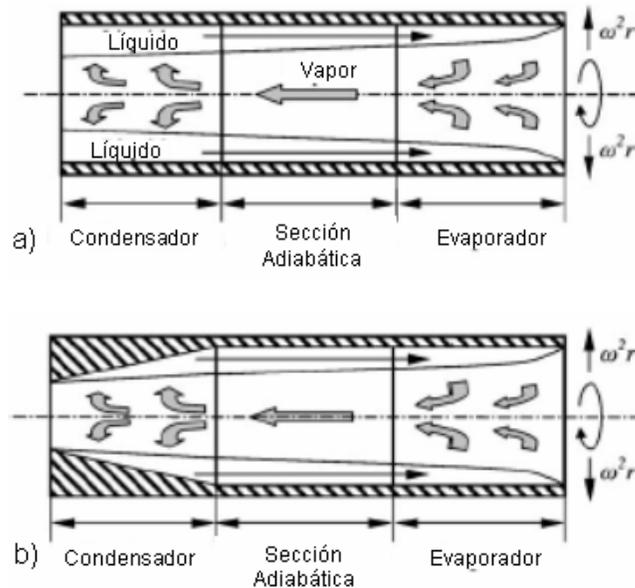


Figura 3.10 Esquema y geometría típica de un tubo de calor rotativo (Song, 2004).

Tubo de calor flexible

La dificultad de acceder a lugares donde se precisa sobre todo evacuar calor, por ejemplo, para el enfriamiento de sistemas electrónicos utilizados en aplicaciones militares, ha sido la principal causa del desarrollo de este tipo de dispositivos

3.6. Aplicaciones de los tubos de calor

En la práctica, un tubo de calor, o un conjunto de ellos, funciona como un componente de un sistema térmico, integrado en otros sistemas o aparatos. A menudo las condiciones del sistema completo determinarán los requerimientos de diseño del tubo

de calor. Los sistemas térmicos con esta tecnología pueden dividirse en tres categorías que son: disipación de calor, intercambio de calor y control de la temperatura.

Disipación de calor

En muchas ocasiones, se necesita disipar calor. Dos ejemplos muy claros se encuentran cuando el calor que incide o se genera por un aparato, o un componente estructural del mismo, debe ser extraído para evitar temperaturas excesivas, y cuando hay que eliminar el calor residual procedente de un aparato de conversión de energía, normalmente eléctrica.

Una aplicación específica se aplica en sistemas de distribución de calor destinado a confort térmico (Silverstein, 1992). La particularidad de este sistema es que la disipación de calor es el objeto de su implantación. En la Figura 3.14 se presenta un esquema de esta aplicación.

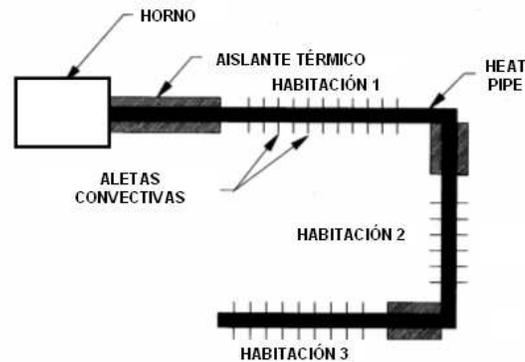


Figura 3.14 Sistema de confort térmico (Silverstein, 1992).

Algunas de las aplicaciones más habituales donde se han implantado tubos de calor para la disipación de calor son:

1.-Enfriamiento de los extremos de superficies sometidas a fricción.

Silverstein (1992) describe el sistema aplicado al enfriamiento de las alas de un avión supersónico. El calor se transporta entre las zonas en donde se produce el mayor calentamiento, que son las zonas extremas, y las zonas donde este efecto es menor, que en este caso es la superficie superior, desde donde se elimina al ambiente (Silverstein, 1992). Por tanto, el diseño de este tubo de calor, debe realizarse para unas temperaturas que permitan el transporte de calor entre los bordes y la parte superior del ala.

2.-Disipación de calor residual de los sistemas espaciales de conversión de energía.

El calor residual se disipa al espacio a través de un radiador como el que se presenta en la Figura 3.15 el radiador consiste en un conjunto de tubos de calor orientados en dirección normal al proceso cíclico convencional de transferencia de calor, que están equipados con aletas desde donde se disipa calor por radiación.

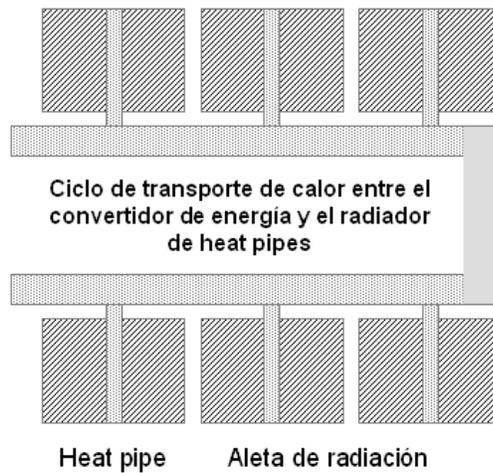


Figura 3.15 Radiador de eliminación de calor construido mediante tubos de calor (FEFM, 2008).

3.7. Intercambiadores de calor

El intercambio de calor se produce al transferir calor de una corriente fluida a otra. El objetivo del intercambio no es evitar la excesiva temperatura de la corriente caliente, sino incrementar la eficiencia térmica de la conversión de energía de un proceso térmico recuperando el calor que de otro modo se desperdiciaría.

Un intercambiador de calor puede usarse en una planta de turbinas de gas para transferir calor de los gases calientes que salen de la turbina al aire frío que sale del compresor. Se invierte entonces menos energía en calentar ese aire que sale del compresor para quemar el combustible, y consiguientemente se incrementa la eficiencia del ciclo. A este tipo de intercambiador de calor se le denomina recuperador.

La configuración típica de un intercambiador de calor de este tipo se presenta en la figura 3.16. Un conjunto de tubos de calor se coloca a través del camino por el que circula el fluido, orientados perpendicularmente a la dirección del flujo. Los tubos de calor pueden ser tubos exclusivamente, o estar aleteados para aumentar el área efectiva de transferencia de calor.

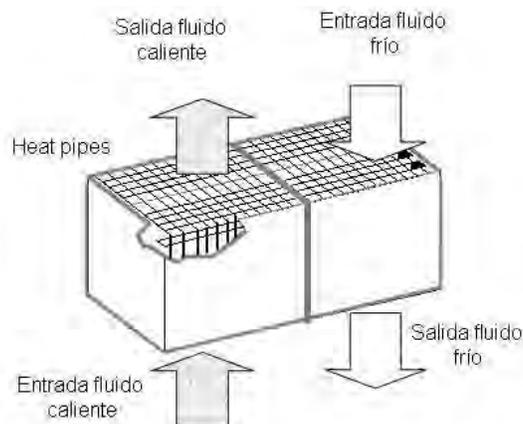


Figura 3.16 Intercambiador de tubos de calor (FEFM, 2008).

La temperatura de cada tubo de calor individual se determina por el equilibrio que debe existir entre el calor transmitido desde el fluido caliente y el que se transfiere al fluido frío.

En este tipo de intercambiador generalmente se considera la recuperación del calor sensible asociado a la corriente del aire de extracción, si bien pueden utilizarse sistemas de recuperación de energía latente, o de secado de la corriente de aire, en procesos que operan en ambientes muy húmedos, como es el caso de los equipos de climatización en zonas tropicales (Mike, 1993), (Milton, 1997) y (FEES, 1991).

En climas tropicales, debido a la elevada humedad del ambiente, gran parte del consumo energético de las instalaciones de climatización se destina a eliminar el agua que acompaña al aire de renovación. Una manera eficiente de recuperar esa energía es utilizando un enfriamiento evaporativo del aire de expulsión. Esto disminuye la temperatura del lado del intercambiador por donde circula la corriente de extracción, aumentando el gradiente de temperatura en el intercambiador y disminuyendo la energía empleada en refrigeración.

Intercambiadores de calor de tubos de calor para el precalentamiento de aire.

Los tubos de calor o termosifones bifásicos son conceptualmente importantes dentro de los intercambiadores de calor, pudiendo emplearse en diferentes ramas de la industria como la metalurgia, el refino, el vidrio, etc. Es posible identificar tres aplicaciones principales para los equipos de recuperación de energía:

- 1.-Aprovechamiento del calor residual en procesos de precalentamiento del aire de suministro para el acondicionamiento de espacios interiores.
- 2.-Recuperar el aire del retorno o de extracción en los sistemas de aire acondicionado en edificios domésticos o del sector servicios para precalentar el aire de suministro.
- 3.-El intercambiador de calor empleado en la recuperación de calor gas-gas es esencialmente un conjunto de tubos de calor aleteados como un intercambiador de calor convencional para enfriamiento de aire.

Los tubos de calor en el intercambiador de calor pueden dividirse en tres partes: evaporador, sección adiabática y condensador. Al pasar gases calientes sobre el evaporador se hace que el fluido de trabajo se evapore y el vapor fluya a la parte fría del tubo. El aire frío, que fluye sobre el condensador en la dirección opuesta al flujo, condensa el vapor por lo que se libera calor latente que calienta el aire.

Un pre calentador de aire consiste en dos conductos con una pared común. Los tubos de calor individuales se extienden a través de la pared común entre ambos conductos. Los gases calientes fluyen a través de un conducto mientras que los gases fríos fluyen a través de otro conducto. Los tubos normalmente están sellados de manera que en la pared común no haya pérdidas. El final de los tubos se deja libre para que sufra expansiones o contracciones. También, pueden aletearse las superficies individuales de los tubos o el conjunto dando lugar a multitud de diseños específicos (Figura 3.17).

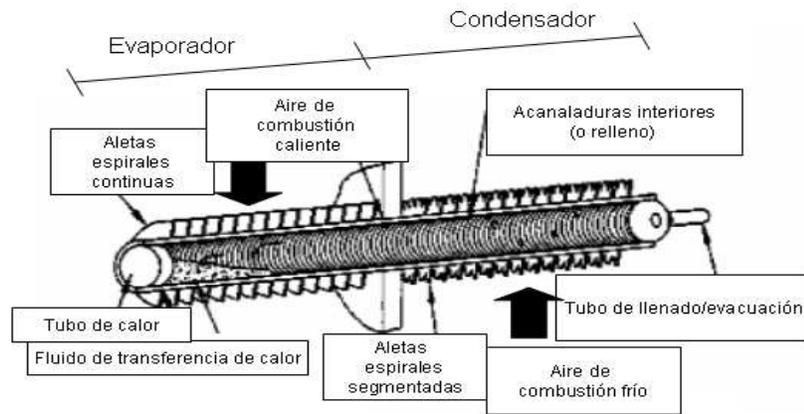


Figura 3.17 Precalentador de tubos de calor (Vasiliev, 1987).

Comparados con otros intercambiadores de calor convencionales, el intercambiador de calor de tubos de calor tiene muchas ventajas, por ejemplo, las grandes cantidades de calor transportadas a través de pequeñas secciones transversales sin ningún aporte adicional de potencia al sistema, menor caída de presión del fluido, buen mantenimiento, buena fiabilidad, estructuras más sencillas y volúmenes menores.

Shang y Li (1988) afirman que aproximadamente un 25-30% de la energía generada en los motores se disipa en los gases de escape (Shang, 1988). Si los gases de escape van directamente a los alrededores no sólo ha de tenerse en cuenta la energía desperdiciada si no también la contaminación. En áreas frías, con el empleo de tubos de calor se puede aprovechar esta energía.

Control de temperatura

La temperatura de un TC se establece de modo que las cantidades de calor que entren y salgan sean iguales. Si las condiciones que afectan a la transferencia de calor hacia o desde el tubo de calor cambian, su temperatura de operación variará. El mantenimiento de la temperatura del tubo de calor de un modo casi constante, a pesar de las variaciones en la entrada y salida de calor, pueden estar establecidas como una condición específica del diseño. En estas situaciones suelen utilizarse tubos de calor de conductancia variable. Algunas aplicaciones para control térmico se realizan en satélites, como es el caso del satélite de comunicación marítima Marecs (Koch, 1983), pero donde mejor se manifiesta su aplicación en este campo es en aquellos procesos que poseen requerimientos muy estrictos, como es el caso de los laboratorios de calibración.

Otra de las aplicaciones es en ingeniería de climatización, donde en las instalaciones es importante que las condiciones de temperatura de las corrientes de aire se mantengan constantes, pues pueden producirse situaciones de discomfort térmico por variaciones sinusoidales en la temperatura del aire de impulsión. Una de las características importantes de los TC para este trabajo de investigación, además de la recuperación de calor, ha sido el conseguir eliminar las posibles fluctuaciones en la temperatura del aire de impulsión hacia la cámara climática actuando como un rectificador térmico.

Aplicaciones de los tubos de calor en refrigeradores termoeléctricos

Los tubos de calor también se pueden emplear exitosamente en otros tipos de máquinas refrigeradoras como, por ejemplo, los refrigeradores termoeléctricos. Las propiedades de los tubos de calor se emplean aquí para transferir y transformar el flujo de calor. Algunas veces, el área de la superficie de entrada de calor y de salida de calor se necesita que no sea la misma. De esta manera, el tamaño del elemento Peltier es pequeño, y la superficie de salida de calor se necesita que sea mayor o que tenga una forma específica (Figura 3.18). La combinación tubo de calor-elemento Peltier se puede emplear en sistemas médicos, como la crio-cirugía. Por ejemplo, existen dispositivos para las hipotermias basados en tubos de calor, en fase de prueba (Vasiliev, 1995).



Figura 3.18 Tubo de calor combinado con elemento Peltier (Vasiliev, 1995).

Refrigeración de componentes electrónicos

El TC, como elemento de transferencia de calor de alta eficiencia, está ampliamente extendido en la industria de refrigeración de componentes electrónicos y en los sectores de eficiencia energética (Figura 3.19). De hecho ésta es una de sus más características aplicaciones hoy en día. Pueden estar embebidos con sumideros de calor de aluminio para mejorar la eficiencia de refrigeración y/o la compactación de dispositivos de enfriamiento (Pastukhov, 2003).

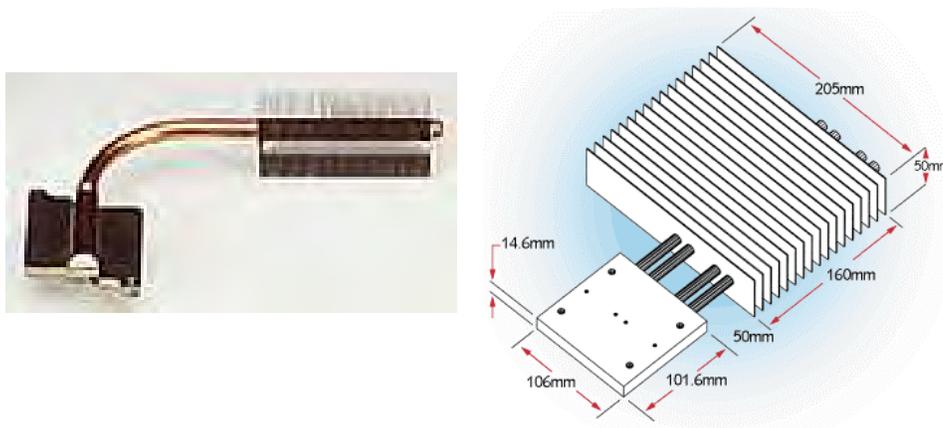


Figura 3.19 Fotografía y esquema dimensional de un dispositivo de tubos de calor empleados para refrigeración de la CPU en computadoras de mesa (Pastukhov, 2003).

Hoy en día estos dispositivos de tubos de calor han evolucionado enormemente y además de alcanzar los requerimientos de rendimiento de probada estabilidad térmica, son capaces de reducir el ruido (Kim, 2003).

Los tubos de calor pueden integrarse fácilmente en la mayoría de los colectores solares. La diferencia básica, en el rendimiento térmico, entre un colector solar de tubos de calor y uno convencional estriba en los procesos de transferencia de calor desde la pared del tubo absorbedor a la energía transportada por el fluido (Figura 3.20) (Riffat, 2005).

Un aspecto que hace atractivo los tubos de calor para emplearlas en colectores solares es su capacidad para operar como un diodo térmico, ya que funciona como termosifón, esto es, el flujo de calor se transfiere en una única dirección. Esto minimiza las pérdidas de calor desde el fluido de transporte, por ejemplo agua, cuando la radiación incidente es baja.

Por otro lado, cuando se alcanza la temperatura de diseño máxima se previene el sobrecalentamiento del fluido circulante, un problema común en muchas aplicaciones de colectores solares (Chung, 1999).

Los colectores solares de placas planas con tubos de calor tienen sus propias ventajas como son: estructuras más sencillas, menor costo, más facilidad de fabricación y operación más sencilla.



Figura 3.20 Colector solar prototipo de tubos de calor con membranas delgadas (Riffat, 2005).

Cocinas solares que integran colectores de tubos de vacío y tubos de calor.

Desde que en 1974 Swet introdujo su prototipo se han desarrollado numerosos trabajos en este campo.

El sistema de cocina solar consta de tres componentes principales: colector, tubos de calor y sección de horno. Los tubos de calor son de cobre con un diámetro de 6.32 mm y una longitud de 1m. Siendo pintada su superficie expuesta. Se encuentran doblados y guiados directamente a la unidad del horno mediante una sección adiabática de 0.5m. (Figuras 3.21 y 3.22).

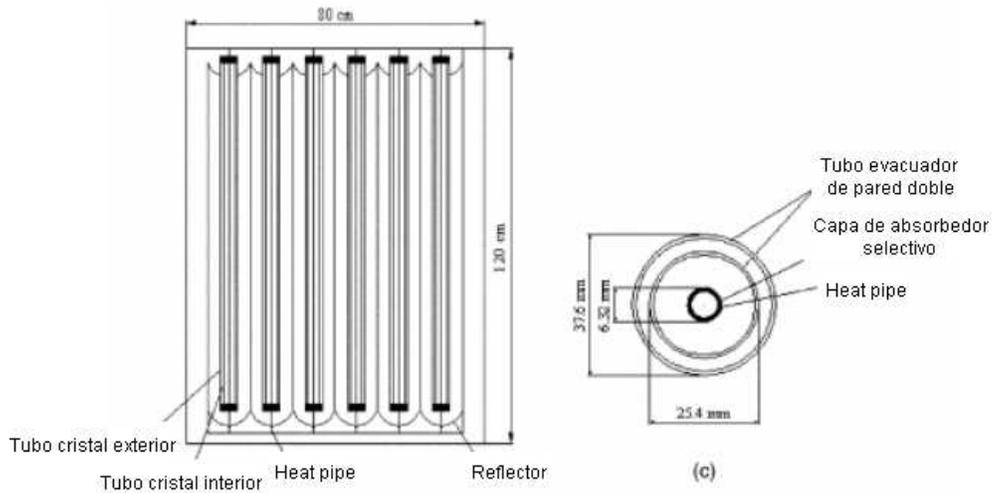


Figura 3.21 Vista frontal y vista transversal de un tubo colector con tubo de calor integrado (Esen, 2004).

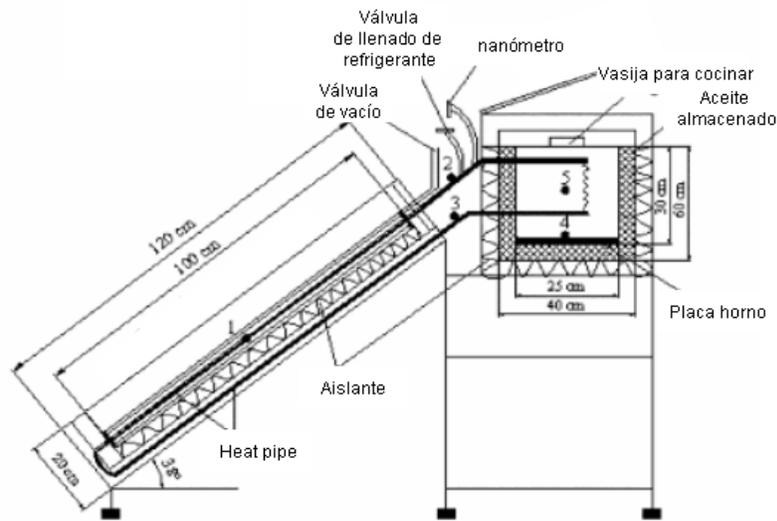


Figura 3.22 Vista lateral de la cocina solar (Esen, 2004).

Capítulo IV. Diseño y construcción de un recuperador de energía tipo tubos de calor.

Existen estudios en donde se resalta la importancia de los bancos de tubos de calor para la recuperación de energía (FEES, 1991) (Mike, 1993) (Milton, 1997), en donde el aire de entrada a una temperatura ambiente elevada puede ser pre-enfriado por una corriente de aire frío de escape antes de su entrada al equipo de enfriamiento mediante un recuperador de energía (Ong y Alahi , 2003). Así también, según Khanh Dinh (1992) las aplicaciones de tubos de calor en sistemas de climatización para zonas tropicales permiten bajar los niveles de humedad, manteniendo el confort térmico interior y logrando ahorros sustanciales de energía en diferentes tipos de edificaciones.

Por lo anterior, el empleo de los tubos de calor ofrece excelentes oportunidades de reducir el consumo energético, dado que por sus características de operación, permite la transferencia de calor con cambio de fase en un espacio muy reducido, sin requerir energía adicional de suministro al sistema. En ese sentido y dada la problemática de derroche energético que se da en las regiones cálidas y húmedas, como lo es el Estado de Quintana Roo, es conveniente desarrollar una propuesta que permita amortiguar el consumo energético en las instalaciones, prioritariamente en la industria hotelera y en el sector comercial.

MATERIALES Y MÉTODOS

- Diseño de la estación experimental.
- Diseño y construcción del banco de tubos de calor.
- implantación del banco de tubos de calor en la instalación experimental, el cual, también considera a una unidad de acondicionamiento de aire AA, e interconexión de los dispositivos mediante ductos.

Diseño de la instalación experimental

El diseño de la instalación experimental se realizó atendiendo las necesidades térmicas de una instalación de aire acondicionado para 2 personas con el objetivo de conseguir un adecuado confort térmico y una buena calidad de aire interior. Sin embargo deben tenerse en cuenta criterios técnicos y económicos. Este último, debe de considerar la recuperación de la máxima cantidad de energía disponible en el proceso (Velasco, 1998).

La Figura 4.1 muestra una vista en planta del diagrama esquemático de la instalación, la cual, consta de una cámara climática CC, una unidad de aire acondicionado AA y un banco de tubos de calor TC. En el interior de la cámara hay dos ventiladores. Uno es para suministrar el aire primario que proviene de la unidad de aire acondicionado, indicado con la flecha en color rojo. El otro ventilador es para retornar hacia el exterior el aire secundario, indicado con la flecha en color azul. Ambas corrientes de aire intercambiarán su energía en el banco de tubos de calor TC. La configuración de la instalación es en circuito abierto, ya que la unidad de aire acondicionado en éste caso, no permite la recirculación.

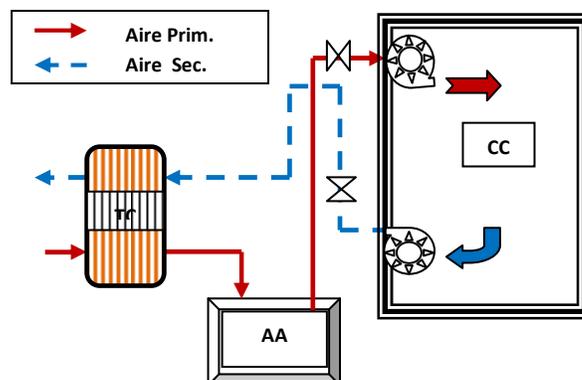


Figura 4.1 Diagrama de la instalación experimental.

4.1. Diseño y construcción del banco de tubos de calor.

Para la construcción del banco de tubos de calor se consideró la recuperación de 1000 W de potencia térmica, la cual es una magnitud típica en instalaciones de climatización (Flores 2008).

Los tubos de calor son de la marca Newark (Figura. 4.2), modelo CCI- DOC93480101 (Newark 2009), y tienen las características siguientes:

- Resistencia térmica: 0.007K/W
- Material de la carcasa: Cobre
- Diámetro exterior: 8mm
- Longitud: 300mm

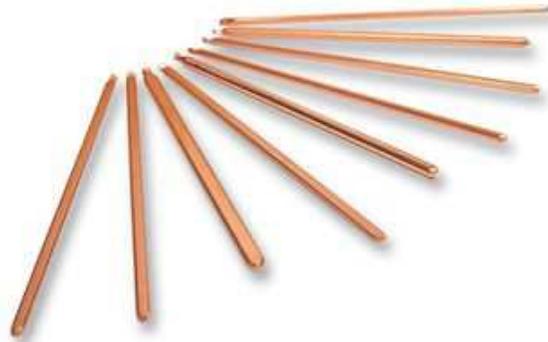


Figura 4.2 Tubos de calor utilizados en la instalación.

Además, de acuerdo a Newark (2009):

- ❖ Los tubos de calor contienen agua destilada como fluido de trabajo. Lo cual es propicio para trabajar en un rango de operación entre $+5^{\circ}\text{C}$ and 110°C .
- ❖ El relleno poroso consiste de compuesto sinterizado dispuesto en ranuras interiores.
- ❖ Baja resistencia térmica para transportar el calor desde la fuente caliente hacia el banco de tubos en arreglo rectangular.

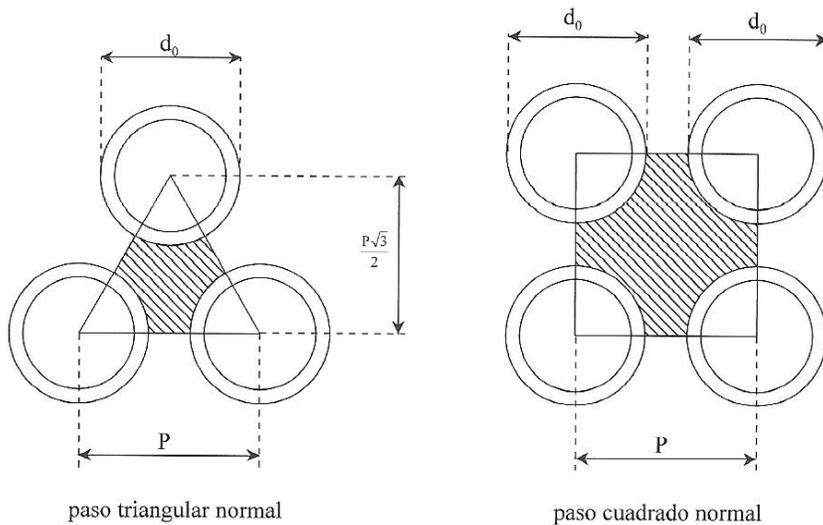
4.2. Distribución de los tubos de calor

Uno de los factores que influye en el diseño del banco de tubos es la separación y distribución geométrica que se tenga. El arreglo de tubos es de importancia relevante para evitar que existan caídas de presión acentuadas en el lado exterior de éstos, y así evitar cambios en la distribución de la velocidad del flujo. Asimismo, se requiere que exista un área de transferencia máxima o ideal, la cual, sería la representada en una sección transversal, que también permita la limpieza mecánica por el exterior de los tubos (Oseguera y Reséndiz, 1985).

De acuerdo a estudios realizados de flujo de fluidos, los principales tipos de arreglos geométricos en un banco de tubos son:

- Arreglo triangular, escalonado o en tresbolillo.
- Arreglo en cuadro o alineado.

Para determinar cuál de los arreglos anteriores es el adecuado para el banco de tubos, se debe calcular el área libre que se encuentra sombreada entre los tubos en la Figura 4.3, para lo cual se dice que el área unitaria es la que se forma entre los tubos que determinan la figura geométrica, dicha área unitaria queda representada en la Figura 4.3 para arreglo triangular (izquierda) y en cuadro (derecha) respectivamente.



Figuras 4.3 Arreglos geométricos para banco de tubos.

La separación que existe entre centros de tubos adyacentes se denomina paso o pitch (P) y éste varía de 1 hasta 1.25 veces el diámetro exterior del tubo. La determinación del pitch y el diámetro exterior nos permiten determinar el área unitaria del arreglo. Así,

Para el arreglo en cuadro:

$$\begin{aligned} \text{Area Unitaria} &= P^2 \\ \text{Area libre} &= P^2 - \pi \left[\left(\frac{d_0}{2} \right)^2 \right] \end{aligned}$$

Donde:

P: Paso o pitch. Separación de tubos adyacentes (mm).
 d_0 : diámetro exterior del tubo (mm).

Considerando un pitch (P) de tubos de $1.25 (d_0) = 10\text{mm}$ y teniendo $d_0 = 8\text{mm}$ el cálculo para un arreglo en cuadro sería:

$$\text{Area unitaria} = 10^2 = 100 \text{ mm}^2$$

$$\text{Area libre} = 10^2 - \pi \left[\left(\frac{8}{2} \right)^2 \right] = 49.73 \text{ mm}^2$$

Para un arreglo triangular, considerando que se trata de un triángulo equilátero, sería:

$$Area\ unitaria = \frac{P \left(\frac{P\sqrt{3}}{2} \right)}{2}$$

$$Area\ libre = \frac{P \left(\frac{P\sqrt{3}}{2} \right)}{2} - \frac{\pi \left[\left(\frac{d_o}{2} \right)^2 \right]}{2}$$

Considerando un pitch (P) de tubos de $1.25 (d_o) = 10\text{mm}$ y teniendo $d_o = 8\text{mm}$ el cálculo para un arreglo en triángulo sería:

$$Area\ unitaria = \frac{10 \left(\frac{10\sqrt{3}}{2} \right)}{2} = 43.3\ mm^2$$

$$Area\ libre = \frac{10 \left(\frac{10\sqrt{3}}{2} \right)}{2} - \frac{\pi \left[\left(\frac{8}{2} \right)^2 \right]}{2} = 18.16\ mm^2$$

De lo anterior se puede observar que para un mismo diámetro, el área unitaria en arreglo en cuadro es mayor que la del arreglo triangular y el área libre también lo es.

Dado que el área libre es mayor la caída de presión del fluido disminuye y se tiene la ventaja que se puede realizar limpieza mecánica por la parte exterior de los tubos.

Para el caso del arreglo triangular, aplicado a la transferencia de calor entre fluidos líquidos, la limpieza exterior de los tubos tiene que ser únicamente por medios químicos y se utilizará sólo para fluidos no incrustantes.

También hay que considerar que la reducción del área libre incrementa la caída de presión (perdida de carga) por el lado de la envolvente o coraza.

Por todo lo anterior para éste caso se ha optado por la disposición en cuadro, en virtud de que presenta la ventaja de una menor pérdida de carga. De ésta manera, considerando que el diámetro exterior de cada tubo es de 8 mm (0.8 cm), el paso o pitch sería igual a 1 cm. Asimismo, derivado de lo anterior se presentan dos parámetros adicionales, los cuales, permiten obtener la distribución del banco de tubos y en su caso serán determinantes en el valor del coeficiente de convección exterior de los tubos de calor. Tales parámetros corresponden a la distancia transversal entre tubos S_T y distancia longitudinal entre tubos S_L , tal como se muestra en la Figura 4.4

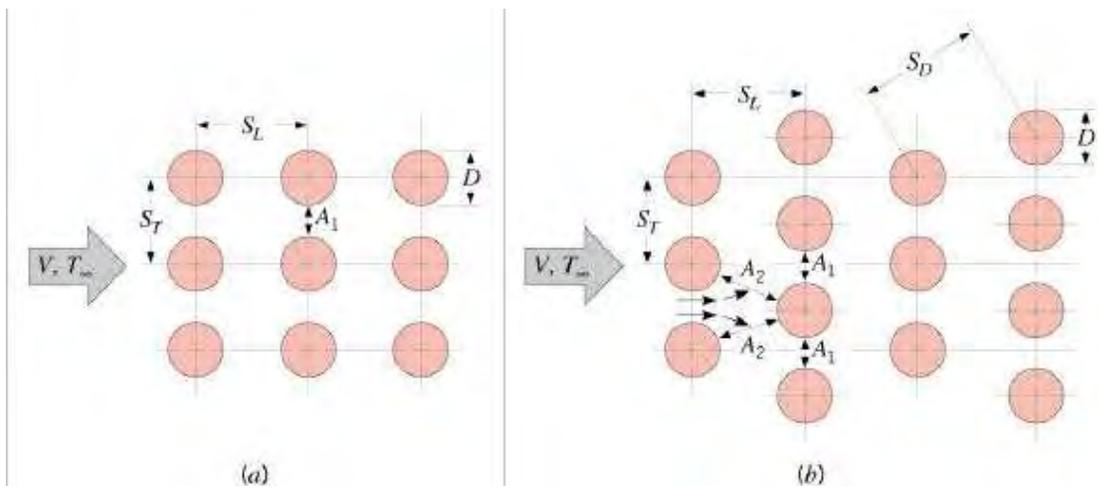


Figura 4.4 Distancia transversal y longitudinal para arreglos típicos de tubos en un banco: (a) en cuadrado (b) triangular.

4.3. Cálculo del coeficiente de convección.

Zhukauskas (1972), desarrolla una expresión en la que se relaciona el número de Nusselt medio (Nu_D) para todos los tubos que componen la batería con el número de Reynolds medio ($Re_{D,m}$) y el número de Prandtl (Pr), y tomando como dimensión característica el diámetro de los tubos, la expresión es de la forma:

$$Nu_D = C Re_{D,m}^n Pr^{0.36} \left[\frac{Pr}{Pr_s} \right]^{1/4} \quad (1)$$

Las constantes C y n , dependen de la distancia entre tubos adyacentes y de la distancia entre filas de tubos en la misma dirección de flujo, así como de la distribución de los tubos, bien sea alineada o alterna. Los valores de la correlación de Zhukauskas, para diferentes valores de $Re_{D,m}$, calculado para una velocidad media U_m de la corriente de aire a través de los tubos, se presentan en la Tabla 4.1. Así,

$$Re_{D,m} = \frac{U_m D}{\nu} \quad (2)$$

El valor de U_m según Karlekar (1985):

$$U_m = \frac{\text{razón de flujo}}{\text{área mínima de flujo}} \quad (3)$$

Donde:

Área mínima de flujo = área de flujo delante de los tubos – área proyectada de tubos bloqueando el flujo

Tabla 4.1. Valores para la correlación de Zhukauskas.

Intervalo de $Re_{D,m}$	Alineados		Alternos	
	C	n	C	N
10-100	0.8	0.4	0.9	0.4
100-1000	Corr. 1 Tubo	Corr. 1 Tubo	Corr. 1 Tubo	Corr. 1 Tubo
1000- $2 \cdot 10^5$	$S_T/S_L > 0.7:0.27$	$S_T/S_L > 0.7:0.63$	$S_T/S_L < 2:0,35$ $S_T/S_L > 2:0,40$	$S_T/S_L < 2:(S_T/S_L)^{1/5} \cdot 0.6$ $S_T/S_L > 2:0.6$
$2 \cdot 10^5 - 10^6$	0.021	0.84	0.022	0.84

Esta correlación permite calcular el coeficiente de convección exterior al tubo, y será específico para cada caudal y temperatura del aire que está en contacto con los tubos de calor.

En los bancos de tubos con $Re < 10^5$ se considera que el flujo por lo menos es de transición y por lo tanto, a efectos de calcular el coeficiente de convección según recomienda Zhukauskas (1972), el coeficiente h promedio de la primera fila depende mucho de la turbulencia inicial, pero a partir de la tercera dependerá mayormente de la desarrollada por la disposición del banco de tubos, siendo aproximadamente constante a partir de ahí. Esta es la razón por la que los recuperadores de calor sólo presentan tres o cuatro columnas. Es la relación óptima de eficacia-costo para medias y bajas temperaturas. La figura 2 muestra la relación h_{m1}/h_{m3} con respecto al número de columnas según el tipo de arreglo del banco de tubos (Prieto, 1994).

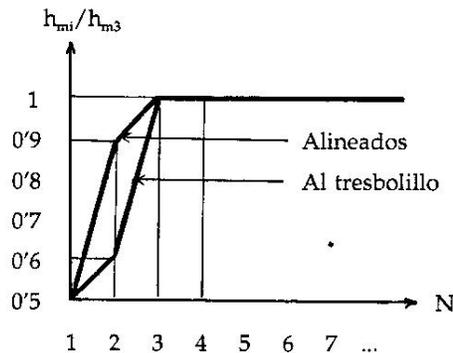


Figura 4.5 Relación h_{m1}/h_{m3} vs. N° de columnas por tipo de arreglo.

En éste caso, para 15 tubos de calor, se ha elegido una distribución en cuadro de 5 hileras x 3 columnas, justificada inicialmente para tener una buena distribución del aire a la entrada de la batería, y sobre todo por presentar menos complejidad su construcción. Así, aplicando la ecuación (1) y para esta disposición, si $100 < Re_D < 1000$, no habrá que corregir el valor de Nu_D medio, pero si $Re_D > 1000$, el valor del Nu_D medio para todos los tubos será el obtenido con la correlación multiplicado por un factor de

0,9, según Zhukauskas (1972). Este factor de corrección se calcula con la gráfica de la figura 4.6.

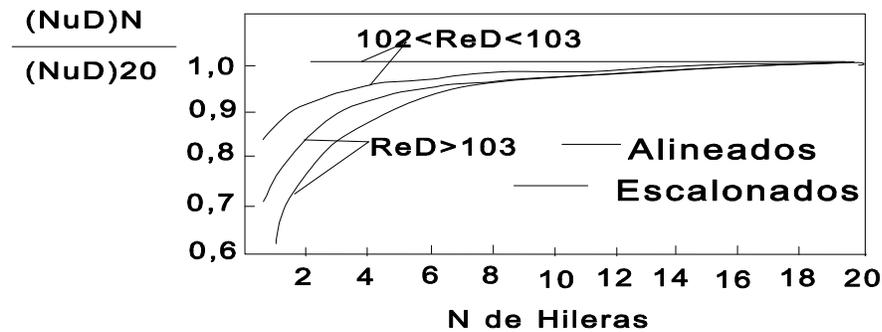


Figura 4.6. Cálculo del factor de corrección.

Por lo anterior, considerando que el área de flujo delante de los tubos pasa a través de un ducto de 11 x 11 cm de diámetro (longitud del evaporador y del condensador del tubo de calor), y según la ASHRAE (1997), un caudal mínimo por persona de 35 m³/h, que en nuestro caso sería para dos personas ubicadas en una oficina (0.01944 m³/s), y el caudal será constante en toda la instalación, se tiene:

$$\text{Área de paso} = 0.11 \times 0.11 = 0.0121 \text{ m}^2$$

$$\text{Área proyectada de los tubos} = S_T \cdot N^{\circ}_{\text{tubos}} \cdot L_{\text{tubos}} = 0.01\text{m} \cdot 5 \cdot 0.11\text{m} = 0.0055 \text{ m}^2$$

$$U_m = \frac{0.01944}{(0.0121 - 0.0055)} = 2.94 \text{ m/s}$$

Considerando la viscosidad del aire (30°C) de 16x10⁻⁶ m²/s, se determina el número de Reynolds como sigue:

$$Re_{D,m} = \frac{(2.94)(0.008)}{16 \times 10^{-6}} = 1470.0$$

También,

$$S_T/D = 1.0 \text{ y } S_L/D = 1.0; S_T/S_L = 1.0$$

Para determinar el Nu, con la ecuación (1), se toman los valores de la tabla 1 para C y n, y considerando $S_T/S_L > 0.7$ queda: C=0.27 y n = 0.63. El N° de Prandtl se toma de las tablas de propiedades termofísicas de las sustancias. En éste caso, según Karlekar (1985), para el aire a 303 K (30°C), el Pr=0.707. Por lo tanto:

La relación $\left[\frac{Pr}{Pr_s}\right]^{1/4} \approx 1$. Así, el N° de Nusselt queda:

$$Nu_D = 0.9 (0.27) Re_{D,m}^{0.63} Pr^{0.36} (1.0) = 21.20$$

El coeficiente de convección medio exterior a los tubos se determina con la siguiente ecuación:

$$h_m = \frac{Nu_D k}{D} \quad (4)$$

Donde:

k : es la conductividad térmica del aire a la temperatura de circulación (30°C). Así, según Karlekar (1985), $k = 0.0263 \text{ W/m K}$.

D : diámetro equivalente del banco de tubos (4 x área frontal de flujo / perímetro mojado).

El diámetro equivalente queda:

$$D = 4 (0.0121) / (0.11 \times 4) = 0.11 \text{ m}$$

Por lo tanto, el h_m queda:

$$h_m = 21,2 (0.263) / 0.11 = 5.06 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

El valor anterior corresponde al coeficiente de convección exterior medio del banco de tubos para la transferencia de calor tanto en el lado del evaporador como en el lado del condensador de los propios tubos de calor.

4.4. Construcción del banco de tubos de calor

Considerando los caudales de aire a manejar, las temperaturas de aire suministrado a diferentes condiciones experimentales y el arreglo rectangular de los TC se consideró la siguiente configuración:

La carcasa con los tubos es de 38 x 19 cm y se embocará mediante dos tolvas en dos conductos paralelos de 11 cm de diámetro, sobre un soporte horizontal y separado 8 cm para dejar una zona intermedia aislada que será la zona adiabática de separación del condensador y evaporador en los heat pipes (Fig. 4.8).



Figura 4.8 Montaje de los quince tubos de calor en las placas de soporte (espejos) de la carcasa.

Después de montar los tubos de calor en los espejos, se procedió a terminar de ensamblar la carcasa que tiene una forma que propicia el efecto venturi para aumentar la velocidad del flujo y así hacer más eficiente.

El efecto Venturi (también conocido tubo de Venturi) consiste en que un fluido en movimiento dentro de un conducto cerrado disminuye su presión al aumentar la velocidad después de pasar por una zona de sección menor. Si en este punto del conducto se introduce el extremo de otro conducto, se produce una aspiración del fluido que va a pasar al segundo conducto. Este efecto, demostrado en 1797, recibe su nombre del físico italiano Giovanni Battista Venturi (1746-1822).

El efecto Venturi se explica por el Principio de Bernoulli y el principio de continuidad de masa. Si el caudal de un fluido es constante pero la sección disminuye, necesariamente la velocidad aumenta tras atravesar esta sección. Por el teorema de la conservación de la energía mecánica, si la energía cinética aumenta, la energía determinada por el valor de la presión disminuye forzosamente como se muestra en la figura 4.9.

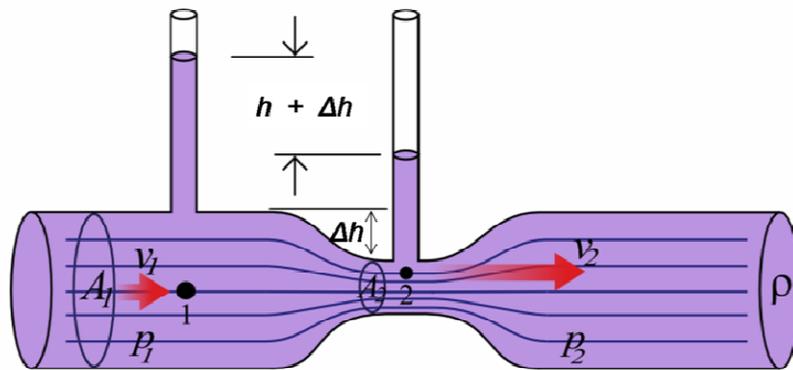


Figura 4.9 Diagrama esquemático del efecto Venturi.

El sistema de recuperación ya terminado se puede apreciar en la Figura 4.10.

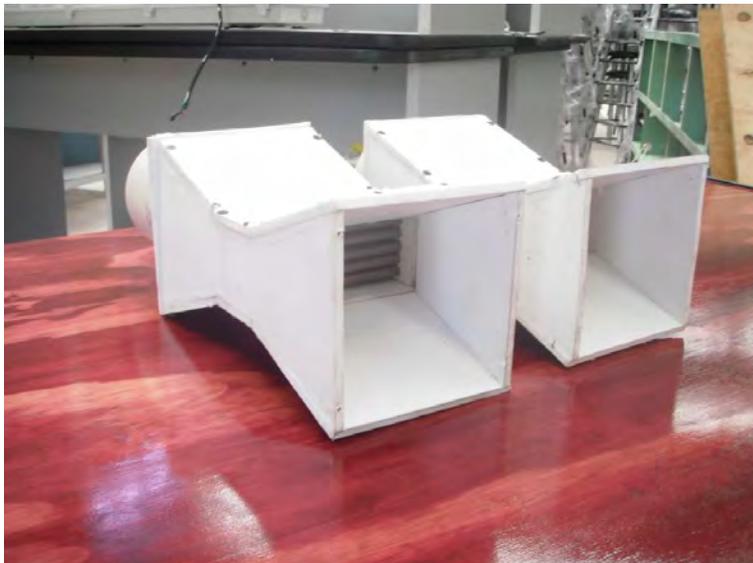


Figura 4.10. Recuperador de energía terminado.

4.5. Construcción de la cámara climática

La función de la cámara climática es simular las condiciones de un proceso de acondicionamiento de aire en un espacio controlado mediante la inyección de caudales significativos de aire primario. Asimismo, permite estudiar los efectos de la proporción de aire reciclado o secundario en función de la necesidad energética del propio proceso de acondicionamiento de aire.

En la cámara se han medido las condiciones higrotérmicas (humedad relativa y temperatura de bulbo seco). De esta manera, se pueden controlar las condiciones de confort interior (aproximadamente 25°C y 50% de H.R.). Los aspectos relacionados en la evaluación del confort térmico estarán determinados en base a la Norma UNE EN ISO 7730, 1996, (versión española de la ISO 7730) en donde se consideran las especificaciones de las condiciones para el bienestar térmico.

La cámara climática es de 1.20 m de ancho por 2.40 m de fondo por 2.40 m de altura. Está construida mediante una estructura metálica de PTR de 1 ½" x 1 ½" c-16. Cuenta con rieles a los costados a base de ángulo de 1" para montar placas de cimbraplay y PVC como muros y envolvente, tal como se muestra en la Figura 4.11, además tiene una puerta frontal con ventana fija para permitir el acceso al interior.

Dicha cámara permitirá el alojamiento de un máximo de dos personas trabajando con su respectiva computadora portátil para estudios de confort térmico.



Figura 4.11 Cámara climática.

4.6. Implantación del recuperador de energía en la instalación experimental.

El desarrollo de esta tarea consiste en ensamblar mediante conductos de aire y tuberías el recuperador de energía y la unidad de Aire Acondicionado a la cámara climática para conformar la estación experimental.

Se dispone el sistema de manera que se obtenga una configuración de flujo que permita operar en un ciclo de aire recuperativo de energía, aprovechando las características térmicas del aire de retorno. La disposición de la estación experimental incluye los equipos auxiliares de ventiladores, ductos, reguladores de flujo, medidores de flujo y sus respectivas conexiones eléctricas.

Ventiladores.- Se tienen dispuestos dos ventiladores extractores centrífugos. Marca: MEXCAN, modelo: ED1000 (Fig. 4.12), para aumentar la velocidad de flujo del aire primario y secundario de la instalación. Las características de éstos equipos son las siguientes: 127 V~; 60 Hz; ¼ HP; 1700 m³/h (1000CFM). El ventilador de aire primario se encuentra instalado en la parte superior, al fondo del costado izquierdo de la cámara climática. El ventilador de aire secundario se encuentra instalado en la parte media inferior del mismo costado.



Figura 4.12 Ventilador centrífugo para el aire primario y secundario.

El ventilador de aire primario se encuentra instalado en la parte superior, al fondo del costado izquierdo de la cámara climática (Fig. 4.13). El ventilador de aire secundario se encuentra instalado en la parte inferior del mismo costado (Fig. 4.14).



Figura 4.13 Ventilador de aire primario instalado.



Figura 4.14 Ventilador de aire secundario en posición.

Ductos.- Los ductos tienen por función conducir los flujos de aire primario y secundario en la instalación. Están contruidos en material de PVC de 15.24 cm (6") de diámetro y aislados térmicamente con fibra de vidrio recubierta con capa de aluminio flexible. El ducto de aire primario está instalado desde la embocadura dispuesta verticalmente en la salida de aire frío de la unidad de aire acondicionado de la figura 4.15, pasando horizontalmente a través de una placa de orificio y finalmente pasar por la válvula de flujo (dámper) de 15.24 cm (6"), dispuesta verticalmente en conexión con la succión del ventilador extractor de la figura 4.16.



Figura 4.15. Ducto de aire primario a la salida de la unidad de aire acondicionado.



Figura 4.16. Ducto de aire primario acoplado a la placa de orificio, al dámper y al ventilador

El ducto de aire secundario está instalado desde la embocadura dispuesta horizontalmente en la salida del propio ventilador de aire secundario instalado en el interior de la cámara climática. En la Figura 4.15, se muestra que el ducto primero se conecta horizontalmente con una válvula de flujo (dámper) de 15.24 cm (6") y luego con una placa de orificio mostrada en la Figura 4.6. Posteriormente toma dirección vertical para dejar disponible la conexión hacia el sistema de recuperación de energía (banco de tubos de calor), tal como se muestra en la Figura 4.17.



Figura 4.17. Ducto de aire secundario a la salida de la cámara climática y acoplado al dámper



Figura 4.18. Ducto de aire secundario acoplado a la placa de orificio.

Reguladores de flujo.- También denominados “dámper”, son propiamente válvulas para regular el caudal tanto de aire primario y secundario. Están fabricados en lámina galvanizada y tienen 15.24 cm (6”) de diámetro. En las figuras 4.14. y 4.15., se muestra la disposición de dichos elementos en la instalación.

Placas de orificio.- Estas placas son dispositivos que permiten determinar el flujo o caudal del aire primario y secundario que circula por los ductos. Para la instalación de éste proyecto se consideraron dos de la marca Dwyer de la serie PE-L-1 (Figs. 4.19 y 4.20), cuyas características son:

- Aplicaciones: aire limpio y gases compatibles.
- Material: construido en PVC con juntas de Buna-n.
- Precisión: $\pm 0.6\%$ con flujo a escala completa. (Beta = 0.2 – 0.6); $\pm 0.7\%$ para beta mayor de 0.6.
- Temperatura: 60°C máxima.
- Presión: 150 psi máxima.
- Tamaño: 6” de diámetro.
- Conectores: hembra de $\frac{1}{4}$ ” NPT.
- Requerimientos de tubería: instalar a 10 diámetros corriente arriba y 5 diámetros corriente debajo de los accesorios dispuestos.

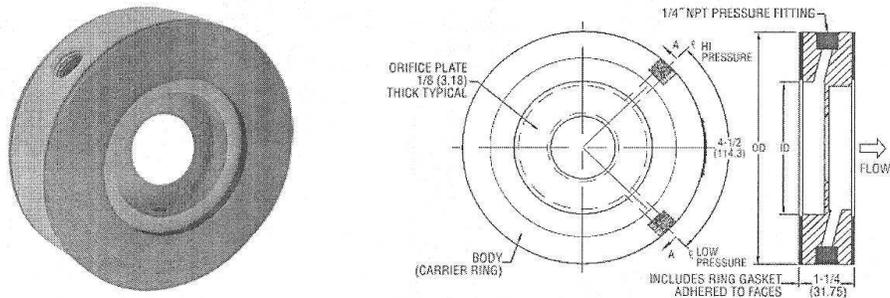


Figura 4.19 Placas de orificio Dwyer serie PE-L-1.

Considerando que las propias placas de orificio no contaban con elementos de sujeción, se diseñaron y construyeron las bridas de soporte para disponerlos en la tubería de 6" de diámetro. La Figura 4.19 muestra a la placa de orificio antes de montarlas en las bridas de sujeción. Las Figuras 4.20 y 4.21 muestran las bridas de sujeción construidas a partir de dos anillos de PVC unido a dos tramos de tubería de 6" respectivamente. Ambas bridas están sujetas mediante cuatro tornillos que atraviesan sendos orificios practicados para tal fin.



Figura 4.20 Placa de orificio previa a su montaje con las bridas de sujeción.

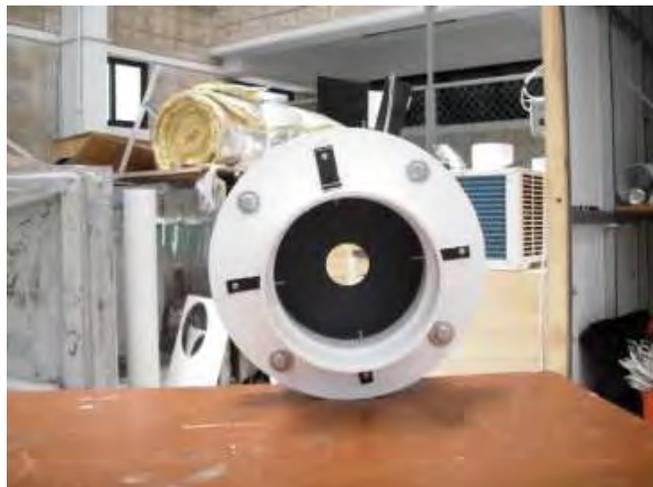


Figura 4.21 Vista frontal de la placa de orificio con sus bridas de sujeción.



Figura 4.22. Vista lateral de la placa de orificio con sus bridas de sujeción.



Figura 4.23. Placa de orificio utilizada para medir el flujo de aire en la instalación.

Unidad de climatización.- Esta unidad es el sistema de aire acondicionado que proporcionará el aire fresco (aire primario) hacia la cámara climática se muestra en la Figura 4.24. Es de la marca Mirage modelo MACC0811J y cuyas dimensiones son de 63.5 cm (25") de ancho por 35.6 cm (14") de altura. Los datos técnicos de la unidad son: 115V~; 7.3 A; 811 W; 60 Hz. Opera a una fase y es de una capacidad de 8000 Btu/h.



Figura 4.24. Unidad Mirage de aire acondicionado.

La unidad cuenta con tres niveles de enfriamiento y dos de ventilación, así como siete niveles de temperatura. En éste trabajo la unidad se ajustó al máximo nivel de enfriamiento y de temperatura (High Cool y Cooler 7), con el fin de estudiar el consumo energético máximo con estos niveles de operación en la unidad. Se consideró el estudio de la propia unidad por sí sola en la instalación y cuando se implementa el sistema de recuperación de energía con los tubos de calor (heat pipes).

Asimismo, La unidad tiene la característica de que el aire atmosférico es admitido en la parte inferior del panel frontal y el aire fresco de suministro (aire primario) es impulsado por la parte superior del mismo panel. Para poder implementar dicha unidad en la instalación se hicieron modificaciones en el panel frontal de modo que se diseñaron y construyeron dos cámaras de PVC, una de admisión de aire atmosférico y otra adyacente superior para el aire primario, dispuestas en el propio panel. La figura 4.25 muestra ambas cámaras embocadas con sus respectivas conexiones para adaptarse a la tubería de 15.24 cm (6") de la instalación.



Figura 4.25. Cámara de admisión de aire atmosférico y de descarga del aire primario.

Centro de carga.- La instalación cuenta con un centro de carga para el suministro eléctrico y protección del equipo de aire acondicionado. Es de la marca Square D, tipo QO2 con dos interruptores termo magnéticos de 1 x 15 A.

Instalación.- La instalación que se muestra en la Figura 4.26, quedará conformada por el conjunto de cámara climática, unidad de climatización y el banco de pruebas de tubos de calor, considerando los accesorios: tubería, codos, conectores, placas de orificio e instalación eléctrica.



Figura 4.26 Vista general de la instalación

4.7. Instrumentación de la instalación y monitoreo de variables

Una vez terminada la instalación del recuperador de energía, se procedió a efectuar el montaje de diversas sondas de medida y sus conexiones a los sistemas de adquisición de datos. De esta manera se pudieron desarrollar una serie de pruebas experimentales efectuando el monitoreo de diferentes variables que permitieron realizar el estudio energético para caracterizar la instalación.

Sensores de temperatura.- Para medir la temperatura en los puntos clave de la instalación se tienen disponibles termopares tipo “J” (hierro-constantán), calibre 20. Este termopar se caracteriza por su aplicación en ambientes no oxidantes. Su rango es continuo hasta los 250 ° C y tiene una respuesta de 0.055 mV/° C.

Sistema de adquisición de datos.- Un sistema adquiridor de datos (Figura 4.26) transforma las señales de tensión procedentes de sensores de temperatura en valores numéricos para su posterior representación gráfica y análisis. El sistema de adquisición de datos utilizado en la instalación ha sido un «Agilent 34970A».



Figura 4.27 Equipo de adquisición de datos marca Agilent modelo 34970A.

Sensor de humedad relativa.- Para determinar la humedad relativa del aire exterior y en el interior de la Cámara climática, se utilizó un termo higrómetro de la marca TENMA, Modelo 72-6785^a mostrado en la Figura 4.28, el cual opera dentro de los siguientes rangos: Humedad relativa (%): 10 – 95;

Temperatura de bulbo seco (°C): 0 – 50.



Figura 4.28 Termo higrómetro de la marca TENMA, Modelo 72-6785A.

Analizador de calidad de energía.- El analizador de calidad de potencia Fluke, modelo 435 que se puede observar en la Figura 4.29 permite la medición y monitoreo de diversas variables en los sistemas de distribución y de alimentación de energía eléctrica, entre otras, demanda y consumo eléctrico. Este analizador presenta las siguientes características: Voltaje máximo de entrada 1000Vrms (600 kVpico); Corriente máxima 3000 A, trifásico con 5 puntas de voltaje y 4 puntas flexibles para medición de corriente; Frecuencia: 50-60 Hz.

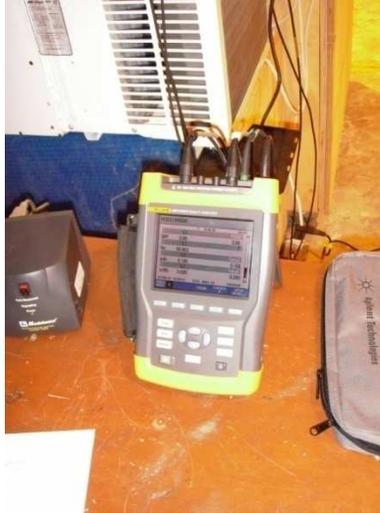


Figura 4.29. Analizador de energía eléctrica marca Fluke, modelo 435.

También fue necesario calibrar los termopares para evitar lecturas erradas para este fin se utilizó el equipo Fluke que se muestra en la Figura 4.30, el cual funciona poniendo los termopares en cada uno de los pozos para determinar con exactitud el factor de corrección que se le aplicaran a las mediciones posteriores.

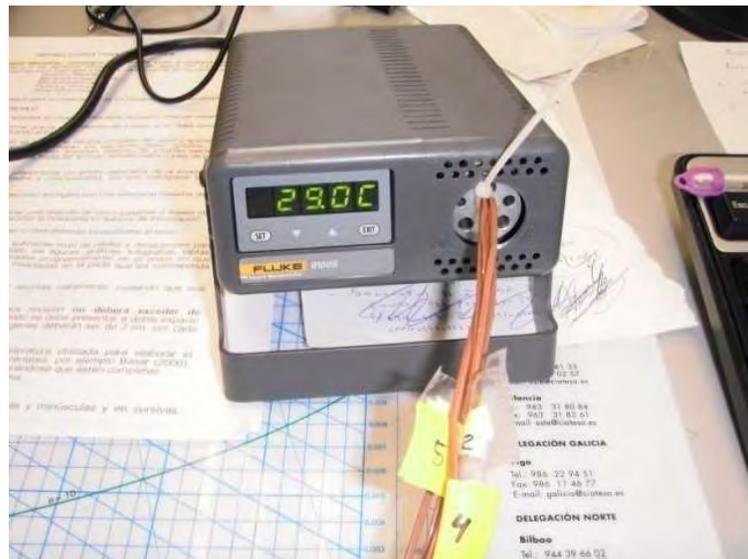


Figura 4.30 Fluke termopozos.

Equipo que se utilizó para determinar la velocidad de flujo de aire en las pruebas experimentales Figura 4.31.



Figura 4.31 Anemómetro de tipo turbina marca PROVA modelo AVM-03.

Capítulo V Experimentación y Análisis de Resultados

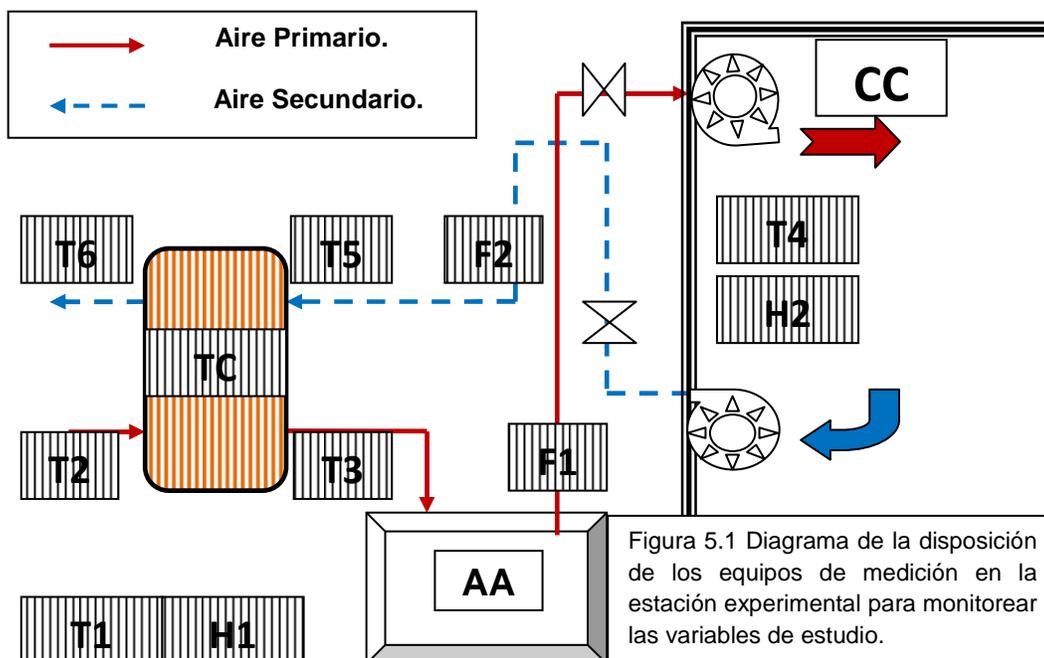
En éste capítulo se presenta los resultados del análisis matemático de las mediciones tomadas en los diferentes experimentos a los que se sometió la instalación del recuperador de energía, también muestra graficas de todas las pruebas que incluyen potencia eléctrica, consumo eléctrico y eficiencia en la recuperación de energía además de gráficas comparativas que permiten hacer una evaluación más clara de las diferencias en potencia, eficiencia y consumo eléctrico.

5.1. Variables de estudio para la experimentación.

Como se muestra en la Figura 5.1 los diferentes experimentos realizados en la cámara climática se tomaron en cuenta las siguientes variables:

- Temperatura ambiente = T1.
- Humedad ambiente = H1.
- Temperatura dentro de la cámara climática = T4.
- Humedad dentro de la cámara climática = H2
- Temperatura de aire primario antes del recuperador = T2.
- Temperatura de aire primario después del recuperador = T3.
- Temperatura aire secundario antes del recuperador = T5.
- Temperatura de aire secundario después del recuperador = T6.
- Flujo de aire primario = F1.
- Flujo de aire secundario = F2.
- Energía y potencia eléctrica consumida por la unidad enfriadora.

Todo esto con los equipos de medición colocados de la siguiente manera:



5.2. Condiciones experimentales.

Las pruebas experimentales que se realizaron fueron

1. Sin recuperador de Energía y flujo al 100%
2. Con recuperador de energía y flujo al 33%
3. Con recuperador de energía y flujo al 66%
4. Con recuperador de energía y flujo al 100%

5.3. Obtención de datos experimentales

Cada prueba experimental fue realizada de la siguiente manera:

- Se realizaron 5 experimentos con diferentes temperaturas de entrada a intervalos de 3 grados (30, 33, 36, 39 y 42 °C respectivamente).
- Para cada experimento se tomaron mediciones cada 10 minutos en un lapso de dos horas.
- Con el máximo nivel de enfriamiento en la unidad de aire acondicionado (N7, modo High).

Para el análisis de los resultados de las pruebas se tomaron en cuenta el promedio de las mediciones obtenidas durante las 2 horas del experimento para cada variable, temperatura, caudal y potencia eléctrica, para el caso de la energía se tomo en cuenta el total del consumo eléctrico durante toda la prueba.

5.4. Resultados de Potencia (W)

Temperatura °C	Sin recuperador	Prueba 2a	Prueba 2b	Prueba 2c
30	762	734	729	743
33	774	727	734	736
36	784	738	742	741
39	799	746	741	747
42	814	753	744	752

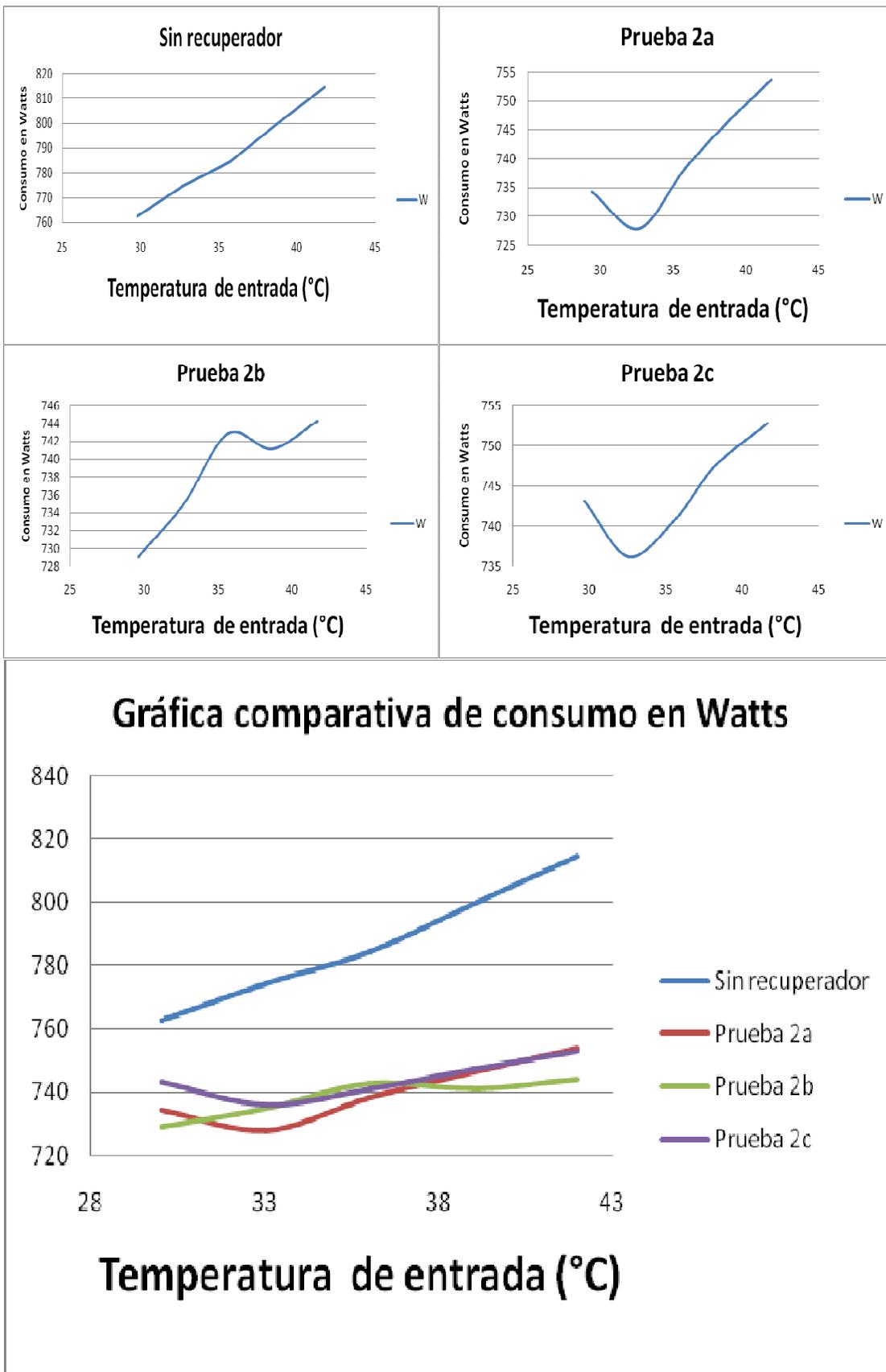


Figura 5.2 Gráficas de la potencia eléctrica con relación la temperatura de aire de impulsión.

5.5. Resultados de Energía (kWh):

Temperatura	Sin recuperador	Prueba 2a	Prueba 2b	Prueba 2c
29,6	1,52	1.46	1,45	1,48
32,6	1,54	1.45	1,46	1,47
35,6	1,56	1.47	1,48	1,48
38,1	1,59	1.49	1,48	1,49
41,6	1,62	1.50	1,49	1,50

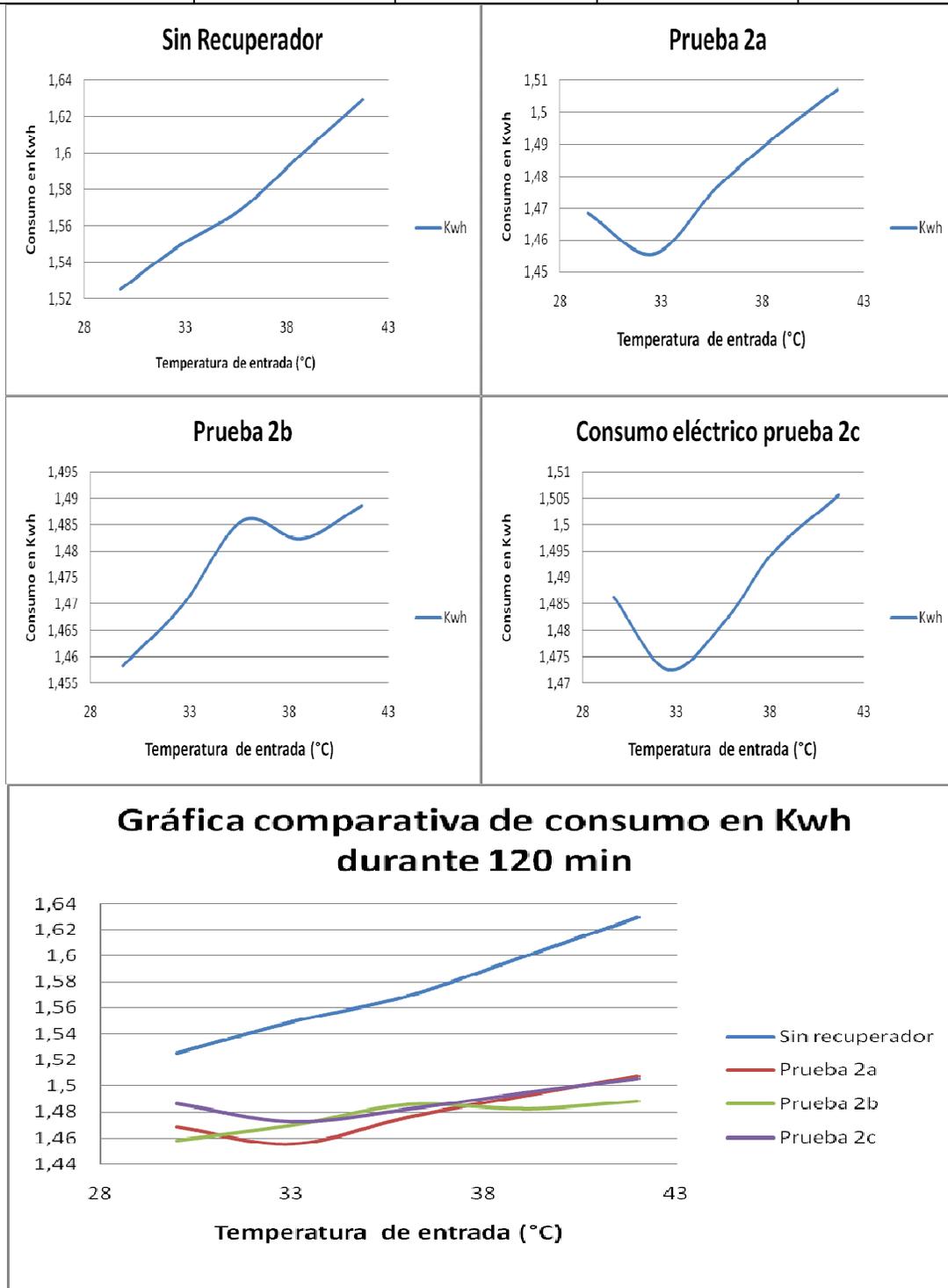


Figura 5.3 Gráficas del consumo de energía eléctrica con relacion la temperatura de aire de impulsión.

5.6. Resultados de Eficiencia.

Para el cálculo de la eficacia recurrimos a una fórmula de transferencia de calor específicamente formulada para dispositivos de recuperación de energía (Karlekar, 1985), que nos dice básicamente que la eficacia es la razón entre la energía recuperada y la que es posible recuperar.

$$\text{Eficacia} = \frac{\text{Energía recuperada}}{\text{Energía que es posible recuperar}} \quad (1) \text{ (Karlekar, 1985).}$$

El flujo térmico o flujo de calor sensible recuperado (Q_{rec}) se determina mediante el producto del caudal másico (m) por el calor específico del aire ($C_p = 1005 \text{ J/kg } ^\circ\text{C}$) y multiplicando también a la diferencia de temperaturas de la corriente de aire de retorno que pasa por la zona de condensación de los tubos de calor, es decir, con (2):

$$Q_{\text{rec}} = m C_p \Delta T = m C_p (T_2 - T_3) \quad (2)$$

Por lo tanto el calor sensible que es posible recuperar (Q_{tot}) se define mediante (3).

$$Q_{\text{tot}} = m C_p \Delta T = m C_p (T_2 - T_5) \quad (3)$$

Ya que el gasto másico y el calor específico son iguales la eficacia va a estar dada solamente en función de las temperaturas, se multiplica por cien para que corresponda a un porcentaje (4).

$$\text{Eficacia} = 100 \left[\frac{T_2 - T_3}{T_2 - T_5} \right] \quad (4)$$

Donde:

T_2 : Temperatura del aire primario (impulsión) a la entrada del banco de TC ($^\circ\text{C}$).

T_3 : Temperatura del aire primario (impulsión) a la salida del banco de TC ($^\circ\text{C}$).

T_5 : Temperatura del aire secundario (retorno) a la entrada del banco de TC ($^\circ\text{C}$).

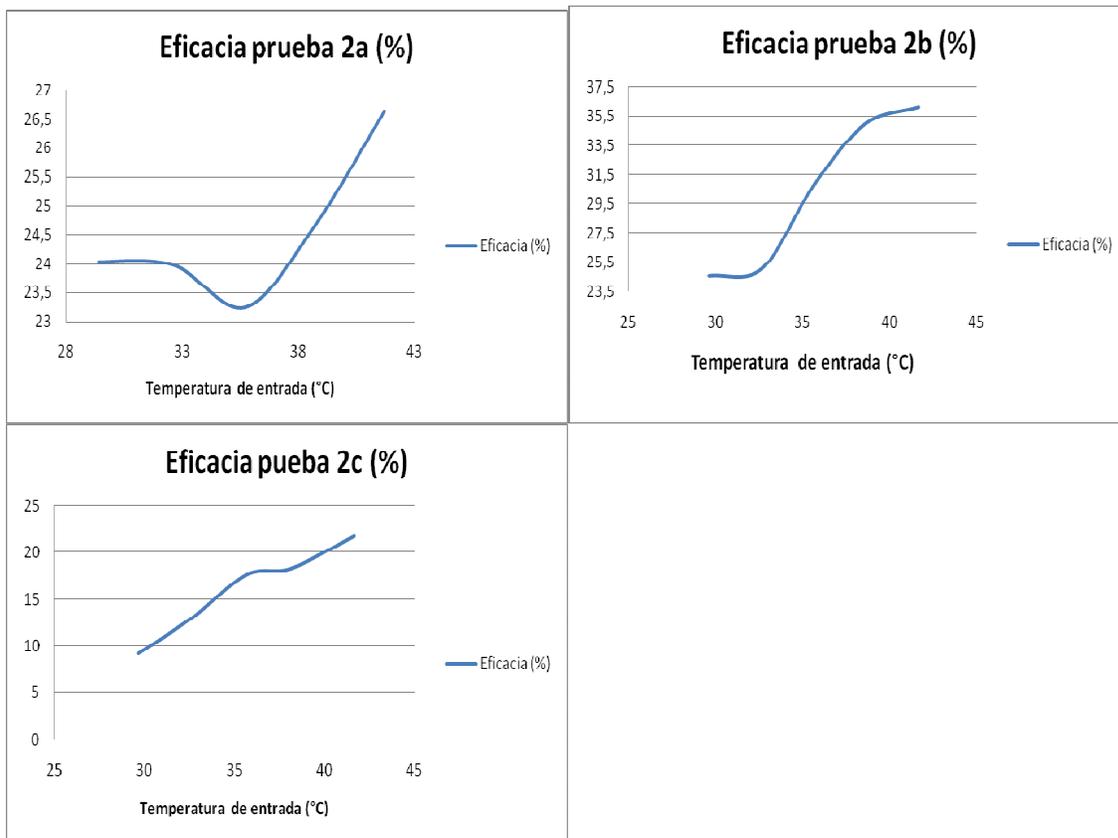


Figura 5.4 Gráficas de la eficiencia de recuperación del intercambiador de Tubos de Calor con relación a la temperatura de aire de impulsión.

Como se puede observar en la Figura, la eficacia aumenta conforme la diferencia de temperatura entre el aire del interior se incrementa con respecto al aire exterior, esto debido a que a mayor diferencia de temperatura mayor es la transferencia de calor, es decir que cuando las condiciones se hacen más extremas el recuperador aumenta su eficiencia con lo que se hace una recuperación aún mayor de energía bajo estas condiciones lo que permite tener una eficiencia máxima de aproximadamente 36%.

Conclusiones.

La aplicación de ésta tecnología representa un ahorro sustancial de energía para los sistemas de aire acondicionado.

La eficiencia de los tubos de calor queda demostrada al poder transferir cerca del 40% de la energía recuperable.

La disposición de los tubos de calor y la forma tipo vénturi del recuperador de energía mejoró la eficiencia de recuperación de energía.

Cuando la temperatura del aire exterior aumenta, también aumenta la eficiencia del recuperador evitando que el consumo de energía eléctrica tenga un aumento considerable.

El mejor desempeño de éste recuperador se logró con un flujo de 2 m/s por lo que es el flujo óptimo para el ahorro de energía y además es adecuado para 2 personas según las normas de la AHSRAE.

Este tipo de recuperadores de energía tienen un funcionamiento muy eficiente, no requieren mantenimiento y tienen una larga vida útil por lo que es muy recomendable invertir en su instalación.

La tecnología es confiable y tiene un comportamiento muy estable.

La batería de tubos de calor se comporta como un “amortiguador térmico”, estabilizando las oscilaciones de temperatura que presenten las corrientes de aire que atraviesan el sistema de intercambio energético. Permite lograr adecuados gradientes térmicos a partir de 40°C.

Los resultados obtenidos muestran que es factible realizar estudios de confort térmico en interiores, ya que se han logrado condiciones interiores dentro de la zona de confort térmico en torno a los 22.5 °C y 37 % de humedad relativa, y según la ASHRAE, para verano las condiciones deben rondar en los 25 °C y 50 % de humedad. Asimismo, el máximo caudal volumétrico manejado en el interior de la cámara (130 m³/h), está por arriba del valor recomendado por la misma ASHRAE (34 m³/h/persona), lo cual, conduce a una buena calidad de aire interior por tener buenos niveles de ventilación.

Los resultados permiten contemplar la posibilidad de disminuir el consumo de energía mediante el uso de la tecnología de los tubos de calor como una opción viable y obtener ahorros económicos sustanciales en las instalaciones.

En lo personal esta investigación tiene una gran relevancia ya que pretende conocer los alcances de ésta tecnología en aplicaciones reales, para que en un futuro se pueda implementar a gran escala.

Bibliografía

- (Chung,1999) W.Chung et al., An experimental study of the utilization of heat pipes for solar water heaters, Applied Thermal Engineering 19 (1999) 807-817.
- (Esen, 2004) Esen, M., Thermal performance of a solar cooker integrated vacuum-tube collector with heat pipes containing different refrigerants, Solar Energy 76 (2004) 751-757.
- (FEES, 1991) Florida Energy Extension Service. "Efficient Humidity Control with Heat Pipes". Cooperative extension service. Institute of food and agricultural sciences. University of Florida. December 1991.
- (FEFM, 2008) Flores Murrieta Fernando Enrique. Fabricación, monitorización y caracterización de un equipo de aire acondicionado de bajo impacto ambiental, utilizando un sistema combinado: refrigerador evaporative ceramic y tubos de calor. Tesis doctoral. Universidad de Valladolid. España. 2008.
- (Gaugler, 1944) Gaugler, R. S.. "Heat transfer device". U.S. Patent N° 2350348. Appl. 21 December, 1942. Published 6 June, 1944.
- (Herrero, 2006) Herrero Martín Ruth. "Recuperación de energía residual a baja temperatura según un sistema combinado mixto RESIHP". Tesis Doctoral.
- (Dunn, 1994), P. D.; D. A. Reay. "Heat Pipes". Oxford: Elsevier Science Ltd, 1994 ISBN: 0080419038.
- (Flores, 2008), Murrieta Fernando Enrique."Fabricación, Monitorización y Caracterización de un Equipo de Aire Acondicionado de Bajo Impacto Ambiental, Utilizando un Sistema Combinado: Refrigerador Evaporativo Cerámico y Tubos de Calor REC-TC". Valladolid, España: Noviembre de 2008- Tesis Doctoral.
- (Grover, 1964) Grover, C., Cotter T., Erickson G., "Structure of very high thermal conductance", J. Appl. Phys. 35 (1964) 1990-1991.
- (Holman, 1988). Holman, J. 1988. "Métodos experimentales para Ingenieros". McGraw-Hill. México.
- Karlekar 1985). B.V. Karlekar "Transferencia de calor" ISBN 968-25-0895-9
- (Khanh, 2006) Dinh Khanh "Dehumidifier commercial applications of Heat pipes technology booklet" Pag. 1-23.
- (kim,2003) Kim, K-S; Won, M-H; Kim, J-W; Back, B-J; Heat Pipe cooling technology for desktop PC CPU, Applied Thermal Engineering 23 (2003) 1137-1144.
- (Koch, 1983) Koch, H.; Kreeb, H.; Savage, C. "The microgravity research experiments (MICREX) database - Heat Pipe experiment on SPAS". Experimento original propuesto por la República Federal Alemana y realizado por NASA Kennedy Space Center. Florida. 1983.
- (Mike, 1993) Mike C., Scofield, P.E., "Low temperature air with high IAQ for tropical climates". ASHRAE Journal. Pag. 52-59. March 1993.
- (Milton, 1997) Milton Meckler, P.E.. "Maximizando la ventilación potencial para la recuperación de calor". El Instalador, (original de la revista "La técnica del frío"). Número 329. Pag. 37 44. Marzo 1997.
- (Miranda, 2004), Miranda Ángel Luis. "Aire Acondicionado". Barcelona: Ediciones CEAC, S.A., 2004. ISBN: 84-3296542-1

- (Miranda, 2005), Ángel Luis. "Tubos de Calor: Una Tecnología Para el Siglo XX". Barcelona: Ediciones CEAC. S.A., 2005. ISBN: 84-329-1094-5
- (Miranda, 2008), Miranda Ángel Luis. "Técnicas de Climatización". Barcelona: Marcombo Ediciones, 2008. ISBN: 978-84-267-1476-3
- (Oseguera, 1985). Oseguera M. Ma. Del Rocío, Reséndiz, Franco Rogelio 1985. "Selección de un método de diseño para intercambiadores de calor de tubo y coraza e implementación de su programa de cómputo". Tesis profesional. Instituto Politécnico Nacional. Escuela Superior de Ingeniería Química e Industrias Extractivas.
- (Pastukhov, 2003) Pastukhov, V.G.; Maidanik, Yu F.; Vershinin, C.V.; Korukov, M.A.; Miniature loop heat pipes for electronics cooling, Applied Thermal Engineering 23(9) (2003) 1125-1135
- (Paris, 2007). Paris L. L. 2007. "Tubos de calor y termosifones bifásicos: alternativas para la conservación de la energía". Memorias del 8° Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica. Cusco, Perú. Página 1. CIBIM 8. Código 1285.
- (PICE, 1882) Anónimo "Memorias de angier march perkins". Proc.inst.civil engineers.Vol 67, Londres 1882.
- (pizetti, 1991) Pizzeti, C.; "Acondicionamiento del aire y refrigeración. Teoría y cálculo de las instalaciones". Ed. Bellisco 2ª Edición española, 1991.
- (Prieto, 1994) Prieto Benito José Luis. Recuperación de Energía en un sistema de aire acondicionado mediante "heat pipes". Proyecto de fin de carrera. Escuela Universitaria Politécnica. Universidad de Valladolid. España.
- (Prieto, 2000), Benito José Luis. "Proyecto Fin de Carrera: Recuperación de Energía en un Sistema de Aire Acondicionado Mediante Heat Pipes". 2000. Universidad de Valladolid, España.
- (Reay 2006), Reay D.; Peter Kew "Heat Pipes Theory, Design and Applications". Oxford: Butterworth- Heine Mann. 2006 ISBN-13: 978-0-7506-6754-8
- (Renedo, 2007) Renedo Carlos "Recuperadores de Calor utilizados en sistemas de aire acondicionado" Recopilacion de los diferentes tipos de recuperadores de calor utilizados comercialmente. Pag 12-34
- (Revista El instalador), Revista Técnica de Climatización, Refrigeración, Energías, Agua e Instalaciones Octubre- 2006 No 434 (Grupo Instalador)
- (Rey, 2004) Rey, F. J., San José, J.F., Velasco, E., Plasencia M. Recuperación de Energía en Sistemas de Climatización DTIE 8.01 ISBN: 84921270-5-8.
- (Rey, 2006) Rey, F. J., Velasco, E. Eficiencia energética en edificios. Certificación y auditorías energéticas. Editorial Thomson. Madrid, España. 2006. ISBN:84-9732-419-6.
- (Rey, 2006) Rey, Martínez Francisco Javier; Eloy Velasco Gómez; Eva Hernández Gallego. "Curso Universitario de Ingeniería de Climatización". Valladolid: Imprime: Mata Digital, S.L., 2006. ISBN: 84-933938-4-3
- (Rey-velasco, 2003) Rey M. F., Álvarez P. M., Velasco G. E, Varela D. F., Herrero M. R. 2003. "Design and experimental study of a mixed energy recovery system heat pipe and indirect evaporative equipment for air conditioning", Energy and Buildings: 35 (2003) 1021–1030.

- (Rey-velasco, 2006) Rey, F. J., Velasco, E. Curso Universitario de Ingeniería de Climatización. Universidad de Valladolid. Grupo de Investigación Reconocido: G.I.R. de Termotecnia. Noviembre de 2006. ISBN: 84-933938-4-3.
- (Riffat, 2005) Riffat, S.B.; Zhao, X.; Doherty P.S.; “Developing a theoretical model to investigate thermal performance of a thin membrane heat-pipe solar collector” Applied Thermal Engineering, Volume 25, Issues 5-6, April 2005, Pages 899-915.
- (Shang, 1988) Shang, Z.S., Li, P.L., Practical Technique of Heat Pipes, Publisher of Chemical Industry, Beijing, 1988.
- (SIE-SENER) Sistema de Información Energética. Secretaría de Energía. <http://sie.energia.gob.mx/sie/bdiController>.
- (Silverstein, 1992) Silverstein, Calvin C.. “Design and technology of Heat Pipes for Cooling and Heat Exchange”. Ed. Hemisphere Publishing Corporation. ISBN 0-89116-859-1. Washington. 1992.
- (Song, 2004) Song, F., Swing, D., Ching C.Y.; “Experimental investigation on the heat transfer characteristics of axial rotating heat pipes” International Journal of Heat and Mass Transfer 47 (2004) 4721-4731.
- (Torrella, 2005) Torrella, Alcaraz Enrique; Joaquín Navarro Esbri; Ramón Cabello López; Francisco Gómez Marques. “Manual de Climatización”. Madrid: A. Madrid Vicente, Ediciones, 2005. ISBN: 84-89922-46-2
- (Vasiliev, 2000) Vasiliev, L.L., Vasiliev, Jr., Two phase thermal control system with a loop heat pipe and solid sorption cooler, SAE Technical Paper Series 2000-01-2492, 2000
- (Vasiliev, 2001) Vasiliev, L.L.; Mishkinis, D.A; Antukh, A.A.; Vasiliev Jr. L.L., “Solar-gas solid sorption refrigerator”, J. Adsorp. 7 (2001) 149-161
- (Vasiliev, 2003) Vasiliev, L.L., Vasiliev, Jr., Sorption heat pipe-a new thermal control device for space applications, in: M.S. El-Genk (Ed.) Proceedings of the International Forum- STAIF 2003, pp. 71-79.
- (Vasiliev, 1987) Vasiliev, L., L., Kiselev, V.G., Matveev, Y.N., Molodkin, F.F., Heat Pipe Heat Exchangers, Nauka i tehnika, Minsk, 1987 (en ruso).
- (Vasiliev, 1992) Vasiliev, L.L., Bogdanov, V.M., USSR patent 174411 “Heat pipe”, B.I. No. 24, 30.06.1992, 1992
- (Vasiliev, 1995) Vasiliev, L.L., Zhuravlyov, A.S., Molodkin, F.F., Khrolenok, V.V., Adamov, S.L., Turín, A.A., Medical heat pipe instrument for local cavity hypothermia, in: Proceedings of the 1st International Seminar “Heat Pipes, Heat Pumps, Refrigerators”, Minsk, Belarus, 12-15 September 1995, pp. 104-114.
- (Velasco, 1998). Velasco G. E. 1998. “Estudio energético y desarrollo de un recuperador tipo heat pipes (tubos de calor) para climatización. Tesis Doctoral. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales. Universidad de Valladolid, España.
- (Wang, 2000) Wang, S. K. “Handbook of Air Conditioning and Refrigeration”. New York: Mc Graw-Hill, 2000. ISBN: 0-07-068167-8
- (Zhukauskas,) A.; “Heat transfer for tubes in crossflow”. Advances in heat transfer, Vol. 8,
- ASHRAE, 1997. Fundamentals Handbook. Chapter 8. Thermal Comfort.
- Heat Pipe Technology, Inc. “Cases Summaries”. Página electrónica de casos de estudio: http://www.heatpipe.com/mktg_materials/Cases/hpcases.pdf

- National Aeronautics and Space Administration. "Air conditioner / dehumidifier". **Spinoff**, U.S.
- Government Printing Office, Washington, DC, August 1986, pp. 90.
- Mostofizadeh, Ch., Thermische Wärmepumpe, Elektrowärme im Technischen Ausbau, 35, 1977, A1, pp. 35-36
- Newark, 2009. "Online Catalog 127": <http://mexico.newark.com/>
- UNE EN ISO 7730, 1996. "Ambientes térmicos moderados y especificaciones de las condiciones para el bienestar térmico".
- New York, Academic Press, 1972, P.93.
- K. S. Ong, Md. Haider-E-Alahi. 2003. "Performance of a R-137 a filled thermosyphon, Appl. Therm. Eng. 23 (2003) 2373-2381.

Agradecimientos Especiales:

Para el desarrollo de este trabajo se agradece el apoyo otorgado por el PROMEP al Proyecto “*Recuperación de energía en instalaciones de aire acondicionado mediante el uso de tubos de calor*”. N° folio: UQROO-EXB-058.

Éste trabajo de Tesis contó con el apoyo para la impresión y empastado otorgado por la División de Ciencias e Ingeniería de la Uqroo.

¡Gracias a todos mis maestros y compañeros!