

INDICE GENERAL

CAPITULO UNO

1. INTRODUCCIÓN	8
1.1 TÍTULO DEL TRABAJO DE TITULACIÓN.....	8
1.2 OBJETIVO GENERAL.....	8
1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	8
1.4 JUSTIFICACION	9
1.5 METODOLOGÍA DE TRABAJO.....	10

CAPITULO DOS

2. BASE TEORICA	12
2.1 SISTEMAS TERMODINAMICOS	12
2.1.1 DEFINICIONES	13
2.1.2 PROPIEDADES TERMODINAMICAS	15
2.1.3 EL CICLO.....	17
2.1.4 PRIMERA LEY DE LA TERMODINAMICA	18
2.1.5 SEGUNDA LEY DE LA TERMODINAMICA.....	21
2.1.6 MEZCLAS GASEOSAS	25
2.2 ENFRIAMIENTO Y CALENTAMIENTO DEL AIRE ATMOSFERICO.	
HUMIDIFICACION Y DESHUMIDIFICACION.....	30
2.2.1 DEFINICIONES DE HIGROMETRIA	30
2.2.2 CALOR SENSIBLE	33

2.2.3 CALOR LATENTE	34
2.3 LA CARTA PSICROMETRICA. USOS	34
2.4 MECANISMOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR	36
2.4.1 CONDUCCION TÉRMICA	36
2.4.2 CONVECCION.....	40
2.4.3 RADIACIÓN.....	44
2.4.4 EL COEFICIENTE GLOBAL DE TRANSFERENCIA DE CALOR....	48

CAPITULO TRES

3. PARÁMETROS DE DISEÑO.....	51
3.1 FLUJO DE AIRE	54
3.1.1 VOLUMEN DE CONTROL.....	54
3.1.2 FLUJO MÁSSICO DE AIRE	55
3.1.3 FLUJO LAMINAR Y TURBULENTO	56
3.1.4 CONDICIONES DE FLUJO	57
3.2 SISTEMAS DE CALENTAMIENTO	57
3.2.1 DIVERSAS FORMAS DE CALENTAMIENTO	59
3.2.2 CÁLCULOS.....	61
3.3 SISTEMAS DE ENFRIAMIENTO	61
3.3.1 DIVERSAS FORMAS DE ENFRIAMIENTO.....	62
3.3.2 CÁLCULOS.....	66
3.4 SISTEMAS DE HUMIDIFICACIÓN Y DEHUMIDIFICACIÓN	67
3.4.1 DIVERSAS FORMAS DE DEHUMIDIFICACIÓN.....	68
3.4.2 DIVERSAS FORMAS DE HUMIDIFICACIÓN.....	71
3.4.3 CÁLCULOS.....	72

CAPITULO CUATRO

4. DISEÑO MECÁNICO, ELÉCTRICO, DE INSTRUMENTACIÓN Y

CONTROL.....	74
4.1 TÚNEL DE VIENTO.....	74
4.1.1 SELECCIÓN DEL MATERIAL	77
4.1.2 SECCIÓN DE ENTRADA.....	78
4.1.3 SECCIÓN DE CALENTAMIENTO	80
4.1.4 SECCIÓN DE ENFRIAMIENTO.....	82
4.1.5 SECCIÓN DE SALIDA.....	87
4.1.6 ENSAMBLE PRELIMINAR.....	88
4.1.7 BASTIDOR DE SOPORTE	89
4.2 PROCESO DE FABRICACIÓN Y ENSAMBLE	90
4.2.1 SECCIONES DEL TÚNEL	90
4.2.2 SISTEMAS DE CALENTAMIENTO Y ENFRIAMIENTO	93
4.3 SISTEMA ELÉCTRICO	95
4.4 SISTEMA DE CONTROL	97

CAPITULO CINCO

5. GUIAS DE PRÁCTICAS DE LABORATORIO	98
---	-----------

CAPITULO SEIS

6. ANALISIS ECONÓMICO.....	99
-----------------------------------	-----------

CAPITULO SIETE

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	101
7.1 CONCLUSIONES.....	101

7.2	RECOMENDACIONES	102
-----	-----------------------	-----

ANEXOS

ANEXO 1	CARTAS PSICROMÉTRICAS	105
ANEXO 2	TABLA DE PROPIEDADES DE CIERTAS SUSTANCIAS	108
ANEXO 3	GUÍA DE PRÁCTICA No. 1	110
ANEXO 4	GUÍA DE PRÁCTICA No. 2.....	116
ANEXO 5	MANUAL DE MANTENIMIENTO	123
ANEXO 6	PLANOS	125

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura No. 1 Sistema Cerrado y Sistema Abierto.....	14
Figura No. 2 Carta Psicrométrica con varios procesos	36
Figura No. 3 Flujo unidimensional ideal	38
Figura No. 4 Convección Libre y Forzada	41
Figura No. 5 Radiación desde una superficie caliente	45
Figura No. 6 Resistencias equivalentes en serie y en paralelo	49
Figura No. 7 “Zona de Confort”. Zona escogida arbitrariamente.....	53
Figura No. 8 Ducto de sección cuadrangular (volumen de control).....	55
Figura No. 9 Calentamiento puro.	59
Figura No. 10 Enfriamiento puro.	62
Figura No. 11 Diagrama $T - s$ para los ciclos de Carnot normal y práctico.....	64
Figura No. 12 Diagrama $p - h$ para los ciclos de Carnot normal y práctico....	65
Figura No. 13 Enfriamiento hasta el punto de rocío,	69
Figura No. 14 Se muestran tres caminos para pasar de ω_1 a ω_2	73
Figura No. 15 Sección de entrada.....	79
Figura No. 16 Termómetros de bulbo seco y bulbo húmedo.....	80
Figura No. 17 Sección de calentamiento. Muestra las resistencias eléctricas.	81
Figura No. 18 Sección de enfriamiento	84
Figura No. 19 Sección de salida.....	88
Figura No. 20 Túnel ensamblado.	89
Figura No. 21 Tableros para las secciones cuadrangulares	91
Figura No. 22 Tableros para la sección de entrada.....	92
Figura No. 23 Bandeja recolectora de condensados.....	94
Figura No. 24 Diagrama eléctrico.....	96

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Matriz de selección del material para el túnel.....	78
Tabla 2. Matriz de evaluación de los sistemas de enfriamiento.....	83
Tabla 3. Flujo másico de agua de enfriamiento.....	86
Tabla 4. Tabla de costos estimados de materiales y mano de obra de construcción	100
Tabla 5. Tablas de propiedades de ciertas sustancias.....	109

GLOSARIO DE TÉRMINOS

Término	Descripción
Aire atmosférico	Mezcla gaseosa compuesta principalmente por nitrógeno y oxígeno, y una mínima parte de vapor de agua.
Calor latente	Energía calórica que al transferirse a un sistema ocasiona un cambio de fase, sin elevación de la temperatura.
Calor sensible	Energía calórica que al transferirse a un sistema, provoca un cambio en la temperatura del mismo.
Ciclo de Carnot	Ciclo termodinámico básico e ideal, que pretende desarrollar una cantidad continua de trabajo, mediante el suministro de calor a un fluido de trabajo específico.
Ciclo de Carnot invertido	Ciclo basado en el ciclo de Carnot normal, que intenta transferir calor en forma continua, desde un sitio frío hasta un sitio caliente, suministrando una cierta cantidad de trabajo sobre el sistema.
Conducción térmica	Mecanismo de transferencia de calor debido a micro-movimientos de las moléculas de una sustancia alrededor de su punto de equilibrio (en especial en los sólidos).
Convección libre y forzada	Mecanismo de transferencia de calor debido a macro-movimientos de las moléculas de un fluido, debido a variaciones de densidad, o a la acción de un agente externo (un ventilador, por ejemplo).
Energía interna	Propiedad termodinámica que representa el nivel de energía (movimiento o excitación) de las moléculas de una sustancia. Se usa más para sistemas cerrados.
Entalpía	Propiedad termodinámica similar a la energía interna, pero que incorpora los conceptos de presión y volumen. Se usa más para sistemas abiertos.
Humedad específica	También llamada "contenido de humedad", expresa la cantidad real de vapor (en masa) presente en la mezcla, por unidad de masa de aire seco.
Humedad relativa	Relación de presiones de vapor real y de saturación. Indica que tan lejos se encuentra el aire de saturarse con vapor de agua
Presión de vapor	Presión parcial que ejerce el vapor de agua en el aire atmosférico. Su valor tiene relación con la humedad relativa y el punto de rocío.
Radiación térmica	Mecanismo de transferencia de calor que no requiere de un medio fluido; se da por radiación electromagnética, desde una superficie muy caliente hacia otra a menor temperatura.
Soplador	Cualquier dispositivo mecánico que logre darle movimiento (y presión) al aire atmosférico para ser trasladado de un sitio a otro (o recirculado).
Temperatura de bulbo húmedo	Temperatura medida con un termómetro estándar, cuyo bulbo ha sido humedecido. Por la evaporación el bulbo se enfría hasta el equilibrio.
Temperatura de bulbo seco	Temperatura ambiental normal, medida con un termómetro estándar
Temperatura del punto de rocío	Temperatura a la que se debe enfriar el aire (a presión constante) para que el vapor de agua empiece a condensar.

CAPITULO UNO

1. INTRODUCCIÓN

1.1 TÍTULO DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

DISEÑO DE UN TUNEL DE AIRE PARA REALIZAR EXPERIMENTOS SOBRE AIRE ACONDICIONADO DE USO DOMESTICO E INDUSTRIAL.

1.2 OBJETIVO GENERAL

Llevar a cabo un estudio teórico práctico de los principios termodinámicos aplicables al acondicionamiento de aire, y plasmar los resultados en el diseño de un equipo de fácil construcción y uso, con el cual los estudiantes puedan realizar prácticas de laboratorio sobre la materia.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar un estudio de la teoría Termodinámica que describe y explica el funcionamiento de los procesos de calentamiento, enfriamiento, humidificación y deshumidificación del aire atmosférico.
- Enumerar de forma generalizada y universalmente aceptada, las condiciones de “confort”, en las que las personas pueden desempeñarse de mejor manera en sus actividades profesionales, productivas y sociales.

- Orientar esta base teórica hacia la utilización de equipos de aire acondicionado de uso industrial (y doméstico).
- Realizar el diseño térmico de un equipo que efectúe algunos de los procesos descritos anteriormente, dentro de las capacidades que se puedan manejar en un laboratorio de estudio universitario.
- Realizar el diseño mecánico del sistema antes descrito, aplicando los conocimientos adquiridos en la carrera.
- Realizar el diseño del sistema de fuerza y control eléctrico del equipo de laboratorio objeto de este trabajo.
- Determinar el costo aproximado del presente proyecto.

1.4 JUSTIFICACION

Los estudiantes de la **Universidad de las Américas** que cursan las carreras de Producción Industrial, Ambiental y Sonido y Acústica, reciben dentro de sus respectivas mallas la materia de Termodinámica, dentro de la cual se pueden estudiar los fenómenos relacionados con el enfriamiento y calentamiento artificial de gases y otras sustancias, en particular el aire atmosférico, el mismo que por su importancia para las personas y para las máquinas (especialmente electrónicas), debe ser controlado de forma cercana, a fin de evitar que se produzcan enfermedades para el ser humano, o daños en los equipos mencionados.

La mejor manera para que los alumnos puedan comprender plenamente la utilización de los diferentes medios o mecanismos para el acondicionamiento del aire atmosférico, tanto para uso doméstico como industrial, es que realicen

prácticas de laboratorio en equipos diseñados para el efecto, que les muestren la forma de manipular las propiedades termodinámicas de una manera fácil y comprensible, y que a la vez les capacite para que en su vida profesional puedan tener una relación libre de problemas con los equipos utilizados para el acondicionamiento de aire.

Una razón adicional para justificar este proyecto, es que existen muchas construcciones civiles que requieren inevitablemente del acondicionamiento del aire dentro de las mismas, como teatros, auditorios, estudios de grabación, etc., mientras que los estudiantes y futuros ingenieros ambientales, deben conocer cuáles son las diversas causas y consecuencias de la contaminación del aire atmosférico, y algunas formas de minimizarla y combatirla.

1.5 METODOLOGÍA DE TRABAJO

Por el tipo de trabajo propuesto en este escrito, la metodología requiere de las siguientes herramientas de investigación:

- Análisis de bases teóricas debidamente establecidas en textos de enseñanza universitaria, así como en manuales y otro tipo de información teórica. En los campos donde el pensum de las materias estudiadas no contemple algún aspecto técnico de los requeridos en este trabajo, la proponente recurrirá a las debidas fuentes de consulta, así como al profesor guía.
- Aplicación de técnicas para el diseño térmico-termodinámico del sistema a generar, para lo cual la proponente hará uso de los conocimientos sobre la

materia adquiridos en la carrera, a la vez que realizará la investigación necesaria en las áreas en las que tenga debilidades. El profesor guía deberá sustentar esta complementación de conocimientos.

- Aplicación de técnicas para el diseño mecánico y eléctrico del sistema a proponer, con las mismas observaciones que en el apartado anterior.

CAPITULO DOS

2. BASE TEORICA

El desarrollo del presente trabajo, para el diseño de un túnel de aire que será utilizado para realizar experimentos sobre acondicionamiento de aire a nivel doméstico e industrial, tiene como base principal a dos ciencias que son la Termodinámica y la Transferencia de Calor, pues estas dos disciplinas guardan relación directa con los procesos de flujo de masa y flujo de calor. Puesto que la climatización o el aire acondicionado consisten en enfriar, calentar, humidificar o deshumidificar el aire atmosférico, se va a proceder al análisis de la teoría correspondiente.

2.1 SISTEMAS TERMODINAMICOS

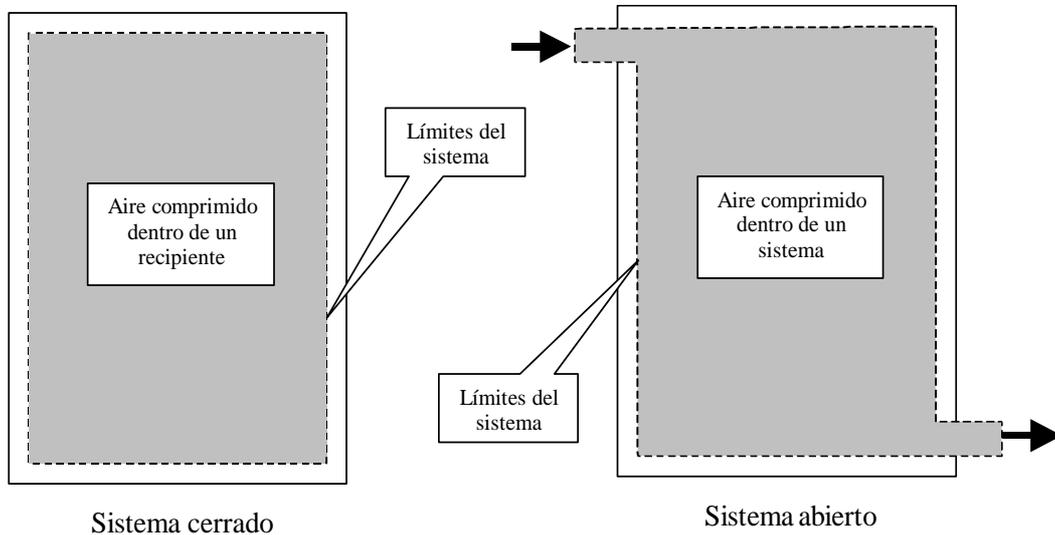
El concepto de **sistema** juega un papel muy importante en la Termodinámica, pues en base a la definición del mismo es que se puede llevar a cabo el estudio de los fenómenos de transferencia de calor y de masa, que tienen lugar entre un sistema y el medio que lo rodea; el túnel de aire a diseñar será analizado por los estudiantes como un *sistema termodinámico*, dentro del cuál suceden o tienen lugar *procesos termodinámicos* y de *transferencia de calor*, para poder climatizar o acondicionar el aire que por su interior va a fluir, antes de ser entregado al espacio que en última instancia va a requerir de este aire acondicionado.

2.1.1 DEFINICIONES

- **El Sistema Termodinámico** Un sistema termodinámico se puede definir como “...una región del espacio que contiene una cantidad de materia, cuyo comportamiento se está investigando”¹. Como se puede ver, el concepto es simple de enunciar, y al momento de delimitar el sistema, se debe ser lo suficientemente cuidadoso. La materia contenida dentro del sistema está separada del “medio” o “entorno” por sus *límites* o fronteras (este concepto es análogo al de una célula animal o vegetal, que está separada del medio gracias a su envoltura o membrana). Los límites pueden ser físicos, tangibles, como las paredes de un recipiente, o alguna superficie imaginaria que encierra esta región del espacio bajo estudio, y que ha sido previamente definida por el investigador. Antes de iniciar cualquier tipo de análisis termodinámico, es imprescindible definir los límites del sistema, pues es a través de éste que se transfieren tanto el calor como el trabajo.
- **Sistemas Abiertos y sistemas cerrados** Cuando la masa dentro del sistema no cambia con el tiempo, es decir, no sale ni entra del sistema, se dice que es un *sistema cerrado*. Pero cuando a través de una parte de los límites del sistema *fluye* la materia (es decir, entra, sale o las dos cosas), se dice que este es un *sistema abierto*. Cuando la cantidad de materia que entra al sistema por unidad de tiempo, es igual a la cantidad de materia que sale del mismo, por unidad de tiempo, se

¹ Referencia [1]

dice que el proceso es de *flujo estable*. En la siguiente Figura No. 1, se pueden apreciar estos dos conceptos.



Fuente: propia de la autora

Figura No. 1 Sistema Cerrado y Sistema Abierto

- **Estado termodinámico** Este término se refiere a los valores que en un determinado momento poseen las propiedades que caracterizan a ese sistema. Por ejemplo, cuando un gas está contenido dentro de un recipiente a una presión de 1.5 bar y 230°C, ese es su estado termodinámico.
- **Proceso** Se dice que un sistema termodinámico sufre o pasa por un *proceso*, cuando las propiedades que lo caracterizan cambian con el tiempo, pero son estables o invariables en los dos estados extremos del proceso (estado inicial y estado final). Los estados intermedios por los

que atraviesa el sistema, se dice que son estados *cuasi estables*. El calificativo de *cuasi* quiere decir que el sistema no tiene suficiente tiempo para estabilizar sus propiedades en cada uno de los estados intermedios del proceso, y sin embargo pasa de un estado al siguiente hasta completar tal ciclo.

- **Cambio de estado** Un sistema sufre un cambio de estado si y solo si ocurren uno de los dos siguientes fenómenos, o los dos a la vez:
 - Los límites del sistema son deformados por la aplicación de una fuerza que mueve dichos límites una distancia, lo cual da como resultado la realización de algún tipo de **trabajo** sobre o por el sistema. En cuanto desaparece la fuerza, se deja de efectuar el trabajo; por esta razón se dice que el trabajo es una cantidad *transitoria*.
 - En los límites del sistema existe una diferencia de temperaturas entre el sistema y sus alrededores, y por este motivo ocurre el flujo de **calor** desde o hacia el sistema. De igual forma, en cuanto desaparece la diferencia de temperaturas entre el sistema y su entorno, deja de fluir calor, por lo que el calor también se denomina una cantidad transitoria.

2.1.2 PROPIEDADES TERMODINAMICAS

Para definir el estado de un sistema cerrado, sólo las propiedades termodinámicas son relevantes. *Tal propiedad debe ser alguna característica relevante que pueda ser medida, y debe además tener un valor único cuando el*

*sistema se encuentra en un determinado estado*². La presión, el volumen y la temperatura son ejemplos obvios, porque son características muy cercanas a nuestros sentidos.

El valor de una propiedad debe ser **independiente** del proceso que haya podido seguir el sistema para llegar a ese estado en particular; por esto se les denomina “propiedades de estado”. De aquí se puede inferir que el cambio en el valor de una propiedad depende solamente de los estados inicial y final del sistema, y es independiente del proceso seguido durante el cambio de estado.

La **presión (p)** se define como la fuerza ejercida sobre un área unitaria. Los conceptos básicos de fuerza y área son suficientemente familiares a todas las personas, por lo que no requieren definición adicional. Las unidades de presión en el SI, es el pascal (Pa), aunque por ser una unidad en extremo pequeña (apenas 1 newton por metro cuadrado), se acostumbra utilizar un múltiplo del pascal, el **bar**, equivalente a 10^5 Pa.

El **volumen (V)**, igualmente, es una unidad de fácil comprensión, y no requiere definición adicional. La unidad de medida en el mismo sistema es el m^3 (metro cúbico). Sin embargo, a menudo se puede preferir en lugar del volumen utilizar una propiedad derivada del mismo, el **volumen específico (v)**, que resulta de dividir el volumen total por la masa del sistema. Así, las unidades serán m^3/kg (nótese que el volumen específico es el inverso de la densidad).

² Referencia [1]

Finalmente, la **temperatura (T)** es una propiedad que si bien es familiar a las personas, no siempre es fácil de definir. No obstante, podemos afirmar que la temperatura es una medida indirecta de la cantidad de energía que posee un sistema. Su unidad en el SI es el grado **Kelvin** absoluto, pero de uso más común en lo comercial, industrial y familiar es el **grado centígrado ($^{\circ}\text{C}$)**, o grado Celsius.

La característica principal de las tres propiedades indicadas, es la relativa facilidad con que se las puede medir.

Otras propiedades termodinámicas.- Existen al menos tres propiedades termodinámicas muy utilizadas en el área de desarrollo del presente trabajo: la *energía interna (u)*, la *entalpía (h)* y la *entropía (s)*, propiedades que aparecen como consecuencia de la Primera y la Segunda Leyes de la Termodinámica. Aunque no son propiedades directamente observables por los sentidos, son propiedades esenciales para la estructura y estudio de esta ciencia, y para la realización de los cálculos necesarios.

2.1.3 EL CICLO

Se dice que un sistema cerrado sigue un proceso cíclico, o un *ciclo*, cuando pasa a lo largo de una serie de estados, de tal forma que su estado final es igual en todos los aspectos a su estado inicial.

Esto implica que sus propiedades han recobrado todos sus valores iniciales; de esta manera el sistema está en condiciones de ser sometido nuevamente al

mismo ciclo de eventos, y el procedimiento puede ser repetido en forma indefinida.

2.1.4 PRIMERA LEY DE LA TERMODINAMICA

La estructura de la Termodinámica descansa sobre dos leyes fundamentales. La Primera Ley, que se describe a continuación, tiene que ver con el principio de conservación de la energía aplicado a sistemas cerrados que sufren cambios de estado, debido a las transferencias de trabajo y de calor a través de los límites. La Primera Ley no puede ser “comprobada”; su validez radica en que ni ella misma ni las consecuencias que de ella se derivan, han sido nunca contradichas por la experiencia.

Hace cerca de dos siglos, el científico inglés James Prescott Joule, se dedicó a realizar exhaustivos experimentos, y encontró que en todos los casos la cantidad neta de calor liberado era proporcional a la cantidad neta de trabajo realizado sobre el sistema durante un ciclo completo. La Primera Ley puede expresarse como una generalización de todos los procesos cíclicos, incluyendo aquellos en los que se suministra calor **al** sistema **desde** el entorno, y el sistema **realiza** un trabajo **sobre** el entorno; en la práctica es el tipo más común de ciclos. La primera Ley de la Termodinámica puede establecerse así:

*Cuando un sistema cerrado es llevado a través de un ciclo, el trabajo neto realizado sobre el entorno es **proporcional** a la cantidad neta de calor tomado desde el entorno.*

Esto puede expresarse como sigue:

$$\sum_{\text{ciclo}} dQ \propto \sum_{\text{ciclo}} dW \quad (2.1)$$

y se lee así: "... la suma de todas las cantidades de calor involucradas en el ciclo, es proporcional a la suma de todas las cantidades de trabajo involucrados en dicho ciclo"³.

Esta Primera Ley es una de las piedras fundamentales de la Termodinámica, y constituye por sí misma un axioma que no puede ser probado. Los experimentos de Joule y otros realizados más recientemente no son una prueba de la validez de la Primera Ley; son un soporte más para adoptarla como un axioma fundamental. Y como toda ley, de ésta se pueden extraer varias conclusiones o corolarios, entre los cuales el principal dice que:

*Existe una **propiedad** de un sistema cerrado, tal que un cambio en su valor es igual a la diferencia entre el calor suministrado y el trabajo realizado durante cualquier cambio de estado que sufra el sistema⁴.*

Nótese que se habla de un cambio de estado, entre dos estados extremos. Este corolario sí puede ser demostrado, y si a esta propiedad así enunciada se la designa como U , y escribiendo Q y W para las cantidades netas de calor y trabajo que cruzan los límites durante un "cambio de estado", se tiene

$$Q - W = (U_2 - U_1) \quad (2.2)$$

³ Referencia [5]

⁴ Referencia [1]

La propiedad U se denomina la *energía interna* del sistema, y la ecuación anterior es la llamada *ecuación de la energía para procesos sin flujo de masa*. Expresado con palabras: **cualquier cantidad de calor entregado a un sistema, debe ser igual al incremento de su energía interna, más el trabajo realizado por el sistema**. Es razonable ahora que a esta Primera Ley se la conozca también como la Ley de la Conservación de la Energía.

Puesto que en una ecuación física los términos que la integran deben tener unidades coherentes, y ya que el calor y el trabajo están medidos en unidades de energía, kJ (se lee *kilo-julio*), se sigue que U también puede ser expresada en kJ, o en la unidad que se escoja para Q y W . Debe notarse asimismo que la ecuación de la energía tiene que ver con *cambios* en la energía interna, mas no con valores puntuales de la misma. Además, es común expresar los valores de esta propiedad por unidad de masa, para lo cual se utiliza el símbolo u , y sus unidades son el kJ/kg (kilojulio por kilogramo).

Se ha mencionado anteriormente que, además de los sistemas cerrados para los cuales se han definido la energía interna y la ecuación de la energía, existen sistemas abiertos en los que la materia fluye hacia adentro y/o hacia afuera del sistema; debe ser posible, por consiguiente, derivar una expresión que permita relacionar estas cantidades de calor y trabajo que intercambian el sistema y sus alrededores, con las propiedades del fluido *a la entrada* y *a la salida* del mismo. A más de las propiedades termodinámicas (que se definieron como “propiedades de estado”), el fluido que se mueve posee al menos dos propiedades mecánicas relevantes: la *velocidad*, C , medida en m/s (metros por

segundo), y la *altura geográfica*, z , medida con respecto a un nivel de referencia que se haya definido en forma arbitraria, expresada en m (metros). Estas dos propiedades mecánicas involucran a dos tipos conocidos de energía: *cinética* y *potencial*. Para estos sistemas se ha desarrollado una expresión matemática que se conoce como la *ecuación de la energía para flujo estable*, por unidad de masa, que se escribe de la siguiente manera:

$$Q - W = (h_2 - h_1) + \frac{1}{2}(C_2^2 - C_1^2) + g(z_2 - z_1) \quad (2.3)$$

y debe interpretarse de esta forma: en un proceso de flujo estable, la diferencia entre el calor y el trabajo netos involucrados, es igual al cambio de entalpía, más el cambio de energía cinética y más el cambio de energía potencial del fluido, entre los estados a la entrada y a la salida del sistema.

En esta ecuación la propiedad h es la *entalpía específica* (por unidad de masa) del sistema, y se define como una combinación de otras propiedades previamente mencionadas: energía interna, presión y volumen específico.

$$h = u + pv \quad (2.4)$$

Además, los subíndices 1 y 2 de la ecuación 2.3 se refieren a las propiedades que posee el flujo en las superficies de entrada y de salida, respectivamente.

2.1.5 SEGUNDA LEY DE LA TERMODINAMICA

En el siguiente acápite se introducirá el concepto de “eficiencia”, muy importante dentro de la enunciación de la Segunda Ley. Esta Ley no es el

resultado ni la extensión de la Primera Ley, en la cual se establece, en forma general, que siempre será posible *transformar* calor en trabajo y viceversa. La Primera Ley no dice absolutamente nada acerca de *cuánto de ese calor se puede efectivamente transformar en trabajo*. La Segunda Ley va más allá, y pone de manifiesto que *es imposible construir una máquina que trabaje en un ciclo, tome una cantidad de calor del medio, y desarrolle una cantidad equivalente de trabajo*. Es decir, “algo” del calor entregado al sistema debe ser disipado nuevamente al entorno (en general lo hace en forma de pérdidas por fricción, etc.). Otra forma de expresar la Segunda Ley, se debe al investigador Rudolf Clausius, quien afirmó que *es imposible transferir calor desde un cuerpo frío hacia un cuerpo caliente, sin que alguna cantidad de trabajo se involucre en este proceso*.

Al igual que con la Primera Ley, la Segunda Ley también tiene una serie de consecuencias o corolarios, siendo el más importante el siguiente:

Existe una propiedad de un sistema cerrado, tal que un cambio en su valor es igual al $\int_1^2 \frac{dQ}{T}$, para cualquier proceso reversible que siga el sistema entre dos estados extremos⁵.

En otras palabras:

$$S_2 - S_1 = \int_1^2 \frac{dQ}{T} \quad (2.5)$$

⁵ Referencia [1]

Esta propiedad se denomina la **entropía** del sistema; se la ha designado con el símbolo S , y se mide en kJ/K. Para valores de entropía por unidad de masa (entropía específica), se utiliza el símbolo s , y se mide en kJ/kg·K. Los valores de entropía de las sustancias no son fáciles de calcular, sino por medios experimentales, pero como en general lo que más interesa son los *cambios* en las propiedades de un sistema, entre ellas la entropía, es posible hallar valores tabulados de s referidos a un nivel arbitrario (por ejemplo, para el caso del agua se asume que la entropía de líquido saturado en el punto triple, es igual a 0), y para otras sustancias como los gases ideales, se utilizan ecuaciones que relacionan propiedades fácilmente medibles, como son la presión, el volumen específico y la temperatura, así como otras propiedades de la sustancia en cuestión.

Finalmente, la entropía está necesariamente relacionada con el resto de propiedades, y dos expresiones que facilitan esta relación son las siguientes:

$$Tds = du + pdv , y$$

$$Tds = dh - vdp$$

2.1.5.1 LA EFICIENCIA DE UN CICLO

Cuando un sistema cerrado sigue una serie de procesos sin flujo de masa, durante el cual el fluido pasa por un ciclo de estados termodinámicos, la Primera Ley expresada de otra manera se vería así:

$$\sum_{\text{ciclo}} dQ - \sum_{\text{ciclo}} dW = 0$$

Hasta este momento, se ha utilizado el símbolo Q para cantidades de calor ya sean positivas como negativas. De aquí en adelante resulta más conveniente utilizar símbolos separados para las cantidades positivas y negativas. Más aún, los símbolos servirán para expresar los valores numéricos positivos y negativos, acompañados por el signo que, de acuerdo con una convención previamente acordada, indicará la dirección del flujo de calor. Así, si Q_1 es el calor suministrado, Q_2 es el calor disipado y W es el trabajo “neto” realizado por el sistema durante el ciclo, la Primera Ley se transforma en lo siguiente:

$$Q_1 - Q_2 = W_{NETO} \quad (2.6)$$

Un sistema que opera en un ciclo y produce una cantidad neta de trabajo a partir del suministro de una cantidad de calor, se denomina una *máquina térmica*. Mientras mayor sea la proporción de calor que se transforma en trabajo, mejor es la máquina térmica. Consecuentemente, la *eficiencia del ciclo* (η) de una máquina térmica se define como:

$$\eta_{\text{ciclo}} = \frac{\text{Trabajo realizado}}{\text{Calor entregado}} = \frac{W_{NETO}}{Q_2}$$

De donde se obtiene que:

$$\eta_{\text{ciclo}} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_2} \quad (2.7)$$

Las cantidades Q_1 y Q_2 pueden ser expresadas por unidad de masa del sistema, o pueden ser consideradas como la rapidez con que se entrega o se disipa calor, pues si se las multiplica por el número de ciclos, la relación no se afecta.

2.1.6 MEZCLAS GASEOSAS

En este acápite se examina el comportamiento de mezclas de gases ideales y mezclas de gases ideales con vapor, mezclas en las que se requiere de información adicional referente a su composición, a fin de establecer el estado termodinámico. Los cálculos que involucran las mezclas de gas y vapor, son de particular aplicación en los procesos de aire acondicionado.

En las siguientes ecuaciones, las cantidades con subíndice representan propiedades de los **componentes** de la mezcla, mientras las cantidades sin subíndice, representan las propiedades de la mezcla gaseosa que se considera se comporta como si ella misma fuese un gas ideal.

La ley de Gibbs-Dalton Conviene empezar con algunas definiciones básicas aplicables a las mezclas de gases ideales. La masa total de la mezcla es la suma de las masas de cada componente, de modo que:

$$m = m_1 + m_2 + \dots + m_j = \sum_{i=1}^j m_j \quad (2.8)$$

La *fracción molar* de cada componente, x_i , se define mediante la expresión:

$$x_i = \frac{n_i}{n} \quad (2.9)$$

donde n_i es el número de moles del i -ésimo componente, mientras que n es el número total de moles de la mezcla. La suma de las fracciones molares debe ser necesariamente igual al total: $\sum x_i = 1.0$.

La masa de cada componente se puede calcular con la expresión: $m_i = n_i PM_i$, donde PM_i es el peso molecular del i -ésimo componente. De este modo, la ecuación 2.8 queda de la siguiente forma: $m = \sum_i n_i PM_i$.

Se puede encontrar una ecuación equivalente para calcular el peso molecular de una mezcla en particular, mediante estas expresiones:

$$PM = \frac{m}{n} = \sum \frac{n_i}{n} PM_i, \text{ ó}$$

$$PM = \sum x_i PM_i$$

De manera similar, se puede definir una expresión para calcular la constante específica del gas para una mezcla en particular, de esta manera: $R = \frac{R_0}{PM}$, donde R_0 es la *constante universal de los gases*.

Al estudiar el comportamiento de los gases ideales, se asume que cada componente gaseoso de la mezcla se comporta como si él solo existiese a la temperatura de la mezcla y como si él solo llenase todo el volumen ocupado por la mezcla. Esta es una forma de expresar la *ley de Gibbs-Dalton*. La *presión parcial* del i -ésimo componente se define entonces como:

$$p_i = \frac{n_i R_0 T}{V} \quad (2.10)$$

En otras palabras, esta es la presión que el componente en cuestión ejercería al ocupar él solo el volumen total de la mezcla, V , a la temperatura de la mezcla, T . Si, por otra parte, la *presión total* de la mezcla se define como

$p = \frac{nR_0T}{V}$, y dividiendo esta expresión para la ecuación 2.10, se obtiene lo

siguiente:

$$\frac{p_i}{p} = \frac{n_i}{n} = x_i \quad (2.11)$$

Si sobre esta expresión última se aplica el concepto de que $\sum x_i = 1.0$, se llega a este resultado:

$$\sum p_i = \sum x_i p = p \sum x_i = p \quad (2.12)$$

es decir, *la suma de las presiones parciales es igual a la presión total de la mezcla.*

La Ley de Amagat-Leduc Supóngase ahora que se separa una mezcla en sus componentes individuales, y que cada uno de ellos se coloca en un recipiente de modo que se lo mantenga a la presión de la mezcla y a la temperatura de la mezcla. El volumen ocupado por cada componente sería:

$V_i = \frac{n_i R_0 T}{p_i}$; si el volumen total de la mezcla gaseosa a las condiciones p y T ,

es: $V = \frac{n R_0 T}{p}$, y dividiendo entre sí las dos últimas ecuaciones, se obtiene

$$\frac{V_i}{V} = \frac{n_i}{n} = x_i \quad (2.13)$$

Igual, aplicando sobre esta expresión el hecho de que $\sum x_i = 1.0$, se tiene:

$$\sum V_i = \sum x_i V = V \sum x_i = V \quad (2.14)$$

La ecuación 2.14 se denomina la *ley de los volúmenes aditivos de Amagat-Leduc*, que significa que el volumen total de una mezcla de gases ideales es igual a la suma de los volúmenes que cada gas componente ocuparía si estuviese contenido a la presión y a la temperatura de la mezcla. Generalmente, V_i se denomina el *volumen parcial* del i -ésimo componente. Nótese que la relación del volumen parcial de un componente al volumen total, es igual a la fracción molar del componente, mientras que la relación de masas **no** es igual dicha fracción.

Propiedades de energía de las mezclas Los principios y definiciones de la sección precedente pueden fácilmente hacerse extensivos para facilitar el cálculo de las propiedades de energía de las mezclas. Considérese primero la energía interna. Se puede escribir que: $U = U_1 + U_2 + \dots = \sum U_i$. Entonces, la energía interna de la mezcla se calcula con la expresión:

$$U = \sum m_i u_i \quad (2.15)$$

Para la entalpía y para la entropía se pueden desarrollar expresiones equivalentes, así:

$$H = \sum m_i h_i \quad (2.16)$$

$$S = \sum m_i s_i \quad (2.17)$$

Los calores específicos de una mezcla se pueden encontrar a partir de

principios básicos: $c_v = \frac{1}{m} \sum m_i c_{vi}$ y $c_p = \frac{1}{m} \sum m_i c_{pi}$. Por extensión, y a

sabiendas que $c_p - c_v = R$, también se pueden encontrar relaciones para la

constante específica *de la mezcla*, así: $R = \frac{R_0}{PM} = \sum \frac{m_i}{m} R_i$, donde PM es el

peso molecular de la mezcla, m es la masa total de la mezcla y R_i es la

constante específica del i -ésimo componente (recuerde que $PM = m/n$).

En la Termodinámica, en aquellos procesos que involucran mezclas de gases ideales, son de interés principalmente los cambios en los valores de las propiedades de la mezcla. Recordando la ley de Gibbs-Dalton, por la cual cada componente de la mezcla ocupa el volumen total de la misma, se puede encontrar el cambio de energía interna y de la entalpía, utilizando las siguientes expresiones:

$$\Delta U = \sum \Delta U_i = \sum m_i c_{vi} \Delta T = m c_v \Delta T \quad (2.18)$$

$$\Delta H = \sum \Delta H_i = \sum m_i c_{pi} \Delta T = mc_p \Delta T \quad (2.19)$$

El cálculo del cambio de entropía de la mezcla es un poco más complicado; sin embargo, se lo puede determinar a partir de principios básicos, y llegar a la siguiente expresión:

$$\Delta S = \sum m_i c_{pi} \ln \frac{T_2}{T_1} - \sum m_i c_{vi} \ln \frac{p_{i2}}{p_{i1}} \quad (2.20)$$

donde los términos p_{i1} y p_{i2} son las *presiones parciales* inicial y final del i -ésimo componente. En las ecuaciones anteriores, m es la masa total de la mezcla, c_v es el calor específico a volumen constante de la mezcla, c_p es el calor específico a presión constante de la mezcla. Queda claro, entonces, que una mezcla se comporta como si fuera un gas ideal, y que una vez determinadas sus constantes específicas, así como la masa y el número de moles totales, se pueden conocer los cambios en sus propiedades.

2.2 ENFRIAMIENTO Y CALENTAMIENTO DEL AIRE

ATMOSFERICO. HUMIDIFICACION Y DESHUMIDIFICACION

2.2.1 DEFINICIONES DE HIGROMETRIA

El aire atmosférico es, en esencia, una mezcla de gases que se pueden considerar ideales. Pero además de los gases que normalmente componen la atmósfera, el aire contiene cantidades pequeñas y variables de vapor de agua.

Según lo analizado en la sección anterior (mezclas gaseosas), cuando la presión es suficientemente baja para que la ley de Gibbs-Dalton sea válida, un vapor sobrecalentado puede ser tratado como un gas perfecto. Una mezcla de gas y vapor sobrecalentado, puede ser considerada como una mezcla de gases perfectos, y las ecuaciones desarrolladas con anterioridad son aplicables. Es decir, cada componente de la mezcla ejerce una presión parcial que depende de la masa (o del número de moles) que dicho componente tenga presente en la mezcla. En el caso del vapor, debido y a pesar de su mínima presencia, ejerce una presión que se conoce como *presión de vapor*.

Pero a la presión que el vapor se encuentra, y a la temperatura del aire atmosférico, el vapor de agua se supone sobrecalentado. Normalmente la atmósfera no se encuentra saturada con vapor de agua. En muchos procesos industriales, por ejemplo de las industrias textiles y del papel, se requiere un exhaustivo control del vapor que se encuentra en la atmósfera así como de su temperatura⁶. El acondicionamiento de aire para el confort de las edificaciones, el diseño de las torres de enfriamiento, y la meteorología, son otras instancias que encierran un estudio de las propiedades del aire húmedo. A este estudio se lo ha llamado *higrometría* (o psicrometría). La higrometría hace uso de términos técnicos que serán definidos a continuación.

Temperatura de bulbo seco, T_{BS} Es la temperatura normal del aire atmosférico medido con un termómetro de mercurio normal y corriente.

⁶ Referencia [2]

Temperatura de bulbo húmedo, T_{BH} Es la temperatura medida utilizando un termómetro de mercurio cuyo bulbo ha sido sumergido en un medio húmedo, de modo que el flujo de aire que debe utilizarse para medir este parámetro, provoca la evaporación del agua. Esta evaporación causa a su vez un descenso en la temperatura del bulbo, hasta que se establece el equilibrio y la estabilización de la temperatura de bulbo húmedo. La diferencia entre estas dos temperaturas se denomina *depresión de bulbo húmedo*.

Humedad específica, ω Es la relación de la masa de vapor de agua m_s , sobre la masa de aire seco m_a , sin importar el volumen V de mezcla. Así,

$$\omega = \frac{m_s}{m_a} = \frac{m_s/V}{m_a/V} = \frac{v_a}{v_s} \quad (2.21)$$

donde v_a y v_s son los volúmenes específicos del aire seco y del vapor de agua en la mezcla, respectivamente. Dándole al vapor de agua el trato de un gas perfecto, y escribiendo p_s para la presión parcial de vapor de agua, se tiene que $p_s V = m_s R_s T$; de la misma forma, para el aire seco $p_a V = m_a R_a T$, de

donde se sigue que $\omega = \frac{R_a p_s}{R_s p_a}$. por tablas: $R_a = 0.2871 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$, y

$R_s = 0.4615 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$. Además, ya que $p_a = p - p_s$, (donde p es la presión barométrica), se tiene por tanto que

$$\omega = 0.622 \frac{p_s}{p_a} = 0.622 \frac{p_s}{p - p_s} \quad (2.22)$$

Humedad relativa, ϕ Es la relación entre la presión parcial real del vapor, p_s , y la presión parcial del vapor cuando el aire está saturado a la misma temperatura. Así

$$\phi = \frac{p_s}{p_g} \quad (2.23)$$

y es preferentemente expresada como porcentaje. Este término es muy importante, y en términos sencillos indica qué tan lejos está el aire de saturarse (es decir, no acepta más vapor, y este empieza a condensarse).

Punto de Rocío Es la temperatura a la cual debe enfriarse el aire atmosférico, a presión constante, para que el vapor de agua empiece a condensar. Es fundamental la condición de enfriamiento “a presión constante”; esto implica que el vapor, inicialmente sobrecalentado, empieza a enfriarse hasta que se satura y entonces comienza el proceso de condensación.

2.2.2 CALOR SENSIBLE

Cuando una sustancia recibe o cede calor, y su cambio de estado no involucra un cambio de fase (fusión o solidificación, evaporación o condensación, sublimación), la temperatura de la sustancia presentará un cambio de temperatura más o menos apreciable y medible. A este tipo de calor se denomina **calor sensible**.

2.2.3 CALOR LATENTE

Cuando, por el contrario, la sustancia que recibe o cede calor, sufre un cambio de fase, no existe una elevación o descenso de la temperatura, sino que el calor involucrado se utiliza exclusivamente para provocar el cambio de fase. A este calor se le denomina **calor latente**, porque está allí, en forma latente, aunque no se manifieste con un cambio de temperatura.

En este trabajo de titulación, es necesario hacer esta distinción entre estos dos tipos de calor, puesto que el aire atmosférico es una mezcla de gases ideales y **de un vapor condensable** como es el vapor de agua, de modo que cualquier entrega o disipación de calor puede provocar que el aire se caliente o se enfríe, que el vapor también se caliente o enfríe, o que se el vapor se condense o el agua se evapore.

2.3 LA CARTA PSICROMETRICA. USOS

En el acondicionamiento de aire pueden estar implícitos los siguientes procesos psicrométricos:

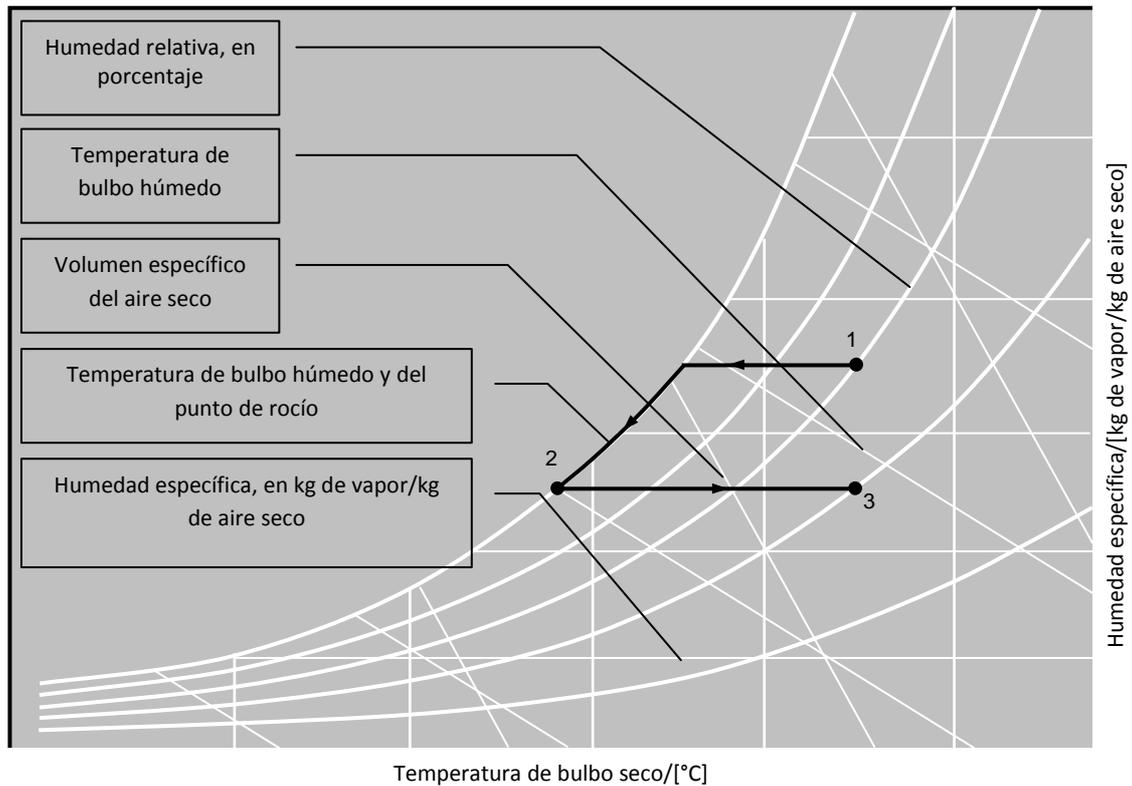
1. *Mezcla* de corrientes de aire húmedo, que suelen ocurrir en condiciones idealmente adiabáticas (sin flujo de calor).
2. *Enfriamiento* de una corriente de aire húmedo. Un enfriamiento sensible se logra a menudo por medio de un dispositivo de refrigeración. Si se desea incrementar el nivel de humedad para la corriente de aire, el enfriamiento sensible también puede producirse rociando la corriente de aire con agua fría. Cuando se rocía con agua una corriente de aire

húmedo, el proceso se denomina *humidificación*. El enfriamiento de una corriente de aire húmedo también puede provocar la eliminación de la humedad. Este proceso se llama *deshumidificación*.

3. *Calentamiento* de una corriente de aire húmedo. En este caso, el contenido de vapor no cambia, pero la temperatura se eleva, reduciendo aparentemente la humedad relativa.

Al hacer una revisión de las cantidades definidas con anterioridad (temperatura de bulbo seco, de bulbo húmedo, punto de rocío, humedad relativa y humedad específica), es razonable pensar que tales propiedades pueden ser de alguna manera representadas mediante un gráfico que facilite por un lado visualizar mejor la relación entre ellas, y en segundo lugar, esquematizar de forma más clara los procesos antes descritos. La única observación que debe hacerse es que como la presión atmosférica no es la misma en cualquier lugar, sino que cambia principalmente con la altura geográfica, y como las ecuaciones que regulan estos procesos involucran a este parámetro, es claro que no puede ser trazado un único gráfico para todas las posibles presiones atmosféricas. Este gráfico se denomina la Carta Psicrométrica, y en el Anexo 1 (Carta Psicrométrica) se muestran dos Cartas, una para el nivel del mar ($p = 1 \text{ atm} = 1,01325 \text{ bar}$) y otra para una altura de 2.800 m ($p = 740 \text{ mbar}$), que es la altura promedio de la ciudad de Quito, en la cual funcionaría el equipo objeto de este Trabajo de Titulación. A continuación, en la Figura No. 2 se presenta un ejemplo del uso de la mencionada Carta Psicrométrica. En este caso se esquematiza un proceso de enfriamiento, deshumidificación y posterior calentamiento del aire, con lo cual se ha conseguido mantener la temperatura

de bulbo seco del aire, pero además se ha logrado bajar su humedad específica (así como su humedad relativa).



Fuente: Propia de la autora.

Figura No. 2 Carta Psicrométrica con varios procesos

2.4 MECANISMOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR

2.4.1 CONDUCCION TÉRMICA

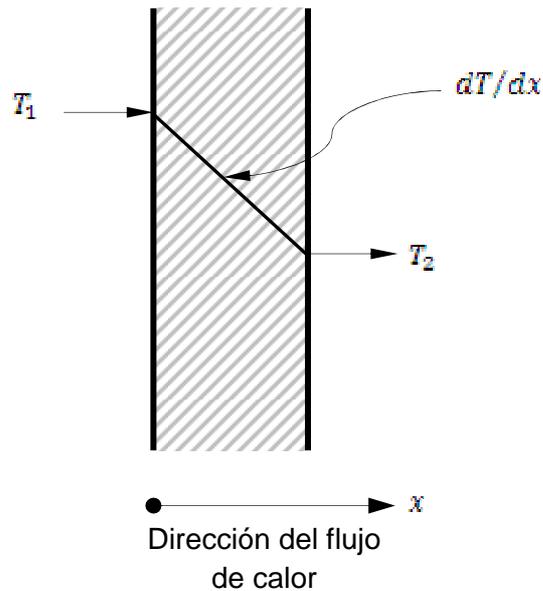
A la mención de la palabra *conducción* debemos evocar de inmediato conceptos de *actividad atómica y molecular*, pues hay procesos en estos

niveles que sustentan este modo de transferencia de calor. La conducción se considera como la transferencia de energía de las partículas más energéticas a las menos energéticas de una sustancia, debido a las interacciones entre las mismas.

En el mecanismo físico de conducción, ante la presencia de un gradiente de temperatura, la transferencia de energía debe ocurrir en la dirección de la temperatura decreciente. La situación es muy similar en los gases y en los líquidos, aunque las moléculas están menos espaciadas y las interacciones moleculares son más fuertes y frecuentes. De igual manera, en un sólido la conducción se atribuye a la actividad atómica en forma de vibraciones reticulares. El punto de vista moderno es atribuir la transferencia de energía a *ondas reticulares* inducidas por el movimiento atómico. En un no conductor, la transferencia de energía se da exclusivamente por la vía de estas ondas reticulares; en un conductor, la transferencia de energía también se debe al movimiento de traslación de los electrones libres.

Los ejemplos de transferencia de calor por conducción son innumerables. El extremo expuesto de una cuchara metálica introducida súbitamente en una taza de café caliente se calentará debido a la conducción de energía a través de la cuchara. En un día invernal hay una pérdida significativa de energía de una habitación caliente hacia el exterior; esta pérdida se debe principalmente a la transferencia de calor por conducción a través de la pared que separa el aire de la habitación del aire exterior.

Es posible cuantificar los procesos de transferencia de calor en términos de las *ecuaciones o modelos apropiados*. Estas ecuaciones o modelos sirven para calcular la cantidad de energía que se transfiere por unidad de tiempo. Para la conducción de calor, la ecuación o modelo se conoce como *ley de Fourier*.



Fuente: La propia autora.

Figura No. 3 Flujo unidimensional ideal

Para la pared plana unidimensional que se muestra en la Figura No. 3, la cual tiene una distribución de la temperatura $T(x)$, la ecuación o modelo se expresa como

$$\dot{Q}_x = -kA \frac{dT}{dx} \quad (2.24)$$

donde \dot{Q}_x , medida en vatios (W), representa el *flujo de calor por conducción*, por unidad de tiempo, en la dirección x , k , medida en $W/m^\circ C$, es la *conductividad térmica del material* del cual está elaborada la pared de la No. 3, y dT/dx , medida en $^\circ C/m$, es el *gradiente de temperaturas* a lo largo de la pared y en la dirección x , *perpendicular* a la superficie de transferencia por conducción. El signo (-) indica que el gradiente de temperaturas es opuesto a la dirección del flujo de calor. En ocasiones es conveniente expresar este flujo de calor mediante la expresión siguiente: $q'' = -k \frac{dT}{dx}$, medida en W/m^2 , y que

representa la velocidad con que se transfiere el calor en la dirección x , por unidad de área. En las condiciones de estado estable que se muestran en la Figura No. 3, donde la distribución de temperatura es *lineal*, el gradiente de temperatura se expresa como $\frac{dT}{dx} = \frac{T_2 - T_1}{L}$, y el flujo de calor entonces es

$$q''_x = -k \frac{T_2 - T_1}{L} = k \frac{\Delta T}{L}.$$

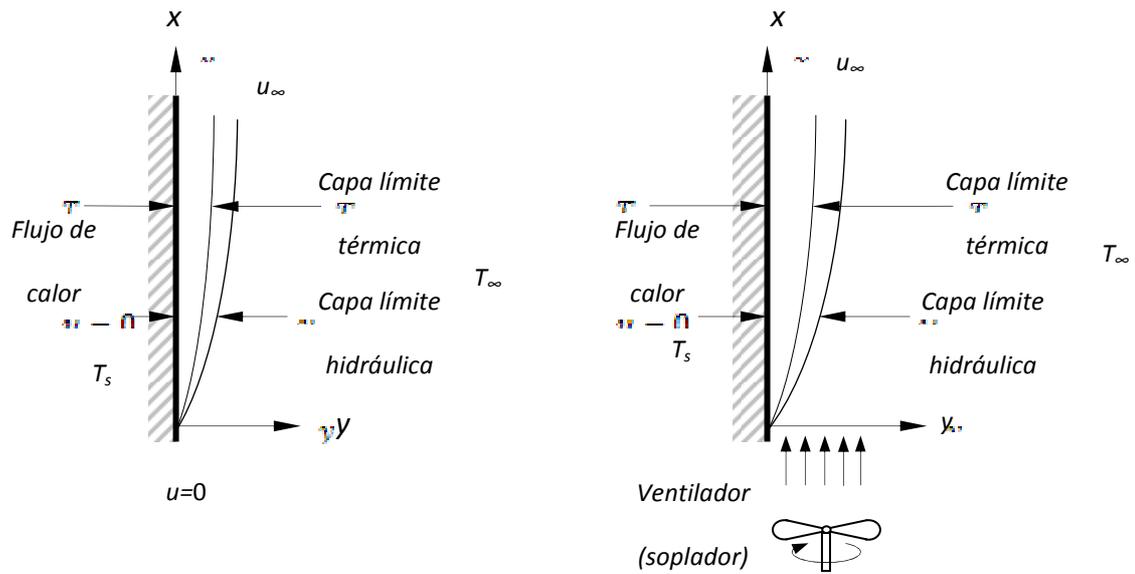
Obsérvese que esta ecuación proporciona *un flujo de calor*, es decir, la velocidad de calor transferido por *unidad de área*. El *calor transferido* por conducción por unidad de tiempo, $\dot{Q}/[W]$, a través de una pared plana del área A , es entonces el producto del flujo y el área, $\dot{Q}_x = q''_x \cdot A$.

En el Anexo 2 se incluye una Tabla con valores de k para diferentes sustancias y materiales.

2.4.2 CONVECCION

El modo de transferencia de calor por convección se compone de dos mecanismos. Además de la transferencia de energía debida al movimiento molecular aleatorio (llamado *difusión*, y que se analizó en el mecanismo de conducción), la energía también se transfiere mediante el movimiento global, o microscópico del fluido. El movimiento del fluido se asocia con el hecho de que, en cualquier instante, grandes cantidades de moléculas se mueven de forma colectiva o como agregados. Tal movimiento, en presencia de un gradiente de temperatura, contribuye a la transferencia de calor. Como las moléculas con el agregado mantienen su movimiento aleatorio, la transferencia total de calor se debe entonces a una superposición de transporte de energía por el movimiento aleatorio de las moléculas y por el movimiento global del fluido. Se acostumbra utilizar el término convección cuando se hace referencia a este transporte acumulado y el término advección cuando se habla del transporte debido al movimiento volumétrico del fluido.

Estamos especialmente interesados en la transferencia de calor por convección que ocurre entre un fluido en movimiento y una superficie limitante cuando estos tienen diferentes temperaturas. Considere el flujo del fluido sobre la superficie calentada de la Figura No. 4.



Fuente: La propia autora

Figura No. 4 Convección Libre y Forzada

Una consecuencia de la interacción fluido – superficie es el desarrollo de una región en el fluido en la que la velocidad varía de cero en la superficie hasta un valor finito u_∞ asociado con el flujo. Esta región del fluido se conoce como capa límite hidrodinámica o de velocidad. Más aún, si las temperaturas de la superficie y del fluido difieren, habrá una región del fluido a través de la cual la temperatura varía desde T_s en la coordenada $y=0$, hasta T_∞ en el flujo exterior. Esta región, denominada capa límite térmica, puede ser más pequeña, más grande o del mismo tamaño que aquella en la que varía la velocidad. En cualquier caso, si $T_s > T_\infty$, ocurrirá la transferencia de calor por convección entre la superficie y el flujo exterior.

El modo de transferencia de calor por convección se sustenta tanto en el movimiento molecular aleatorio como en el movimiento volumétrico del fluido en la capa límite. La contribución debida al movimiento molecular aleatorio (difusión) domina cerca de la superficie donde la velocidad del flujo es baja. De hecho, en la interfaz entre la superficie y el fluido ($y = 0$), la velocidad del fluido es cero y el calor se transfiere sólo por este mecanismo. La contribución debida al movimiento volumétrico del fluido se origina por el hecho de que la capa límite crece a medida que el flujo avanza en la dirección x . En efecto, el calor que se conduce en esta capa es arrastrado corriente abajo y finalmente se transfiere al fluido fuera de la capa límite. La apreciación de los fenómenos de la capa límite es esencial para la comprensión de la transferencia de calor por convección. Es por esta razón que la disciplina de la mecánica de fluidos desempeña un papel vital en el análisis de la convección.

La transferencia de calor por convección se clasifica de acuerdo con la naturaleza del flujo. Se habla de *convección forzada* cuando el flujo es causado por medios externos, como un ventilador, una bomba o vientos atmosféricos. Como ejemplo, considérese el uso de un ventilador para proporcionar enfriamiento por aire mediante convección forzada a los componentes eléctricos calientes, sobre un conjunto de tarjetas de circuitos impresos. En cambio, en la *convección libre* (o *natural*) el flujo es inducido por fuerzas de empuje que surgen a partir de diferencias de densidad ocasionadas por variaciones de temperatura en el fluido. Un ejemplo es la transferencia de calor por convección libre que ocurre a partir del capó de un auto expuesto al sol. El aire que hace contacto con la superficie metálica experimenta un aumento de

temperatura y, en consecuencia, una reducción en su densidad. Como ahora es más ligero que el aire de los alrededores, las fuerzas de empuje inducen un movimiento vertical por lo que el aire caliente que asciende del capó del auto es reemplazado por un flujo de entrada de aire ambiental más frío.

Por lo general, la energía que se transfiere es la energía sensible o energía térmica interna del fluido. Sin embargo, hay procesos de convección en los que existe, además, intercambio de calor latente. Éste generalmente se asocia con un cambio de fase entre los estados líquido y vapor del fluido. Dos casos especiales de interés son la ebullición y la condensación. Por ejemplo, la transferencia de calor por convección resulta del movimiento de fluido inducido por las burbujas de vapor generadas en el fondo de una cacerola en la que se está hirviendo agua, o por la condensación de vapor de agua sobre la superficie externa de una tubería de agua fría.

Sin importar la naturaleza particular del proceso de transferencia de calor por convección, la ecuación o modelo apropiado es de la forma

$$q'' = h(T_s - T_\infty) \quad (2.25)$$

donde q'' , el flujo de calor por convección, medido en W/m^2 , es proporcional a la diferencia entre las temperaturas de la superficie y del fluido, T_s y T_∞ , respectivamente. Esta expresión se conoce como la *ley de enfriamiento de Newton*, y la constante de proporcionalidad h , medida en $W/m^2 \cdot K$, se denomina el *coeficiente fílmico de transferencia de calor por convección*. Éste depende de las condiciones en la capa límite, en las que influyen la geometría

de la superficie, la naturaleza del movimiento del fluido y una variedad de propiedades termodinámicas y de transporte del fluido. Por este motivo, no puede construirse una tabla que exprese los valores de h , a diferencia de la conductividad k .

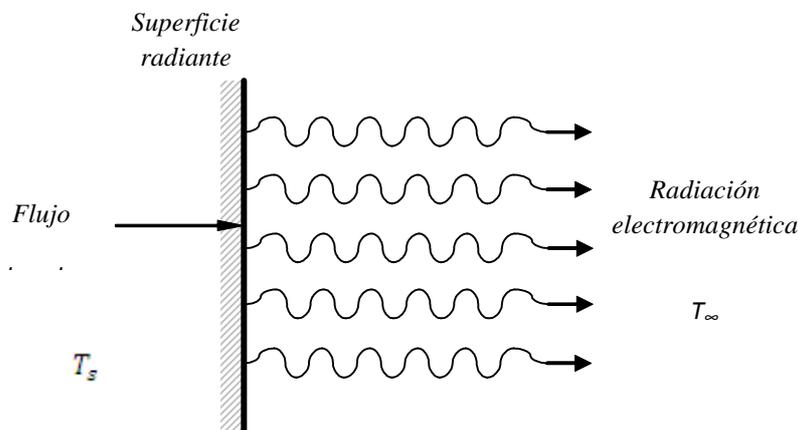
Cuando se usa la ecuación 2.25, se supone que el flujo de calor por convección es positivo si el calor se transfiere desde la superficie ($T_s > T_\infty$), y negativo si el calor se transfiere hacia la superficie ($T_\infty > T_s$). Sin embargo, si esto último ocurre, no hay nada que nos impida expresar la ley de enfriamiento de Newton como $q'' = h(T_s - T_\infty)$, en cuyo caso la transferencia de calor es positiva si es hacia la superficie.

2.4.3 RADIACIÓN

La radiación térmica es la energía *emitida* por la materia que se encuentra a una temperatura finita. Aunque se centre la atención en la radiación de superficies sólidas, esta radiación también puede provenir de líquidos y gases. Sin importar la forma de la materia, la radiación se puede atribuir a cambios cuantitativos en las configuraciones electrónicas de los átomos o moléculas. La energía del campo de radiación es transportada por ondas electromagnéticas (o alternativamente, fotones). Mientras la transferencia de energía por conducción o por convección requiere la presencia de un medio material, la radiación no lo precisa. De hecho, la transferencia por radiación ocurre de manera más eficiente en el vacío.

Considere los procesos de transferencia de radiación para la superficie de la Figura No. 5. La radiación que la superficie *emite* se origina a partir de la energía térmica de la materia limitada por la superficie, y la velocidad a la que libera energía por unidad de área, W/m^2 , se denomina la *potencia emisiva superficial*, E . El límite superior de la potencia emisiva, la establece la *ley de Stefan-Boltzmann*

$$E_b = \sigma T_s^4 \quad (2.26)$$



Fuente: La propia autora

Figura No. 5 Radiación desde una superficie caliente

donde T_s es la *temperatura absoluta*, en K , de la superficie, y σ es la *constante de Stefan-Boltzmann* ($\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} W/m^2 \cdot K^4$). La superficie que emite radiación electromagnética en forma perfecta o total, se denomina radiador ideal o *cuerpo negro*.

El flujo de calor emitido por una superficie real es menor que el de un cuerpo negro a la misma temperatura, y está dado por $E = \varepsilon\sigma T_s^4$, donde ε es una propiedad radiativa de la superficie denominada *emisividad*. Con valores en el rango $0 \leq \varepsilon \leq 1$, esta propiedad proporciona una medida de la eficiencia con que una superficie emite energía en relación con un cuerpo negro. Esto depende marcadamente del material de la superficie y del acabado.

La radiación también puede *incidir* sobre una superficie desde sus alrededores. La radiación se origina desde una fuerza especial, como el sol, o de otras superficies a las que se expone la superficie de interés. Sin tener en cuenta la fuente, designamos la velocidad a la que toda esa radiación incide sobre un área unitaria de la superficie como la *irradiación* G .

Una parte de la irradiación, o tal vez toda, será *absorbida* por la superficie, y así se incrementará la energía térmica del material. La velocidad a la que la energía radiante es absorbida por área superficial unitaria, se evalúa a partir del conocimiento de una propiedad radiativa de la superficie denominada *absorsividad* α . Es decir, $G_{abs} = \alpha G$, donde $0 \leq \alpha \leq 1$. Si $\varepsilon < 1$, y si la superficie es *opaca*, parte de la irradiación se *refleja*. Si la superficie es *semitransparente*, parte de la irradiación también se *transmite*.

Un caso especial que ocurre con frecuencia implica el intercambio de radiación entre una superficie pequeña a T_s y una superficie isotérmica mucho más grande que rodea por completo a la pequeña. Los *alrededores* podrían ser, por ejemplo, las paredes de un cuarto o un horno cuya temperatura T_{alr} es

diferente de la de una superficie rodeada. Para tal condición, la irradiación se aproxima con la emisión de un cuerpo negro a la temperatura T_{alr} , caso en el que $G = \sigma T_{alr}^4$. Si se supone que la superficie es tal que $\alpha = \varepsilon$ (*superficie gris*), la velocidad *net*a de transferencia de calor por radiación *desde* la superficie, expresada por unidad de área de la superficie, es

$$q''_{rad} = \frac{\dot{Q}}{A} = \varepsilon \sigma (T_s^4 - T_{alr}^4) \quad (2.27)$$

Esta expresión proporciona la diferencia entre la energía térmica que se libera debido a la emisión por radiación y la que se gana debido a la absorción de radiación. Hay muchas aplicaciones para las que es conveniente expresar el intercambio neto de calor por radiación en la forma

$$q_{rad} = h_r A (T_s - T_{alr}) \quad (2.28)$$

donde h_r es el *coeficiente de transferencia de calor por radiación*. Aquí modelamos el fenómeno de radiación de forma similar a la convección. En este sentido, *linealizamos* la ecuación de la velocidad de radiación, haciéndola proporcional a la diferencia de temperaturas en lugar de a la diferencia entre dos temperaturas elevadas a la cuarta potencia. Observe, sin embargo, que h_r depende marcadamente de la temperatura, mientras que la dependencia del coeficiente de transferencia de calor por convección, h , con respecto a la temperatura, es por lo general insignificante.

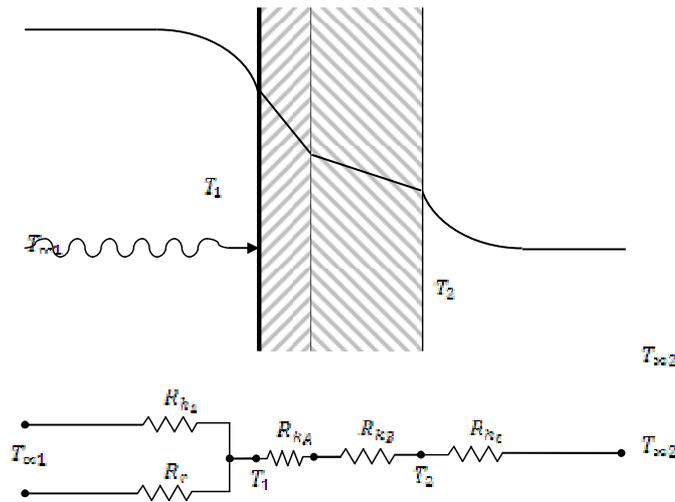
Una superficie caliente, por lo general, también puede transferir calor simultáneamente por convección a un gas contiguo. Para las condiciones indicadas, la velocidad total de transferencia de calor desde la superficie es entonces $\dot{Q} = Q_{conv} + Q_{rad} = hA(T_s - T_\infty) + (T_s^4 - T_{alr}^4)$.

2.4.4 EL COEFICIENTE GLOBAL DE TRANSFERENCIA DE CALOR

En términos generales, es imposible separar en forma independiente los tres modos de transferencia de calor descritos anteriormente. Esto quiere decir, que en la mayoría de los casos, al menos dos o uno de los tres modos tienen una gran significación en el proceso de transferencia de calor desde una superficie caliente. Una forma de integrarlos es introducir una analogía eléctrica con el flujo de corriente, a través de una resistencia eléctrica, en virtud de una diferencia de potencial o voltaje; de similar manera, se puede asumir que el flujo de calor ocurre a través de una resistencia térmica, en virtud de una diferencia de temperaturas. En otras palabras, a la ecuación eléctrica $i = \frac{V}{R}$, le

corresponde su análoga térmica $\dot{Q} = \frac{\Delta T}{R_{t\acute{e}rmica}}$. Esta resistencia térmica, al igual

que en un circuito eléctrico, representa en sí la “resistencia total o equivalente” que pueden ofrecer al flujo de calor todos los modos de transferencia involucrados en un determinado fenómeno bajo estudio, lo cual puede expresarse como $R_T = \sum R_i = R_{cond.} + R_{conv.} + R_{rad.}$.



Fuente: la propia autora

Figura No. 6 Resistencias equivalentes en serie y en paralelo

Ahora, si asumimos que de alguna forma siempre va a ser posible determinar esta resistencia total, se puede introducir un nuevo concepto que permita calcular el flujo de calor a través de un sistema como el descrito en la Figura No. 6, el mismo que recibe el nombre de *coeficiente global de transferencia de calor*, U , medido en $W/m^2 \cdot K$, que por obvias razones será igual al inverso de la

resistencia total: $U = \frac{1}{R_T}$. Bajo esta premisa, la ecuación general de

transferencia de calor se puede escribir de la siguiente manera

$$\dot{Q} = U \cdot A \cdot \Delta T \quad (2.29)$$

Una parte esencial, y a menudo la más incierta, de cualquier análisis de un intercambiador de calor⁷, es la determinación del coeficiente global de transferencia de calor. Este coeficiente debe determinarse teniendo en cuenta las resistencias de conducción y convección entre fluidos separados por paredes planas y cilíndricas compuestas, así como las posibles radiaciones que se puedan presentar a los dos lados de dichas superficies. Es importante reconocer, sin embargo, que los resultados se aplican sólo a superficies limpias sin aletas.

Durante la operación normal de un intercambiador de calor, a menudo las superficies están sujetas a la obstrucción por impurezas, formación de moho, u otras reacciones entre el fluido y el material de la pared. La posterior deposición de una película o incrustaciones sobre la superficie puede aumentar mucho la resistencia a la transferencia de calor entre los fluidos. Este efecto se puede tratar mediante la introducción de una resistencia térmica adicional, denominada factor de *impureza*, R_f . Su valor depende de la temperatura de operación, velocidad del fluido, y tiempo de servicio del intercambiador de calor.

⁷ Se denomina "Intercambiador de Calor" a cualquier dispositivo que tenga como función facilitar la transferencia de de esta forma de energía, desde un medio hacia otro.

CAPITULO TRES

3. PARÁMETROS DE DISEÑO

Es necesario recalcar el hecho de que el objetivo del presente trabajo es el diseño de un equipo de laboratorio; es decir, su finalidad no es la de producir algún tipo de producto. Por el contrario, su intención es la de convertirse en un bien para la Institución de Educación Superior, el mismo que podrá ser utilizado por sus alumnos, beneficiarios finales del uso que se le dé al mismo.

A continuación se analizan los principales parámetros que van a intervenir en el proceso de diseño y selección de equipos y componentes, de manera que el resultado final que se obtenga después del diseño cumpla a cabalidad con su propósito.

Antes de establecer los parámetros de diseño, es importante definir primeramente una “zona de confort”. La definición de este término depende de algunos parámetros, muchos de los cuales pueden ser incluso subjetivos. Por ejemplo, según la ASHRAE⁸, la sensación de confort térmico de las personas depende en primer lugar del sistema de autorregulación de la temperatura corporal (controlado por el hipotálamo en el cerebro); pero además depende de la forma en que el cuerpo intercambia calor con el medio. Dentro de este último

⁸ American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers, Inc. - 2001 ASHRAE Handbook, Fundamentals, SI Edition, Chapter 8.

mecanismo, se deberá considerar: la superficie corporal, la pérdida de calor sensible por la piel, la pérdida de calor evaporativo desde la piel, pérdidas de calor a través de la respiración y un parámetro relacionado con la vestimenta.

Finalmente, existe además el mecanismo humano que se denomina “metabolismo”, del cual también va a depender la sensación de confort. Este parámetro tiene que ver, por ejemplo, con el tipo de actividad que realiza la persona dentro del ambiente que se desea acondicionar; no es lo mismo la sensación de confort dentro de un teatro que dentro de una discoteca o una oficina, o si el clima es caluroso, frío, etc.

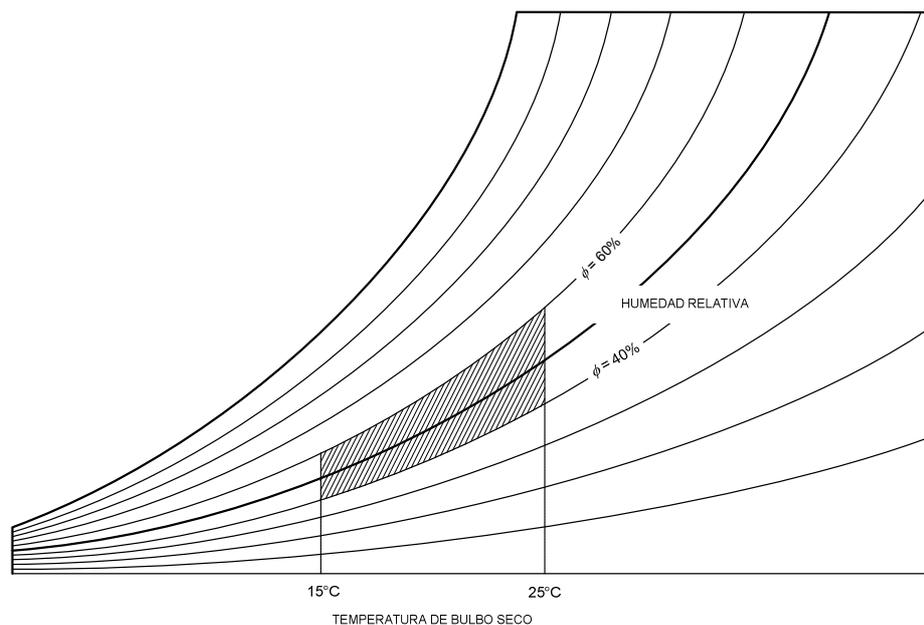
Aparte de estas condiciones en alguna medida cuantificables, existen otros factores que inciden en la sensación de confort térmico: no uniformidad del ambiente, estímulos visuales, edad y clima exterior, se consideran como factores secundarios.

Estudios realizados por Rohles y Nevins (1971) y Rohles (1973) con alrededor de 1,600 estudiantes de edades similares, determinaron que existe una

correlación entre el “nivel de confort” y		
la temperatura, la humedad, el género	+ 3	Muy caliente
(masculino o femenino) y el tiempo de	+2	Caliente
exposición al ambiente. La escala de	+1	Ligeramente caliente
sensación térmica desarrollada para	0	Neutro
este estudio se denomina la “Escala	- 1	Ligeramente frío
ASHRAE de Sensación Térmica”:	-2	Frío
	-3	Muy frío

El estudio demostró que las mujeres eran más sensibles a los cambios de temperatura que a los cambios de humedad.

Finalmente, y puesto que la definición de esta zona de confort puede resultar muy difícil y subjetiva, para efectos de este trabajo se la definirá como aquella zona dentro de la Carta Psicrométrica delimitada por las líneas de temperatura de bulbo seco entre 15 y 25°C, y por las líneas de humedad relativa entre 40 y 60%⁹. En la figura No. 7 se observa una “zona de confort” elegida arbitrariamente para efectos de este estudio.



Fuente: La propia autora.

Figura No. 7 “Zona de Confort”. Zona escogida arbitrariamente pero que corresponde a una realidad geográfica de alguna zona del planeta.

⁹ Zona escogida en forma arbitraria por la autora. Referencia [7]

3.1 FLUJO DE AIRE

El aire atmosférico del ambiente deberá ser ingresado al equipo, a fin de que pueda ser observado, analizado, manipulado, etc., de manera que es necesario determinar, para este tipo de equipo, los siguientes parámetros.

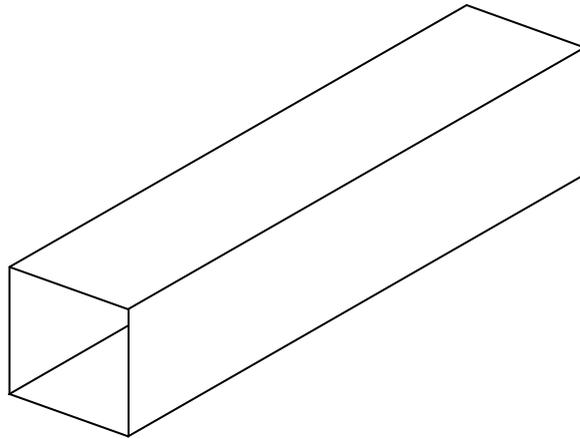
3.1.1 VOLUMEN DE CONTROL

Conviene recordar lo que se definió en el capítulo anterior: un sistema termodinámico se puede definir como “...una región del espacio que contiene una cantidad de materia, cuyo comportamiento se está investigando”. Sobre los sistemas abiertos y sistemas cerrados, se dijo que: cuando la masa dentro del sistema no cambia con el tiempo, es decir, no sale ni entra del sistema, se está hablando de un *sistema cerrado*. Pero cuando a través de una parte de los límites del sistema *fluye* la materia (es decir, entra, sale o las dos cosas), se dice que este es un *sistema abierto*. Cuando la cantidad de materia que entra al sistema por unidad de tiempo, es igual a la cantidad de materia que sale del mismo, por unidad de tiempo, se dice que el proceso es de *flujo estable*.

Con estos antecedentes, el equipo será analizado como un sistema abierto de flujo estable. A este tipo de sistemas algunos autores los denominan “volumen de control”, porque este es el volumen sobre el cual se realizarán los análisis y el manejo de las variables que se requieran durante la operación del equipo.

El volumen de control físico estará constituido por un ducto de sección cuadrangular, cuyas dimensiones deberán ser adecuadas para mantener la velocidad de flujo del aire dentro de valores manejables y, sobre todo, medibles

o cuantificables. Estos tres parámetros están relacionados mediante la ecuación de la continuidad: $Q = VA$, donde Q es el flujo volumétrico, V es la velocidad del flujo y A es el área de la sección transversal por la que fluye el fluido. En la Figura No. 8 se esquematiza el ducto inicialmente propuesto.



Fuente: La propia autora.

Figura No. 8 Ducto de sección cuadrangular (volumen de control).

3.1.2 FLUJO MÁSSICO DE AIRE

Como se indica en la sección anterior, la ecuación de la continuidad permite relacionar la geometría del sistema con sus propiedades mecánicas. Comercialmente se puede conseguir en el mercado ventiladores o manejadoras de aire (blowers) con diversidad de flujos volumétricos, medidos generalmente en cfm (pies cúbicos por minuto). El más pequeño que fue

posible encontrar es de 350 cfm (0.1652 m³/h). La velocidad del flujo depende del régimen que se desee tener dentro del ducto.

3.1.3 FLUJO LAMINAR Y TURBULENTO

Cuando un fluido fluye por un ducto, existen dos principales oposiciones al flujo: el rozamiento externo del fluido con las paredes del ducto, y el rozamiento interno entre las propias partículas del fluido. A esta última característica del fluido se conoce como la **viscosidad**. Esta propiedad es intrínseca o propia de cada fluido, pero tiene, en general, una relación muy estrecha con la temperatura. En algunos fluidos la viscosidad se incrementa con el aumento de la temperatura, y en otros fluidos ocurre lo contrario. Existe un parámetro adimensional que relaciona las fuerzas de inercia con las fuerzas viscosas asociadas a un flujo. Este se denomina el Número de Reynolds, Re, y está dado por la siguiente expresión:

$$\text{Re} = \frac{VL}{\nu} = \frac{\rho VL}{\mu} \quad (3.1)$$

Donde:

V es la velocidad del fluido dentro del ducto,

L es la longitud característica del ducto,

ν es la viscosidad cinemática del fluido,

ρ es la densidad del fluido, y

μ es la viscosidad dinámica del fluido.

De acuerdo con la teoría de mecánica de fluidos, y conforme al Manual de la ASHRAE¹⁰, cuando el valor de Re es menor a 2,300, el flujo es **laminar**, y se caracteriza porque las líneas de flujo son paralelas entre sí. Cuando el número de Reynolds tiene un valor superior a 10,000 se dice que el flujo es **turbulento**, y su característica es que el flujo es errático, las partículas de fluido se mueven sin un patrón definido. La región en el rango $2,300 < Re < 10,000$, se denomina “zona de transición”, en la cual ninguno de los dos patrones de flujo predomina, y el análisis del flujo se vuelve extremadamente complicado.

3.1.4 CONDICIONES DE FLUJO

Para el caso del equipo objeto de este trabajo, se requiere que el flujo sea laminar, es decir que $Re \leq 2,300$. Los valores de la viscosidad del aire dependen de su temperatura, y se pueden hallar en tablas; asumiendo un valor de Re igual a 1,000 para garantizar flujo laminar, se podrá determinar el valor de la velocidad requerida dentro del ducto, y por consiguiente las dimensiones de este, una vez que se conozca el flujo volumétrico del ventilador a utilizar.

3.2 SISTEMAS DE CALENTAMIENTO

El calentamiento es una parte importante de todos los procesos de acondicionamiento de aire.

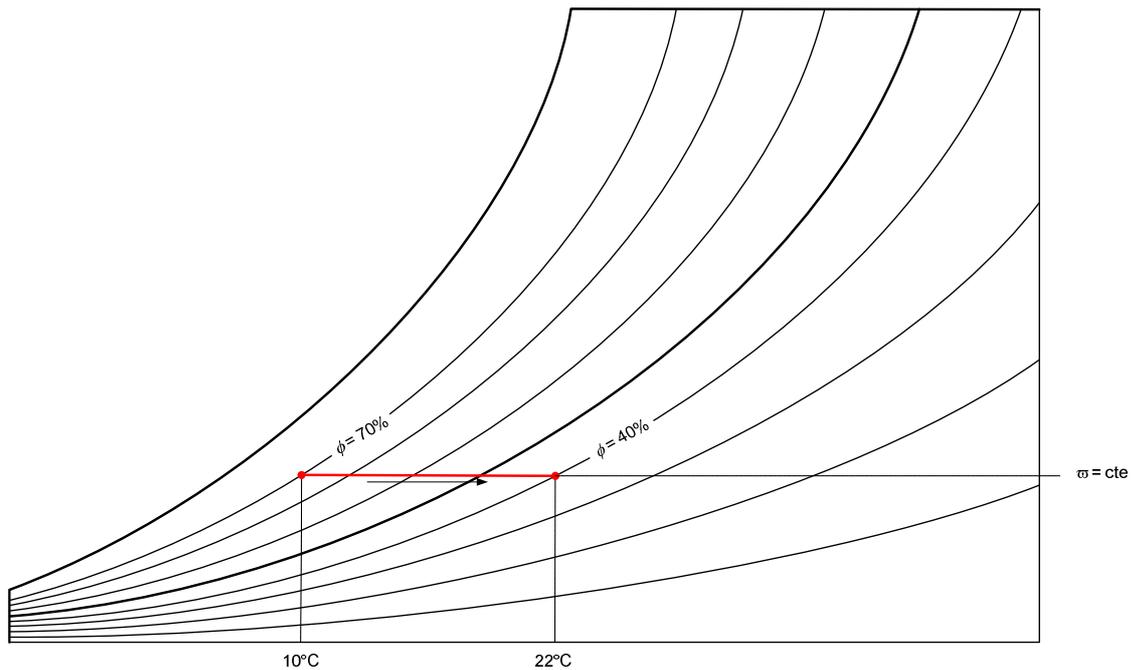
¹⁰ 2001 ASHRAE Handbook, Fundamentals, SI Edition, Chapter 2, page 2.3.

De acuerdo con las definiciones del Capítulo 2, el calentamiento sensible a una presión constante, lo que provoca es una elevación de las temperaturas de bulbo seco y bulbo húmedo, no hay un cambio en la humedad específica (o en el contenido de humedad), pero sí ocurre una disminución de la humedad relativa. Esto quiere decir que un simple calentamiento utilizado para lograr un cierto confort respecto de la temperatura, podría ocasionar un inconfort en cuanto a la humedad.

No obstante, en sistemas en los cuales se desea eliminar o disminuir la humedad del aire, como se verá más adelante, el principal y quizá único mecanismo práctico para lograrlo es el enfriamiento del aire hasta que alcance la temperatura de rocío y ocurra la condensación del vapor de agua y la consiguiente dehumidificación del aire.

Pero este aire frío, aunque con menos humedad, debe ser regresado a una temperatura de bulbo seco que sea nuevamente confortable.

Por eso es necesario disponer de un sistema de calentamiento. En la Figura No. 9 se esquematiza el proceso de calentamiento puro.



Fuente: La propia autora

Figura No. 9 Calentamiento puro.
La humedad específica (ω) permanece constante, la humedad relativa cambia de 70% a 40%, en un calentamiento de 10 a 22°C.

3.2.1 DIVERSAS FORMAS DE CALENTAMIENTO

Existen muchas fuentes de calentamiento que se pueden utilizar para transferir calor al flujo de un fluido. Unas serán más eficientes que otras, y así mismo algunas serán menos económicas que otras.

- La fuente natural de calor por excelencia es el sol. Sin embargo la cantidad o, expresado de mejor manera, los volúmenes de energía calórica que se pueden obtener de esta fuente son limitados y, además, cíclicos (día y noche). No obstante, dentro de ciertos parámetros, su uso para calentamiento de una corriente de aire podría ser factible. En

resumen, y particularmente en ambientes de frío extremo, el sol no es la fuente ideal de calentamiento.

- La fuente de energía más asequible es, sin duda, la energía eléctrica, por lo que en muchos de los casos de calentamiento, se dispone de resistencias eléctricas que ante el paso de la corriente (por el efecto joule), generan una cantidad determinada de calor que se transmite al fluido mediante uno o más de los mecanismos de transferencia de calor indicados en el Capítulo 2. Estas resistencias eléctricas se pueden conseguir en el mercado en distintos tamaños (capacidades) y formas que dependen de la aplicación específica.

Para el caso del túnel objeto de este trabajo, las resistencias deben ser de inmersión, para uso con aire. Varias de ellas, conectadas en paralelo, pueden ofrecer una gama de cargas térmicas variada.

- En casos prácticos donde los consumos de energía eléctrica pueden ser extremadamente altos, o donde exista la imposibilidad física y técnica de construir y/o instalar resistencias eléctricas de gran tamaño, se puede recurrir a otras fuentes de calor como agua caliente o vapor, provenientes de un caldero, que recirculen por el sistema de acondicionamiento de aire. En este equipo, la fuente primaria de calor es un combustible que se quema, y los gases resultantes se utilizan para el calentamiento o evaporación del agua (no se descarta que incluso la energía eléctrica sea la fuente primaria de calor).

Para el objeto de este trabajo, se prevé la utilización de una fuente de calor de baja capacidad; la primera alternativa a analizar es la de pequeñas resistencias eléctricas. En caso de no ser posible, se utilizarán focos de luz incandescente, en los que se sabe que la gran mayoría de la energía eléctrica que consumen (85%, aproximadamente) se transforma en calor.

3.2.2 CÁLCULOS

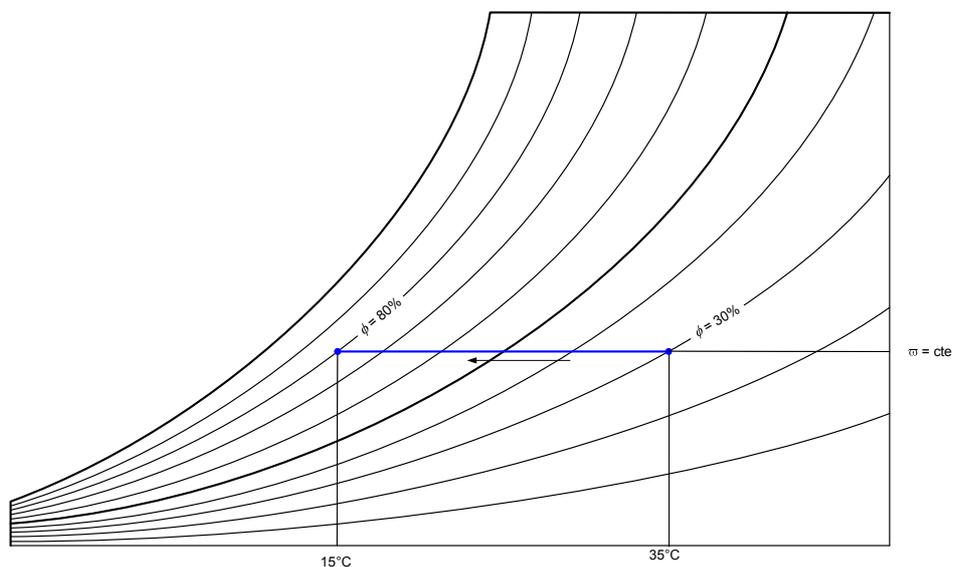
La cantidad de calor que se requerirá en cada uno de los casos de acondicionamiento que se propone investigar con este equipo, dependerá en forma directa de los demás parámetros físicos y termodinámicos que en el proceso de diseño del equipo vayan precisando. En todo caso, el cálculo de la energía calórica necesaria permitirá, a su vez, seleccionar y dimensionar la fuente de calor a utilizar; esta deberá ser suficientemente flexible como para realizar un calentamiento sensible puro, o un pos-calentamiento del aire luego de enfriarlo.

3.3 SISTEMAS DE ENFRIAMIENTO

En forma similar y a la vez inversa que con el calentamiento sensible puro, un enfriamiento sensible puro no produce inicialmente una pérdida de humedad (siempre que se mantenga al aire lejos del punto de rocío), pero sí provoca un incremento de la humedad relativa. Esto quiere decir que el aire está muy cerca de la saturación, y que se ha alejado de la condición de confort definida con

anterioridad. En resumen, si el enfriamiento del aire es moderado, sin llegar a dehumidificarlo, se pueden mantener condiciones de confort aceptables.

También se mencionó en párrafos anteriores que cuando se desea dehumidificar, el mecanismo preferentemente utilizado es el enfriamiento. Para los dos casos se describen los sistemas de enfriamiento utilizables. En la Figura No. 10 se muestra un enfriamiento puro.



Fuente: La propia autora

Figura No. 10 Enfriamiento puro.

La humedad específica (w) permanece constante, mientras la humedad relativa cambia de 30% a 80%, en un enfriamiento de 35 a 15°C .

3.3.1 DIVERSAS FORMAS DE ENFRIAMIENTO

Por definición termodinámica, el calor fluye de un sistema de mayor temperatura a otro de menor temperatura. Esto implica que para que ocurra un enfriamiento, es necesario crear o disponer de un “sumidero de calor” que se

encuentre a menor temperatura que el aire objeto del acondicionamiento, para que esta manera se produzca la cesión de calor y el enfriamiento requerido.

- En general, los sistemas de enfriamiento se basan en los ciclos termodinámicos de refrigeración. Su denominador común es que alguna sustancia, al cambiar de fase (de líquido a vapor), tiene que absorber calor de alguna parte.

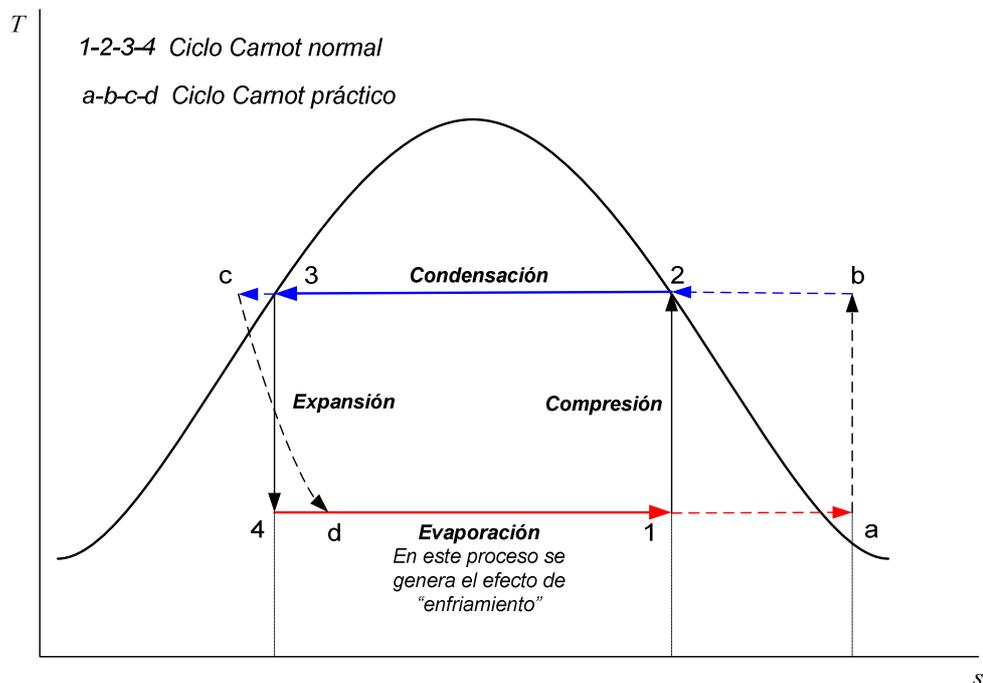
El flujo constante de esta sustancia a través del sistema cerrado y cíclico, garantiza el disponer de un sumidero de calor permanente y, además, a una temperatura constante, pues todo cambio de fase es un proceso isotérmico (es decir, la temperatura no cambia).

- El ciclo de refrigeración más simple es el Ciclo Carnot invertido, constituido por 4 procesos: dos procesos isotérmicos (evaporación y condensación), y dos procesos isentrópicos¹¹ (compresión y expansión). En el ciclo modificado de Carnot, un ciclo de hecho más práctico, se sustituye el proceso isentrópico de expansión por otro a entalpía constante (isentálpico).¹²

¹¹ El término “isentrópico”, que significa “a entropía constante”, se aplica a procesos en los que no hay transferencia de calor (adiabáticos), y además son reversibles. De hecho, estos son procesos ideales, pues en los procesos reales siempre existen pérdidas o ganancias de calor en los diferentes procesos, y en ninguno de ellos se cumplen las condiciones de reversibilidad: procesos de transferencia de trabajo infinitamente lentos (para eliminar las pérdidas por efectos viscosos), o procesos de transferencia de calor debidos a diferencias infinitesimales de temperatura (que igualmente resultarían infinitamente lentos).

¹² La expansión isentrópica involucra un equipo demasiado complejo y poco práctico (y además costoso) como sería una turbina de expansión. En cambio, la expansión isentálpica puede realizarse utilizando un dispositivo pequeño y de bajo costo como una válvula de expansión o un tubo capilar (es en definitiva, un medio de obstrucción del flujo).

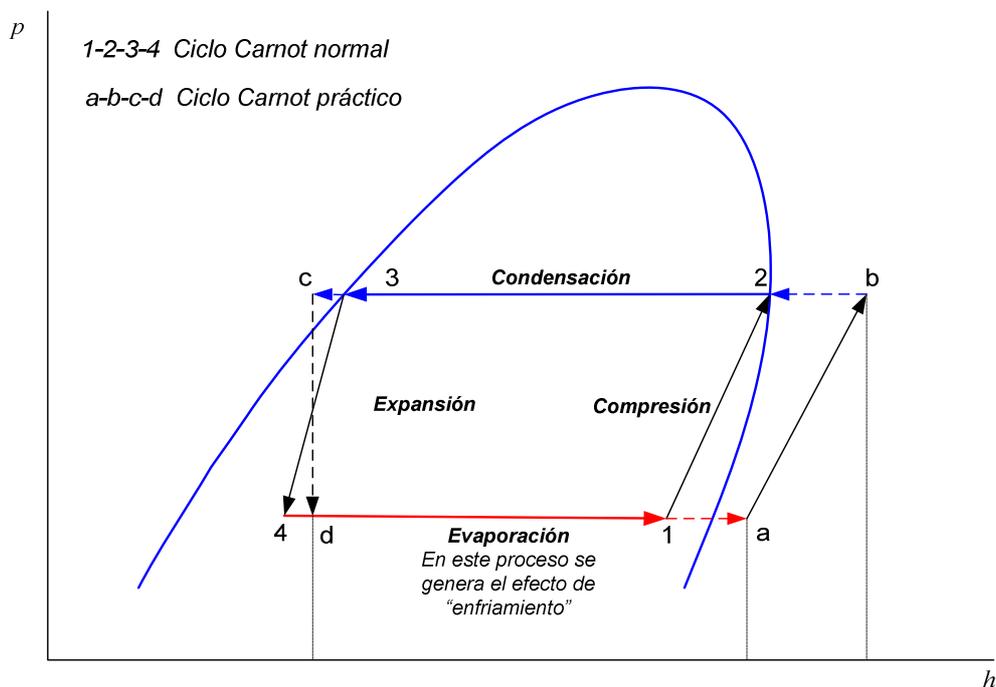
En las Figuras No. 11 y 12 se aprecian los dos ciclos mencionados, sobre dos diagrama importantes: $T - s$ (temperatura – entropía), y $p - h$ (presión – entalpía).



Fuente: La propia autora

Figura No. 11 Diagrama $T - s$ para los ciclos de Carnot invertidos normal y práctico.

La practicidad de utilizar un diagrama como este último (Figura No. 12), radica en que sobre el eje horizontal de las entalpías, se puede leer en forma directa las cantidades de calor (segmento $d - a$), y de trabajo involucradas en este ciclo (segmento $a -$ proyección de b sobre el eje horizontal).



Fuente: La propia autora

Figura No. 12 Diagrama $p - h$ para los ciclos de Carnot normal y práctico.

- El fluido o la sustancia utilizada para que siga esta serie cíclica de procesos que da como resultado una fuente de enfriamiento, se llama "refrigerante". Existen una cantidad muy grande de sustancias que pueden utilizarse como refrigerantes.

De acuerdo con el ASHRAE Handbook¹³, existen más de 100 de estas sustancias, agrupadas como: serie del metano, serie del etano, serie del propano, compuestos orgánicos cíclicos, mezclas zeotrópicas y

¹³ Referencia [7]

azeotrópicas¹⁴, compuestos orgánicos misceláneos, compuestos nitrogenados, compuestos inorgánicos y compuestos orgánicos insaturados.

- Los ciclos de refrigeración más estudiados son:
 - Ciclos de compresión: ciclo de Carnot, ciclo de Lorentz.
 - Ciclos de refrigeración por absorción, donde destaca el ciclo de agua-amoniaco.
- Finalmente, cualquier sustancia que en forma natural pueda convertirse en un sumidero de calor, puede servir para efectos de enfriamiento. Un caso práctico es el descongelamiento del hielo. En otras palabras, una mezcla de agua con suficiente hielo, al alcanzar el equilibrio térmico permanecerá a una temperatura de 0°C mientras exista un gramo de hielo en la mezcla. Para este caso del trabajo que nos ocupa, una mezcla de este tipo puede muy bien convertirse en una fuente de enfriamiento que se considerará dentro del diseño.

3.3.2 CÁLCULOS

Para el cálculo de la cantidad, la carga o el grado de enfriamiento requerido (por ejemplo el flujo másico de agua a 0°C que debe recircularse), el cálculo dependerá tanto del flujo másico de aire, de la humedad inicial que tenga dicho aire, de las temperaturas de bulbo seco y húmedo iniciales, y obviamente de la

¹⁴ Una mezcla azeotrópica de dos sustancias es una mezcla que no se puede separar en sus componentes por destilación. Una mezcla azeotrópica se evapora y condensa como una sustancia simple, con propiedades que son diferentes de las de sus constituyentes. La única mezcla azeotrópica comercial es el refrigerante 500, el cual es una mezcla de R12 y R152a, en una proporción de 73.8% a 26.2%, en peso, respectivamente

temperatura final requerida luego del enfriamiento. En caso de querer llevar el aire a un nivel de humedad específica menor, se deberá considerar también el calor latente de condensación del vapor de agua, el mismo que habrá de sumarse al calor sensible de enfriamiento.

3.4 SISTEMAS DE HUMIDIFICACIÓN Y DEHUMIDIFICACIÓN¹⁵

El control de la humedad se vuelve necesario a fin de evitar problemas relacionados de humedad relacionados con el desempeño energético de edificaciones, mantenimiento y durabilidad de edificios, y salud y confort del ser humano. La degeneración por humedad es el mayor factor limitante de la vida útil de los edificios, y puede ser visible o invisible. La degradación invisible incluye la disminución de la resistencia térmica de los materiales de construcción, y el decrecimiento de la resistencia y rigidez de algunos materiales. La degradación visible por humedad se puede manifestar en forma de: moho, decadencia de los muebles y componentes de madera, daño del concreto, enlucido y pintura de techos y paredes, corrosión de los metales, daño de los materiales por expansión (ejemplo, la madera de los pisos), y decaimiento en la apariencia visual. Adicionalmente, los niveles altos de humedad conllevan olores y esporas en el aire que pueden afectar seriamente la salud y el confort de los ocupantes. Por esta y otras razones similares, es importante el control de la humedad en el aire atmosférico.

¹⁵ Referencia [7]

Por último, cabe destacar el hecho de que muchos de los procesos tecnológicos actuales tanto de fabricación como de operación imponen índices altísimos de calidad del aire, el proceso de dehumidificación se vuelve muy importante.

Una norma práctica a seguir para lograr el control de la humedad en una edificación, consiste en seguir estos pasos¹⁶:

- Identificar el clima requerido: calentamiento, enfriamiento, o una mezcla.
- Determinar los potenciales mecanismos de transporte en cada parte del proceso (flujo de líquidos, succión capilar, movimiento del aire o difusión del vapor).
- Seleccionar la estrategia para control de la humedad: controlar la humedad a la entrada, controlar la acumulación de humedad en la fase líquida (condensación), o remover la humedad por drenaje, venteo o difusión.

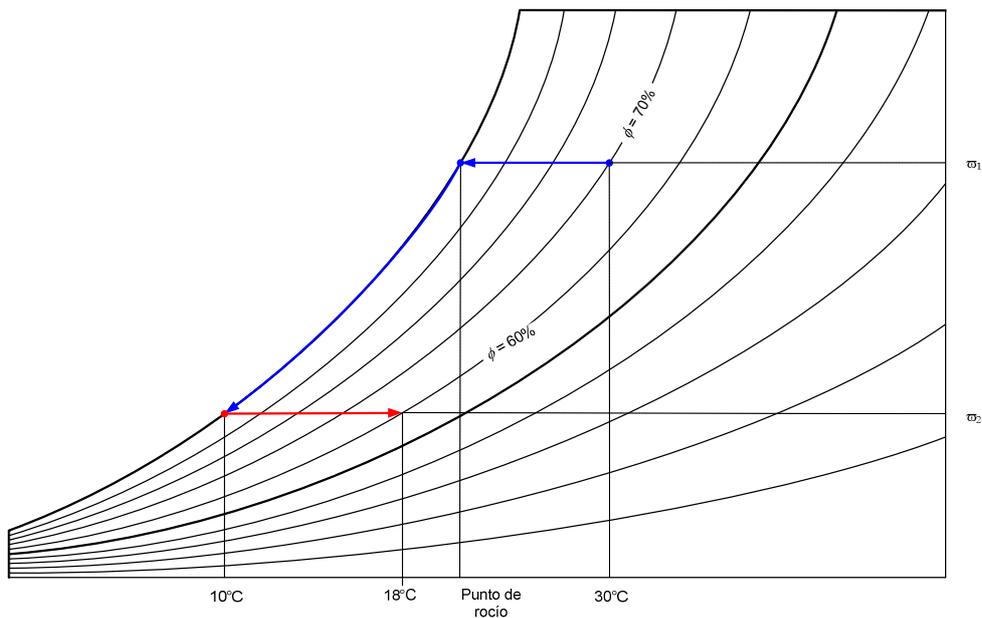
3.4.1 DIVERSAS FORMAS DE DEHUMIDIFICACIÓN

En muchos de los sistemas de enfriamiento utilizados en el acondicionamiento, el aire puede ser llevado hasta o más allá del punto rocío (o de saturación), y es en este momento que empieza a producirse una condensación constante que se recoge y se envía hacia algún desagüe. Este fenómeno ocasiona, a su vez, una continua dehumidificación del aire.

¹⁶ Referencia [7]

Como puede verse, un buen sistema de enfriamiento puede, a la vez, llegar a ser un buen sistema de dehumidificación del aire, y el grado de pérdida de humedad que se requiera, se podrá eventualmente controlar mediante un medidor de humedad; si dentro de este proceso de dehumidificación se plantea un posterior recalentamiento, el mismo termostato mencionado líneas arriba puede servir para este control (deteniendo el enfriamiento hasta la temperatura en que debe iniciarse el recalentamiento).

En la Figura No. 13 se esquematiza un proceso de dehumidificación utilizando un sistema de enfriamiento. Se añade además un proceso de poscalentamiento, para regresar el sistema a una temperatura apropiada.



Fuente: L apropiada autora

Figura No. 13 Enfriamiento hasta el punto de rocío, enfriamiento posterior (hasta cerca de los 10°C), con condensación de vapor (se pasa de w_1 a w_2); este es el cambio en la humedad específica. Al recalentar el aire, la temperatura sube hasta unos 18°C, mientras la humedad relativa global cambia del 70% al 60%.

Sin embargo, este mecanismo, el enfriamiento más allá del punto de rocío, no es el único existente para lograr extraer una parte de la humedad del aire. De acuerdo al ASHRAE Handbook¹⁷, se puede manejar el concepto de **absorción**, que se refiere a la unión o ligazón de una sustancia con otra. Los absorbentes son materiales que tienen la habilidad de atraer y mantener otros gases o líquidos. Los **disecantes** son una subclasificación particular de los absorbentes, y tienen una particular afinidad con el agua.

Prácticamente todos los materiales son disecantes, es decir, pueden atraer y conservar el vapor de agua; la madera, las fibras naturales, las arcillas y muchos materiales sintéticos capturan y liberan la humedad, como lo hacen los disecantes comerciales, pero carecen de la propiedad de mantenerla o conservarla.

Todos los disecantes comerciales tienen un ciclo de uso que consiste en utilizarlos hasta que se saturan, limpiarlos (con calor, usualmente), y volverlos a enfriar, para que nuevamente sean capaces de atraer y retener la humedad. La vida útil de la mayoría de disecantes está entre las 10,000 y las 100,00 horas. Existen diferentes tipos de disecantes¹⁸:

- Disecantes líquidos, como soluciones de agua y cloruro de litio (LiCl), soluciones de agua y tri-etilen-glicol, etc.
- Disecantes sólidos, como los sílica gels, zeolitas, zeolitas sintéticas, alúminas activadas, carbones, polímeros sintéticos, etc.

¹⁷ Capítulo 22: "Sorbents and Desiccants", pág. 443 y siguientes.

¹⁸ Referencia [7]

El uso de absorbentes, o disecantes en particular, presenta la ventaja de que pueden absorber también olores, y cumplir así una doble función.

3.4.2 DIVERSAS FORMAS DE HUMIDIFICACIÓN

En la introducción de este acápite se hizo un análisis de lo perjudicial que puede llegar a ser un exceso de humedad en el aire, pero no se mencionó que de igual manera, un aire demasiado “seco” puede ser nocivo para la salud y el confort de las personas.

Los mecanismos de humidificación se utilizan en general con fines terapéuticos o de salud, o para procesos en los que un alto pero controlado contenido de humedad sea necesario para el éxito de dichos procesos.

En forma natural, cuando una corriente de aire pasa por encima de un recipiente con agua, se produce un descenso de la presión de vapor y un fenómeno de arrastre del agua del recipiente (con una mayor presión de vapor) hacia el aire, logrando así que su humedad específica (o contenido de humedad) se incremente. Este proceso natural, sin embargo, no es totalmente controlable, y en caso de requerirse un gran incremento en la humedad, haría falta un recipiente de tamaño suficiente para asegurar la evaporación de la cantidad necesaria de agua.

Una segunda alternativa consiste en rociar con agua el camino (el ducto) por el cual va a fluir el aire, en cantidad suficiente, y a menudo con un cierto exceso, como para lograr la humidificación requerida. Este proceso puede ser controlado de mejor manera, pero es necesario tener en cuenta que la

humidificación del aire por rociado de agua puede también tener un cierto enfriamiento por efecto evaporativo, por lo que se recomienda que el agua que se rocíe tenga la misma temperatura que el aire rociado, para lograr sólo la humidificación.

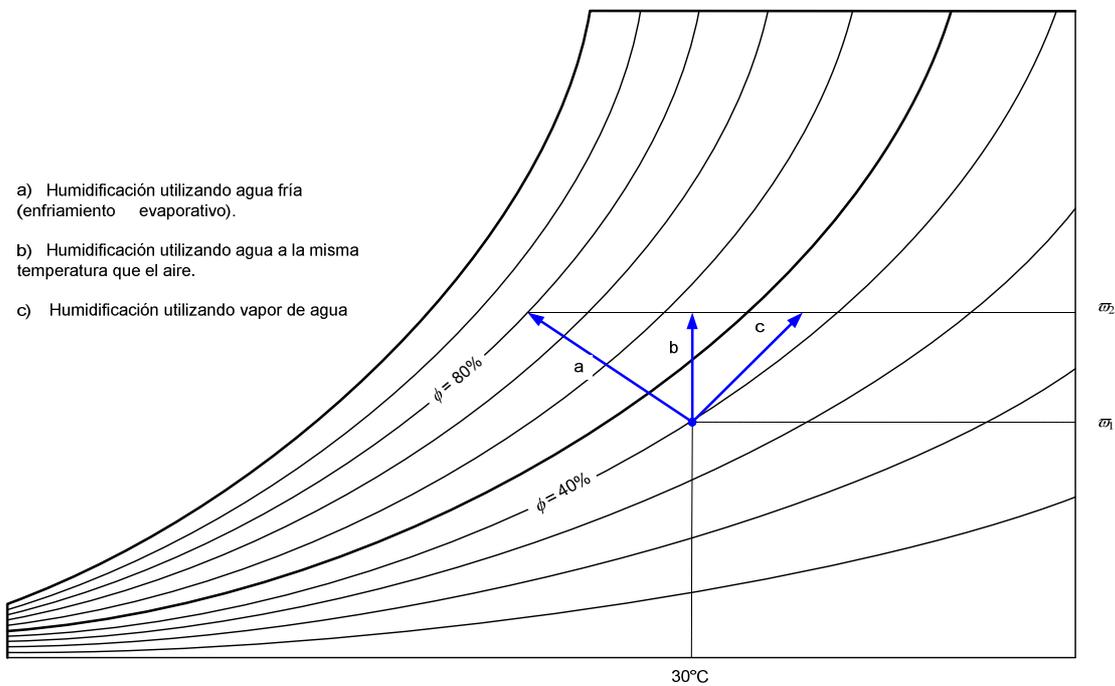
Finalmente, un tercer camino consiste en descargar vapor de agua de baja presión dentro del ducto principal de alimentación del sistema, de manera que la humedad aumente, igual que lo hará la temperatura. El caudal de vapor se puede controlar para lograr los resultados deseados.

3.4.3 CÁLCULOS

En el caso de la dehumidificación, para determinar la cantidad de vapor a extraer, se requiere conocer previamente los puntos inicial y final del proceso, a fin de saber con anticipación si se va a necesitar un recalentamiento (en la mayoría de los casos será mandatorio, pues un aire muy frío y además saturado, no tiene sentido); de ser así, el proceso de enfriamiento deberá terminar en la temperatura de saturación a la cual, después de un poscalentamiento, el aire llegue a la condición final deseada. La alternativa, como ya se indicó, es la de usar sorbentes o disecantes.

Para la humidificación el cálculo es más simple, como lo es el proceso en sí. Siempre será preferible disponer de un exceso de agua o vapor de humidificación, y un sistema de control que permita determinar la variación de la humedad específica hasta los parámetros deseados.

Un caso particular de la humidificación es el proceso de “enfriamiento evaporativo”, que consiste en inyectar a una corriente de aire muy caliente, un flujo de agua más fría que el aire en cuestión. Por la transferencia de calor y de masa, el aire se enfría pues cede calor al agua para que ésta se evapore. El resultado final es un aire más frío y más húmedo. En la Figura No. 14 se incluye un esquema con tres posibles procesos de humidificación.



- a) Humidificación utilizando agua fría (enfriamiento evaporativo).
- b) Humidificación utilizando agua a la misma temperatura que el aire.
- c) Humidificación utilizando vapor de agua

Fuente: La propia autora

Figura No. 14 Se muestran tres caminos para pasar de ω_1 a ω_2 partiendo de un mismo estado inicial: aire a 30°C y 40% de humedad relativa. Por el camino (a) se ha realizado un enfriamiento evaporativo (incluye humidificación); por el camino (b) se ha realizado una humidificación sin alterar la temperatura del aire; y por el camino (c) se ha humidificado y elevado la temperatura al haber utilizado vapor de agua.

CAPITULO CUATRO

4. DISEÑO MECÁNICO, ELÉCTRICO, DE INSTRUMENTACIÓN Y CONTROL

En particular, para el diseño mecánico se analizarán y evaluarán alternativas, principalmente en lo que tiene que ver con los materiales que pueden utilizarse en la construcción de este equipo, y a los procesos de manufactura, que a su vez dependerán en buena parte de la selección que se haga de los materiales.

En cuanto a los sistemas: eléctrico y de instrumentación y control, estos serán lo más simples que se pueda diseñar, pero que a la vez permitan un eficiente y seguro funcionamiento y control del equipo en su totalidad.

4.1 TÚNEL DE VIENTO

Este elemento, el más voluminoso del equipo, estará dividido en cuatro Secciones:

- Sección de ingreso, para estabilización del flujo. Su forma general será tronco cónico cuadrangular, para permitir el cambio de sección transversal. El extremo de menor área se acoplará al equipo manejador de aire (ventilador, soplador, blower, etc.), mientras el otro extremo será

el inicio de la longitud efectiva de trabajo del túnel. El resto de secciones serán igualmente cuadrangulares.

- Sección de calentamiento, en la que se instalarán los componentes que permitirán elevar la temperatura del aire al atravesar esta sección.
- Sección de enfriamiento, que contendrá el sistema con el cual se intentará enfriar el aire lo suficiente como para llegar al punto de rocío y generar algo de condensación de vapor de agua, en cantidad suficiente como para que pueda ser colectada y medida.
- Sección de salida, abierto al ambiente; en el extremo final se colocará una placa metálica cuadrada, con una abertura circular apropiada para no interferir con el flujo normal del aire dentro del túnel, pero que permita la medición de la velocidad de salida del flujo, a fin de determinar el caudal efectivo que está circulando por el equipo.

Para determinar las dimensiones del área transversal, se tomarán en consideración los siguientes parámetros, con los cuales se formulará una ecuación en la que la incógnita será el lado del cuadrado que conforme el túnel:

1. Condiciones ambientales promedio: $t = 15^{\circ}C (= 288 K)$;

$$p = 740 \text{ mbar } (= 74 \text{ kN} / \text{m}^2)$$

2. Constante específica del aire: $R = 0.2871 \text{ kJ} / \text{kg } K$

- Caudal del soplador (valor nominal, de acuerdo al suministrador):

$$Q = 350 \text{ cfm } (0.1652 \text{ m}^3 / \text{s})$$

- Asumir flujo turbulento, que favorece la transferencia de calor y de masa, ($Re > 2,000$); un valor conservador de $Re = 10,000$ se utilizará; si

$$Re = \frac{\rho V d}{\mu} ,$$

$$\therefore V = \frac{Re \mu}{\rho d} \quad (4.1)$$

- Densidad del aire @ $15^{\circ}C$: $\rho = 0.871 kg / m^3$
- Viscosidad dinámica del aire @ $15^{\circ}C$: $\mu = 1.7879 \times 10^{-5} kg / m \cdot s$
- Ecuación de la continuidad: $Q = V \cdot A \therefore V = \frac{Q}{A} = \frac{4Q}{\pi d^2}$
- Diámetro equivalente: $\frac{\pi d^2}{4} = L^2 \therefore L = \frac{d}{2} \sqrt{\pi}$

Igualando las dos expresiones que representan la velocidad, y reemplazando los valores conocidos:

$$\frac{Re \mu}{\rho d} = \frac{4Q}{\pi d^2} \quad (4.2)$$

$$\therefore d = \frac{4Q\rho}{\pi Re \mu} = 0.26m .$$

$$\therefore L = 0.23m$$

Se adoptará un valor de diseño de 0.25 m (250 mm, 12") de lado para el interior cuadrangular del túnel. Todas las secciones que a continuación se describen tendrán la misma sección transversal, y su correspondiente longitud.

Una vez definida la sección transversal del túnel, la velocidad media a la que fluirá el aire dentro del mismo es igual a:

$$V = \frac{4Q}{\pi L^2} = 3.4 \text{ m/s}$$

4.1.1 SELECCIÓN DEL MATERIAL

Para la construcción del túnel existen tres materiales de entre los cuales se puede efectuar la selección:

- Madera especial a prueba de humedad, laminada (de lado y lado) con recubrimiento que minimiza la resistencia al flujo del aire; el espesor debe ser suficiente para darle al equipo la suficiente rigidez, pero sin aumentar su peso en forma excesiva.
- Chapa metálica de acero (o aluminio), igualmente con espesor (y quizás una estructura adicional) que le brinden rigidez, con peso manejable.
- Plástico transparente u opaco de material acrílico, que puede ofrecer ventajas similares.

La selección se basará en la matriz adjunta, donde se han establecido las ventajas y desventajas de cada uno.

Factores	Material		
	Madera laminada	Metal	Acrílico
Costo	Bajo	Elevado	Elevado
Peso	Alto	Bajo	Mediano
Pintura	No requiere	Requiere	No requiere
Facilidad de trabajo	Alto	Alto	Bajo
Facilidad de armado	Mediano	Mediano	Bajo
Rigidez	Alta	Alta	Alta

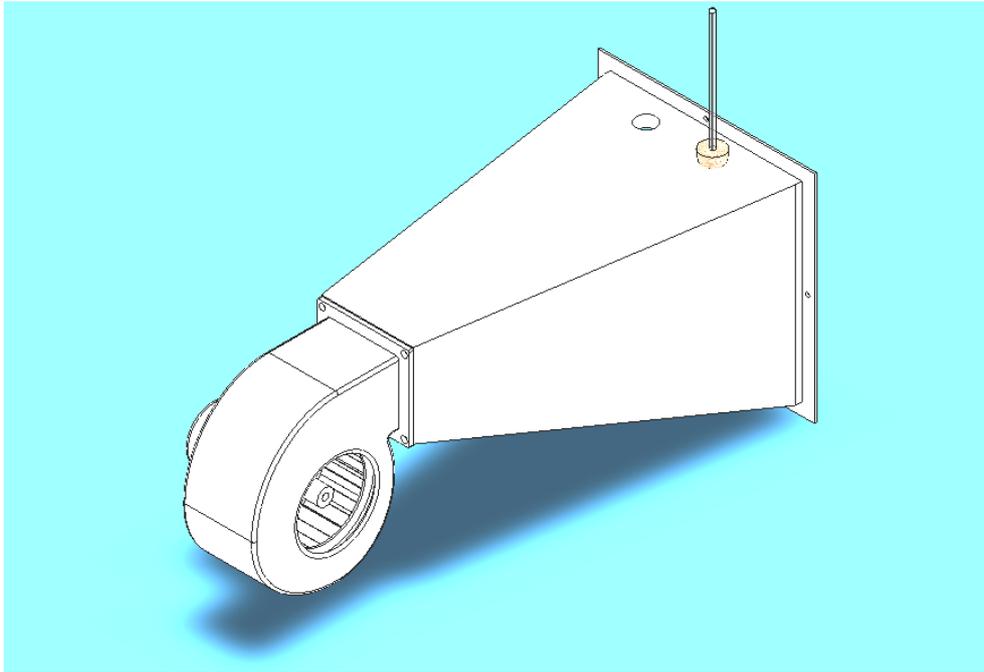
Fuente: La propia autora

Tabla 1. Matriz de selección del material para el túnel

Aparte del costo, los demás factores son cualitativos, pero una inspección rápida de esta tabla indica que la mejor opción es la utilización de madera laminada, con un espesor normal de 19 mm, suficiente para darle rigidez y bajo peso al túnel.

4.1.2 SECCIÓN DE ENTRADA

La sección de entrada, como ya se la definió en la introducción de este acápite, se muestra en la figura adjunta. Las dimensiones se encuentran en los planos del Anexo 6.

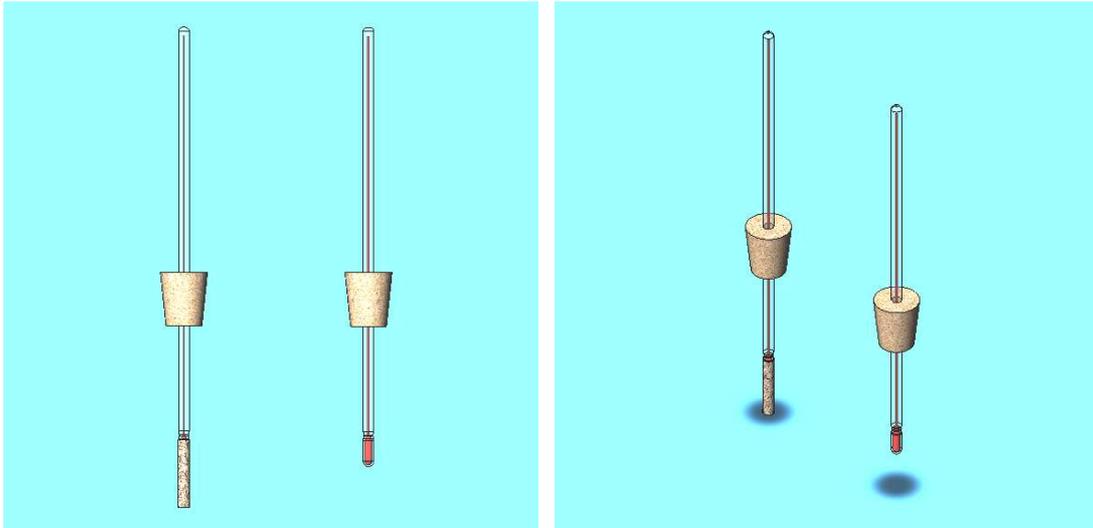


Fuente: La propia autora

Figura No. 15 Sección de entrada.

Muestra el blower, la sección difusora y uno de los termómetros para medir las propiedades del aire en este punto.

En esta y en las siguientes secciones se han practicado dos perforaciones circulares que permitirán la colocación de los medidores de temperatura de bulbo seco y húmedo. Estos dos termómetros serán de mercurio en vidrio convencionales, y serán fijados a la lámina de madera superior mediante cauchos o corchos tronco cónicos de diámetros mayor y menor al del agujero, para garantizar la sujeción; en el centro dispondrán de una perforación central de menor diámetro que el termómetro, para garantizar igualmente la sujeción. En la Figura No. 16 se muestra este aditamento con los dos termómetros.



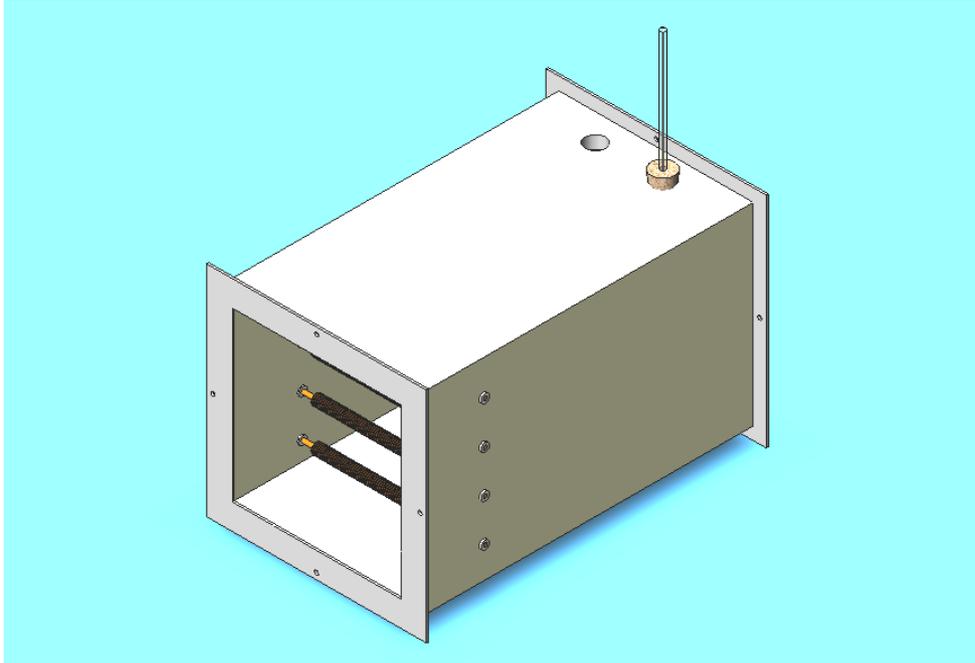
Fuente: La propia autora

Figura No. 16 Termómetros de bulbo seco y bulbo húmedo montados sobre tapones de corcho.

4.1.3 SECCIÓN DE CALENTAMIENTO

Esta sección, por efectos de continuidad y de acoplamiento, tendrá la misma sección cuadrangular. La longitud estimada para que las propiedades se estabilicen luego del calentamiento, será de 500 mm (0.60 m).

Con relación a lo expresado en la sección 3.2.1 del Capítulo 3, el sistema de calentamiento a utilizarse serán 4 resistencias eléctricas, de 500 W cada una, es decir que en condiciones ideales de calentamiento, el aire podría asimilar hasta 2,000 J/s (W) de energía por unidad de tiempo. Las resistencias se podrán encender una por una, a fin de disponer una fuente con cuatro etapas de calentamiento. En la Figura No. 17 se muestra la sección indicada.



Fuente: La propia autora

Figura No. 17 Sección de calentamiento. Muestra las resistencias eléctricas.

La elevación de temperatura máxima esperada, asumiendo un calentamiento ideal en el que todo el calor generado por las resistencias eléctricas se transmite al flujo de aire, se calcula de la siguiente manera:

$$\dot{Q} = \dot{m} c_p \Delta T = \rho \dot{V} c_p \Delta T \quad (4.3)$$

Donde:

\dot{Q} = flujo de calor = 2.0 kW

\dot{m} = flujo másico

c_p = calor específico del aire = 1.005 kJ/kg K

ρ = densidad del aire = 0.895 kg/m³

\dot{V} = flujo volumétrico = 0.1652 m³/s

$$\therefore \Delta T_{\max} = \frac{\dot{Q}}{\rho \dot{V} c_p} = 13^\circ\text{C}$$

Se espera, por consiguiente, que en términos reales, la elevación de temperatura del aire, con las cuatro resistencias encendidas, no sobrepasará con seguridad los 10°C, considerando las pérdidas y la eficiencia en la transferencia de calor; sin embargo, esta subida es suficiente como para ser notada en los termómetros.

Esta consideración permite sugerir que los termómetros a utilizarse deben tener un límite superior de unos 50°C. Sobre el límite inferior del termómetro, este se evaluará en la siguiente sección.

4.1.4 SECCIÓN DE ENFRIAMIENTO

Esta sección, para ser realmente factible su construcción, amerita igualmente una matriz de selección entre los dos únicos sistemas posibles: un sistema de refrigeración, y un sistema de recirculación de agua enfriada hasta los 0°C, mezclándola con una cantidad apropiada de hielo en un recipiente que servirá como reservorio de baja temperatura. A continuación la matriz.

Sistema	Ventajas	Desventajas
Refrigerante	<ul style="list-style-type: none"> – Confiable – Funcionamiento estable 	<ul style="list-style-type: none"> – Costoso – Instalación compleja
Agua “congelada”	<ul style="list-style-type: none"> – Costo manejable – Instalación relativamente fácil 	<ul style="list-style-type: none"> – Requiere extrema vigilancia – Funcionamiento no estable

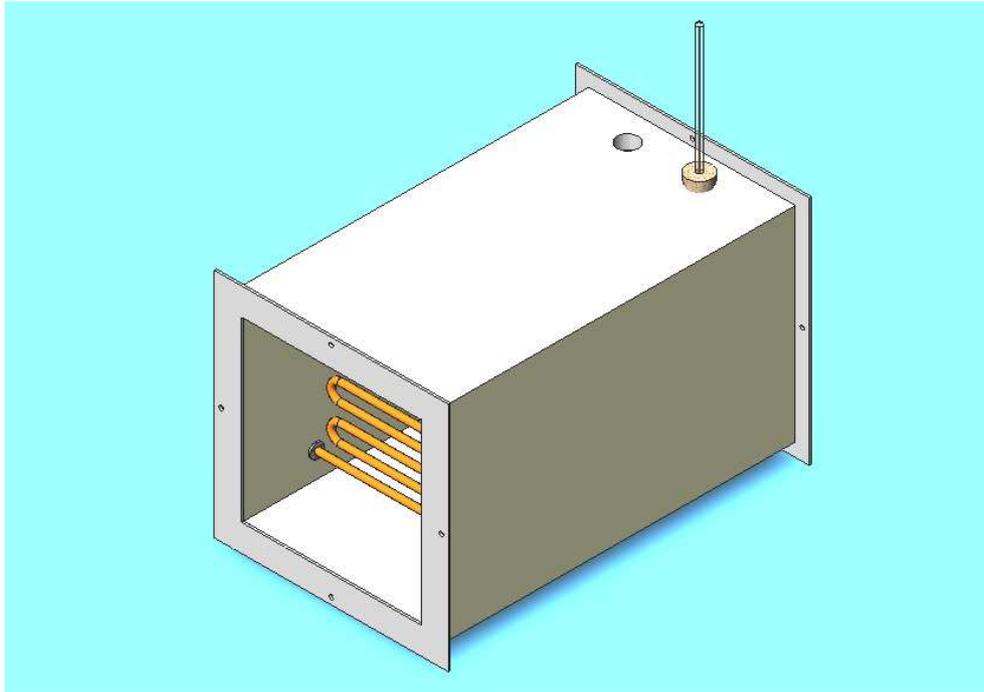
Fuente: La propia autora

Tabla 2. Matriz de evaluación de los sistemas de enfriamiento

Tomando en cuenta que el aspecto económico puede llegar a ser decisivo, se ha seleccionado el sistema de agua fría que recircula mediante una bomba pequeña, la misma que succiona desde un recipiente de agua con hielo, y la retorna nuevamente hasta el recipiente, en un circuito cerrado.

NOTAS:

- Este hielo se fundirá por la exposición al ambiente y por el calentamiento que sufrirá el agua al enfriar el aire en el túnel; por este motivo, se deberá tener mucho cuidado de reponer el hielo en forma manual, con la frecuencia que sea necesaria, y eliminando a la vez el agua que se ha calentado.
- Como puede verse en la Figura No. 18, el serpentín de cobre podría eventualmente acoplarse en forma indistinta a este sistema o al alterno.



Fuente: La propia autora

Figura No. 18 Sección de enfriamiento
Muestra el serpentín de cobre para la circulación del elemento de enfriamiento.

El cálculo para esta sección se desarrollará de la siguiente manera:

- Se establecerán las condiciones típicas del aire atmosférico, a la entrada al túnel:
 - $p_{atm} = 72 \text{ kN/m}^2$;
 - $T_{amb} = 15^\circ\text{C}$;
 - $\phi = 60\%$.
- Con la carta psicrométrica elaborada para esta presión barométrica, se establecen las siguientes propiedades del aire a la entrada (se utilizará el subíndice "0"):

- $T_{BS0} = 15^{\circ}\text{C}$
- $T_{BH0} = 10.2^{\circ}\text{C}$
- $T_{ROCI00} = 7.3^{\circ}\text{C}$
- $\omega_0 = 0.009 \text{ kg}_{\text{vapor}}/\text{kg}_{\text{aire seco}}$
- $H_0 = 37 \text{ kJ}/\text{kg}_{\text{aire seco}}$
- Al enfriar únicamente hasta la saturación (es decir, hasta el punto de rocío, 7.3°C), ω no cambia (no hay condensación), y el valor de la entalpía (utilizando el subíndice “1”) es:

- $H_1 = 30 \text{ kJ}/\text{kg}_{\text{aire seco}}$
- $\omega_1 = \omega_0 = 0.009 \text{ kg}_{\text{vapor}}/\text{kg}_{\text{aire seco}}$

- Para determinar la energía que se necesita retirar del aire para enfriarlo, se multiplica la diferencia de entalpías por el flujo de aire seco. Por tanto:

$$\dot{m}_{\text{aire seco}} = \dot{V} \times \rho \cong 0.144 \text{ kg} / \text{s}$$

$$\dot{Q}_{\text{enf.}} = \dot{m}_{\text{aire seco}} (H_1 - H_0) = -1,000 \text{ W}$$

- Esta cantidad de calor debe ser entregada al agua fría de recirculación, cuya temperatura se tratará de mantener cercana a los 0°C . El flujo másico mínimo de agua se puede calcular asumiendo un determinado grado de calentamiento; el calor específico del agua es $c_p = 4.186 \text{ kJ}/\text{kg}^{\circ}\text{C}$.

Por tanto, si $\dot{Q}_{\text{agua}} = \dot{m}_{\text{agua}} \times c_p \times \Delta T_{\text{agua}}$,

$\therefore \dot{m}_{agua} = \frac{\dot{Q}}{c_p \times \Delta T}$. En la tabla 3 siguiente se presentan los flujos

másicos calculados para diferentes grados de calentamiento:

Grado de calentamiento, °C	Flujo másico de agua, kg/s (GPM)
1	0.24 (4.0)
2	0.12 (2.0)
3	0.08 (1.33)
4	0.06 (1.0)
5	0.05 (0.8)

Fuente: La propia autora

Tabla 3. Flujo másico de agua de enfriamiento

De la tabla anterior se deduce que un flujo de 2 GPM puede producir una elevación de 2°C en el agua de enfriamiento. Ahora bien, un flujo mayor va a provocar un menor calentamiento de esta agua; sin embargo, un flujo mayor también va a permitir una mayor capacidad del agua para recibir calor, y provocar la condensación del vapor que está presente en el aire.

En resumen, se estima que una bomba de recirculación con un caudal de unos 5 GPM, regulables, ofrecería la oportunidad de diversos grados de enfriamiento del aire, y también la de condensar y “dehumidificar” el aire.

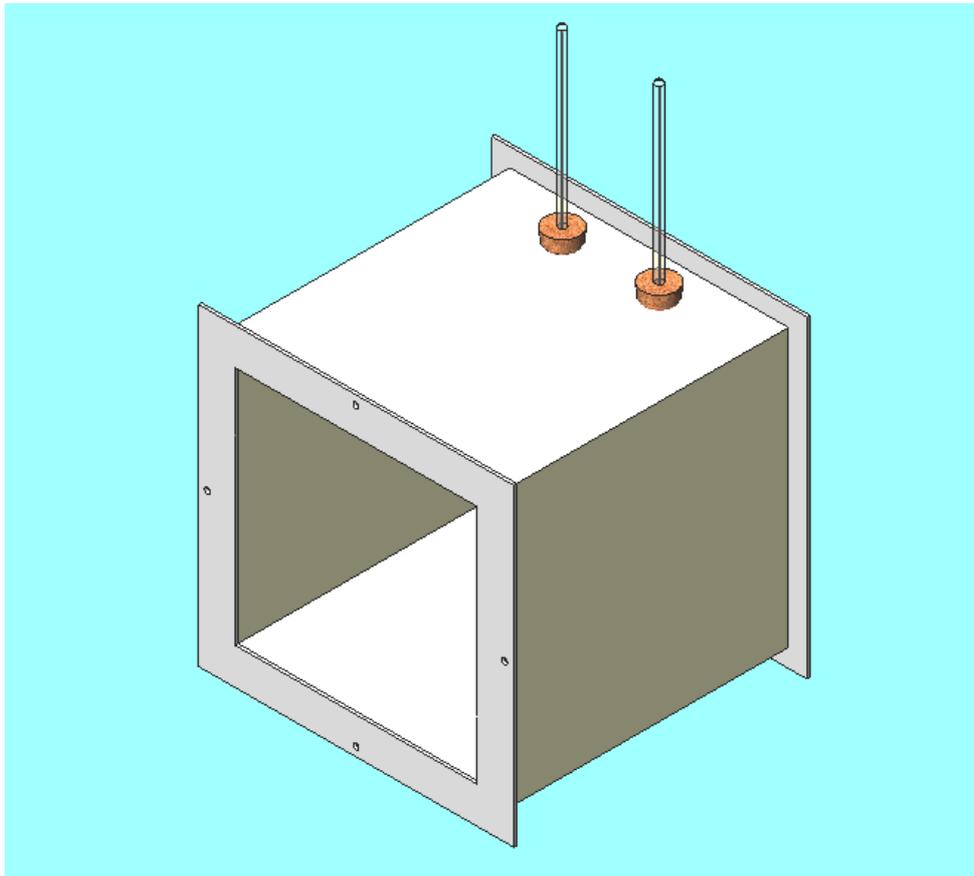
El control del flujo de agua de enfriamiento se llevaría a cabo mediante una válvula manualmente operada, que permita dividir el caudal de salida de la bomba y direccionar una parte al equipo y el exceso de vuelta al recipiente que contiene el agua.

En este punto es conveniente recalcar el siguiente concepto. Para cualquier prueba que se efectúe con el equipo, siempre será necesario esperar a que se obtengan las “condiciones estables” de flujo tanto másico como energético, antes de hacer mediciones y efectuar los cálculos. Esto, obviamente, tomará su tiempo, y el alumno deberá ser advertido de este particular, antes de iniciar una prueba.

Finalmente, en la sección de enfriamiento se deberá instalar un sistema seguro que permita recoger y medir la cantidad de condensado que pueda producirse, e introducir este dato en los cálculos respectivos.

4.1.5 SECCIÓN DE SALIDA

Esta sección es la más sencilla, pero no por la menos importante. En esta sección se estabiliza el flujo de salida (se reduce un poco el área de salida y se produce un ligero efecto de estancamiento); una vez estabilizado el flujo, en el exterior de esta sección se puede utilizar un anemómetro para la medición del flujo real, recordando siempre la ecuación de la continuidad. La longitud de este ducto será de 300 mm (0.3 m). En la Figura No. 19 se aprecia esta sección de salida.

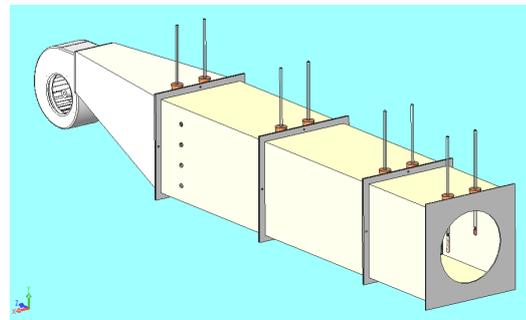
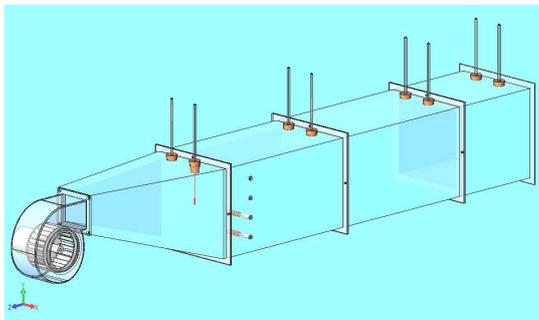
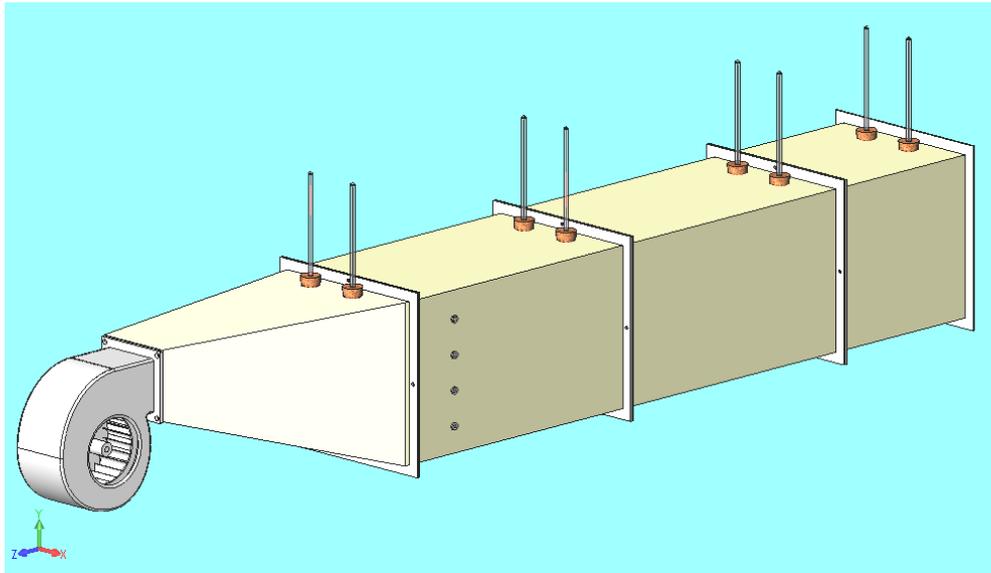


Fuente: La propia autora

Figura No. 19 Sección de salida.

4.1.6 ENSAMBLE PRELIMINAR

En este punto se puede presentar un diagrama que represente la forma general que adoptaría el equipo, una vez que esté ensamblado para ser utilizado, en alguna prueba. En la Figura No. 20 se aprecia este conjunto.



Fuente: La propia autora

Figura No. 20 Túnel ensamblado.

4.1.7 BASTIDOR DE SOPORTE

El ensamble de las secciones, como aparece en la figura anterior, para que sea operativo y manejable, irá montado sobre una estructura fabricada con tubería estructural de mueblería metálica. Las secciones de entrada irá fijada a la estructura, y las de calentamiento, de enfriamiento y de salida, tendrán la posibilidad de ser acomodadas sobre el bastidor, y permitir el ensamble entre sí, mediante conjuntos perno-tuerca.

La altura del bastidor deberá permitir la operación del equipo y la toma de datos en forma fácil y cómoda para el usuario, y tendrá garruchas apropiadas para que el equipo pueda ser transportado o reubicado conforme a las necesidades.

Sobre este bastidor se colocarán los mandos y controles eléctricos para el accionamiento del blower, de las resistencias eléctricas y de la bomba de recirculación. Se deberá dejar previsto una protección para un posible sistema de enfriamiento en base a un circuito de refrigeración, y dos tomas de 120 VAC para usos auxiliares del equipo [un medidor de velocidad del flujo de aire (anemómetro), una calculadora, una laptop, etc.].

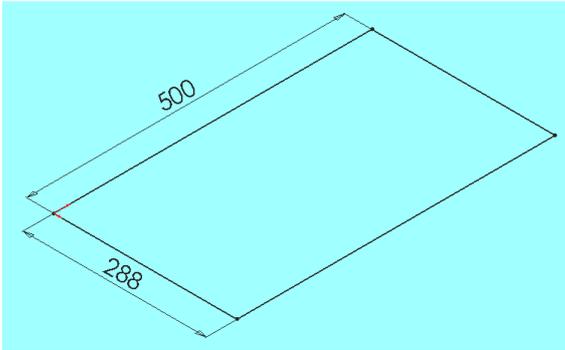
4.2 PROCESO DE FABRICACIÓN Y ENSAMBLE

Como ya se decidió anteriormente, el material para las secciones del túnel será madera laminada recubierta con melamínico, un material resistente a la abrasión que podría causar el rozamiento del flujo de aire en su parte interior. El resto de materiales se describe en el proceso de conformación de cada elemento.

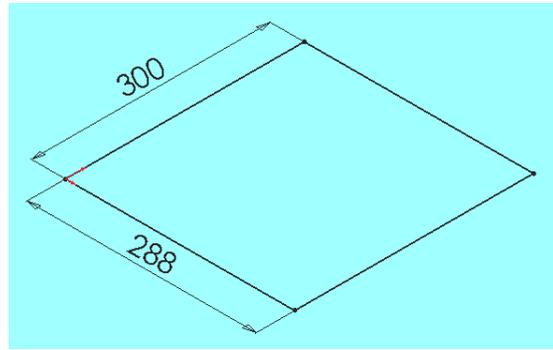
4.2.1 SECCIONES DEL TÚNEL

La madera laminada se cortará en pedazos rectangulares de las dimensiones y en las cantidades que se indican en las figuras siguientes. El ensamble se realizará con tornillos autorroscantes para madera, de 3/8" por 2 1/2". Los tableros de las secciones de calentamiento, de enfriamiento y de salida se armarán en forma alternativa para asegurar que en todos ellos se utilizarán los

tornillos de ensamble, hasta formar la sección cuadrangular de los tres ductos mencionados.



8 unidades

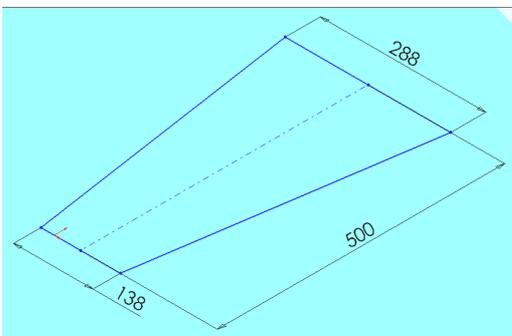


4 unidades

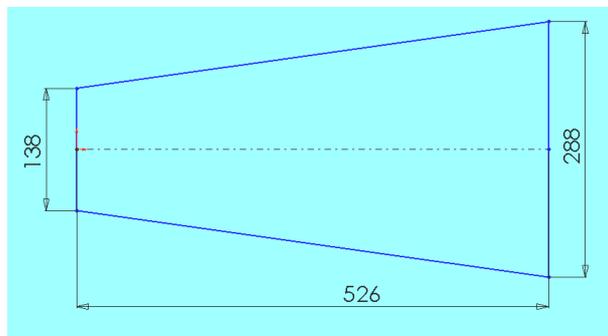
Fuente: La propia autora

Figura No. 21 Tableros para las secciones cuadrangulares

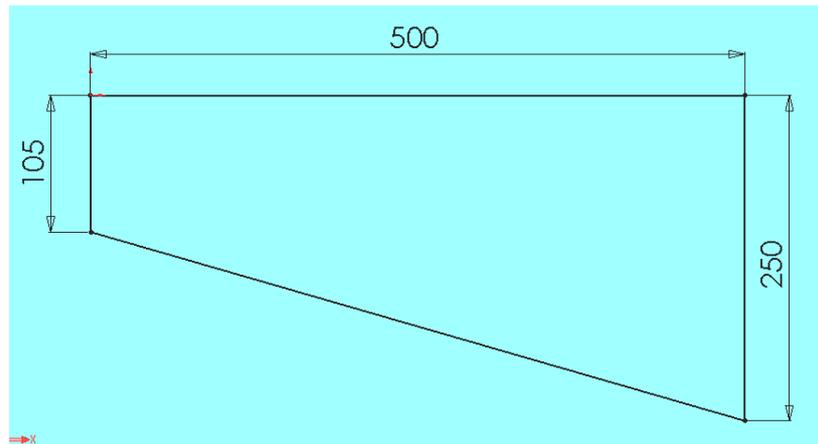
Para la sección de entrada, se cortarán cuatro tableros trapezoidales de las medidas que se ven abajo. Esta sección es irregular y se ensamblará colocando los dos tableros iguales verticalmente, sobre ellos el de 500 mm de longitud, y debajo el de 526 mm de longitud.



1 unidad



1 unidad



2 unidades

Fuente: La propia autora

Figura No. 22 Tableros para la sección de entrada

Para esta sección en particular será necesario realizar un pequeño acabado de carpintería en los dos extremos, a fin de facilitar la colocación del cerco metálico que permitirá el acople entre secciones. El cerco se construirá con una pletina de acero de $1\frac{1}{2}$ " x $\frac{1}{4}$ " (38 mm x 6 mm), y se pintarán con pintura esmalte para resistir el desgaste; los cercos se acoplarán a la madera con tornillos autorroscantes, y tendrán una perforación de $\frac{3}{8}$ " en el punto medio de cada lado, para permitir la unión entre secciones, utilizando perno y tuerca de similar diámetro y 1" de longitud.

Entre los cercos metálicos que harán el acople entre secciones, se colocará un empaque que puede ser confeccionado con caucho de $\frac{1}{16}$ " de espesor, o con papel victoria de 1 mm de espesor.

El acople de la boca de descarga del soplador con la boca pequeña de la sección de entrada se efectuará con tirafondos de ¼" x 2", directamente a la madera. De acuerdo con el diseño, el soplador no colgará libremente, pues el peso dañarí la madera en los puntos de acople, sino que la carcasa descansará sobre la estructura metálica, en forma permanente.

Sobre todos los tableros de madera que van a ocupar la parte superior, se realizarán dos perforaciones circulares de 30 mm de diámetro, separadas entre sí 100 mm, y los centros a 40 mm del filo del tablero. Estos agujeros se utilizarán para colocar los corchos que sujetan a su vez los dos tipos de termómetros: de bulbo seco y de bulbo húmedo.

En la sección de calentamiento se realizarán 4 perforaciones en cada lado del ducto, para el montaje de las resistencias eléctricas. Estas irán de lado a lado.

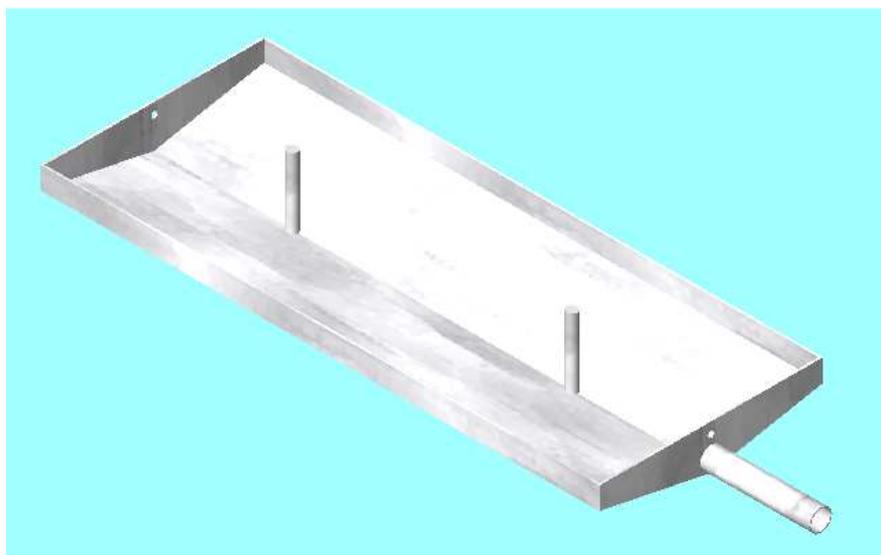
Igualmente, en la sección de enfriamiento se efectuarán las perforaciones necesarias para el montaje del serpentín de cobre para la circulación del agua de enfriamiento.

4.2.2 SISTEMAS DE CALENTAMIENTO Y ENFRIAMIENTO

Las 4 resistencias eléctricas del sistema de calentamiento se sujetarán a los costados del ducto mediante apoyos cilíndricos de cerámica (como pequeños tarugos). Las cerámicas cilíndricas serán perforadas en forma axial para permitir el paso de los terminales eléctricos que cierran el circuito, pasando siempre por el sistema de fuerza y control (tablero eléctrico).

Por su parte, el serpentín de circulación de agua ingresa y sale por un mismo costado del ducto, a través de perforaciones circulares; el ajuste del tubo de cobre al tablero se realizará mediante pequeños empaques de caucho. Adicionalmente, dentro del ducto de enfriamiento el serpentín tendrá pequeños apoyos metálicos que la mantendrán horizontalmente estable.

Éstos se acoplarán a la pequeña bandeja metálica, construida en lámina galvanizada, que recogerá los posibles condensados. La mencionada bandeja descargará el agua condensada a través de una perforación en el costado opuesto al de ingreso y salida del serpentín de enfriamiento.



Fuente: La propia autora

Figura No. 23 Bandeja recolectora de condensados en lámina galvanizada.

4.3 SISTEMA ELÉCTRICO

El sistema eléctrico que hará posible el funcionamiento del equipo se compone de lo siguiente:

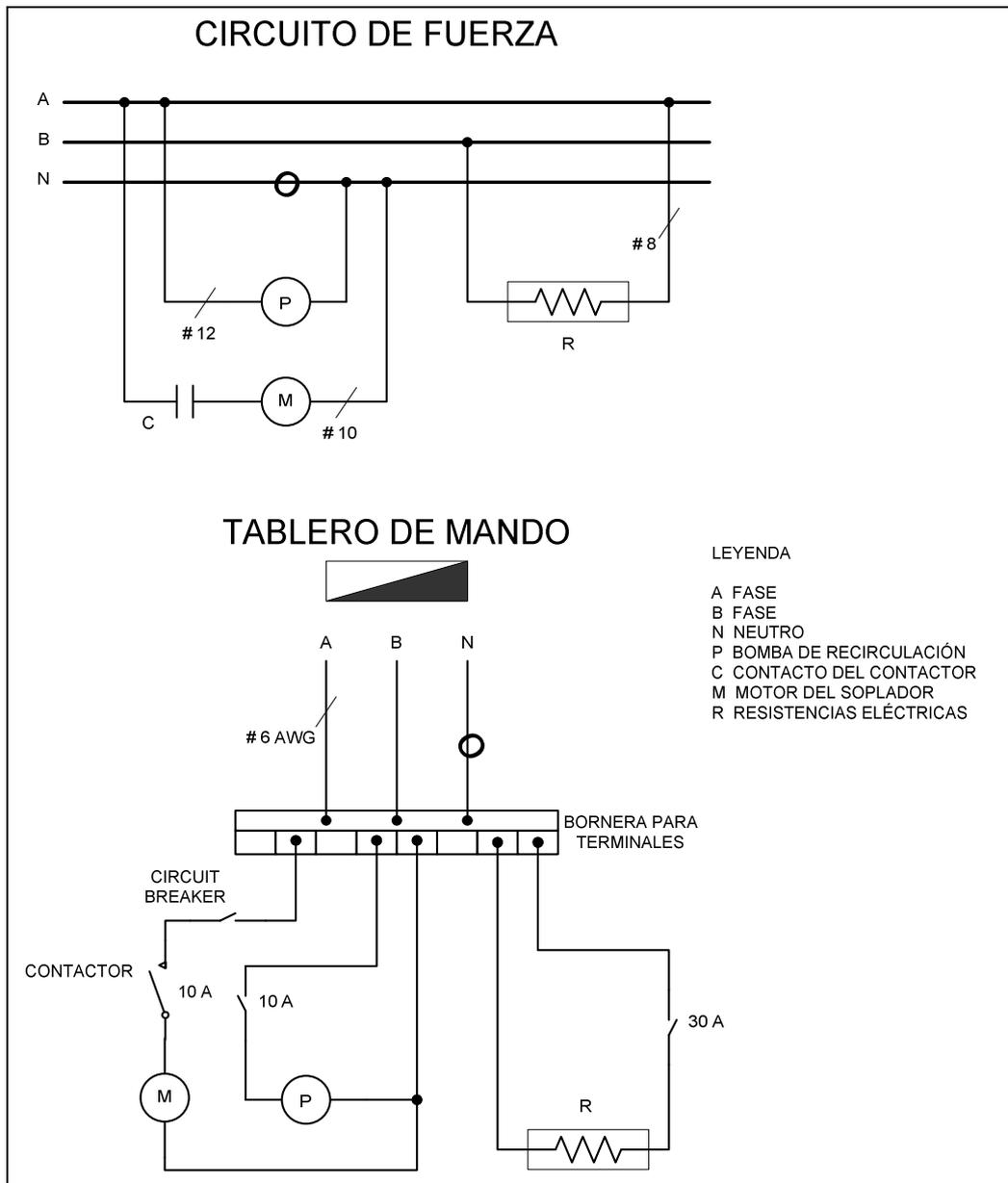
- Alimentación al motor del soplador, con un consumo de 1/3 HP (0.25 kW), a 110 VAC. Se utilizará para su arranque un pequeño contactor.
- Alimentación a las 4 resistencias de 0.5 kW cada una, a 220 VAC.
- Alimentación a la bombita de recirculación de agua, de 1/8 HP (0.1 kW), a 110 VAC. Esta bomba no requiere contactor para su arranque, únicamente un interruptor de encendido/apagado (on/off).
- Cableado necesario. Para el soplador, cable sólido revestido # 10 AWG; para la bomba de circulación, cable sólido revestido # 12 AWG; y para las resistencias, cable de alta temperatura con aislamiento # 8 AWG. Para la alimentación principal, fases y neutro, cable sólido revestido # 6 AWG
- Conectores, cinta aislante, señalización, tablero, bornera para terminales, etc.

El tablero de control eléctrico constará de lo siguiente:

- Térmico para la alimentación del motor del soplador, bifásico, para 10 A. Botonera o interruptor de arranque y parada, y luz indicadora de encendido color verde. Habrá una segunda luz de color rojo que se encenderá cuando el sistema se conecte a la fuente de energía. Actuará como una luz piloto.
- Térmico para la alimentación de las resistencias eléctricas, bifásico, de 30 A.
- Interruptor individual de encendido y apagado para cada resistencia, con luz indicadora de color ámbar, para resistencia encendida.

- Térmico para la alimentación de la bomba de recirculación, bifásico, de 10 A.
Luz indicadora similar a la del motor del soplador.

En la figura No. 24 se esquematiza el diagrama de fuerza y mando para este sistema.



Fuente: La propia autora

Figura No. 24 Diagrama eléctrico

4.4 SISTEMA DE CONTROL

En el equipo existen únicamente tres variables por controlar:

- El flujo de aire
- El flujo de calor
- El flujo de agua de enfriamiento.

Por este motivo, el sistema de control será realmente simple.

El flujo de aire. Se puede controlar de varias formas. Las recomendables en este caso son: una tapa giratoria que obstruya el ingreso del aire al soplador, y se pueda graduar al caudal que se requiera; una resistencia variable para la velocidad de giro del soplador. Los inconvenientes de cada uno son: el primero no permite un control medible, es subjetivo e inexacto, pero es económico. El segundo puede ser más exacto, más fino, de modo que una serie de marcas en la perilla del controlador puede usarse para fijar caudales específicos; su inconveniente es que puede ser costoso y si el motor no está diseñado para variaciones de voltaje, se puede averiar.

El flujo de calor. Simplemente se lo controlará con el encendido de cada resistencia, una a una o varias a la vez. El suministro de calor será discreto, en cuatro etapas, del 25, 50, 75 y 100% de carga.

El flujo de agua de enfriamiento. Como ya se indicó, el caudal de agua se controlará con una válvula de paso que servirá para dividir el flujo a la salida de la bomba, y enviar al serpentín sólo el caudal necesario.

En resumen, los tres controles son factibles de incorporarse, en caso de ser necesario.

CAPITULO CINCO

5. GUIAS DE PRÁCTICAS DE LABORATORIO

El diseño y construcción de este túnel de aire para llevar a cabo prácticas de laboratorio, referentes al acondicionamiento de aire para usos domésticos e industriales, permitirán la posibilidad de llevar a cabo varias de esas prácticas. Sin embargo, se considera que las que pueden ser de mayor interés para los estudiantes de Ingeniería de Producción Industrial en particular, son las siguientes:

- Calentamiento y enfriamiento sensibles
- Deshumidificación (enfriamiento con condensación y posterior calentamiento)

En los Anexos 3 y 4 se incluyen las hojas que servirán como guía de práctica de estas dos pruebas.

En el Anexo 5 se incluye un manual de mantenimiento del equipo.

En el Anexo 6 se incluyen los planos del equipo.

CAPITULO SEIS

6. ANALISIS ECONÓMICO

Los costos estimados en los que se incurriría para la fabricación de este equipo de laboratorio, se encuentran en la tabla siguiente:

CANT.	DESCRIPCION	P. Unit.	P. Total
	MADERA		
1	Tablero de madera "Tropicor", laminado en las dos caras, de 19 mm de espesor (incluye cortes)	35.00	35.00
100	Tornillos autorroscantes 2"	0.05	5.00
20	Tornillos autorroscantes 1"	0.05	2.00
	SUBTOTAL		42.00
	ACERO		
1	Pletina 1 1/2" x 5 mm	25.00	25.00
4	Tirafondos 3/8" x 1"	0.35	1.40
30	Pernos c/tuerca 3/8" x 1 1/2"	0.25	7.50
4	Tubo cuadrado de construcción 1 1/2" x 1.5 mm	23.00	92.00
4	Garruchas locas, ruedas de vynil de 4" diametro	22.00	88.00
1	Lámina 300 x 300 cm x 5 mm	6.50	6.50
	SUBTOTAL		220.40
	EQUIPOS Y COMPONENTES		
1	Blower 350 CFM	275.00	275.00
1	Bomba sumergible 1/8 HP	52.00	52.00
4	Resistencias eléctricas de 500 W	56.00	224.00

8	Termómetros de mercurio en vidrio rango: -5°C - 50°C	8.50	68.00
1	Tanque de plástico 50 lt.	15.00	15.00
8	Corchos cilíndricos, 5 cm de diámetro	0.50	4.00
1	Tablero de control	350.00	350.00
1	Lote de material eléctrico menudo	50.00	50.00
	SUBTOTAL		1,038.00
	MANO DE OBRA		
	Diseño de ingeniería		1,000.00
	Metalmecánica (incluye pintura)		150.00
	Soldadura		200.00
	Carpintería		100.00
	SUBTOTAL		1,450.00
	TOTAL		2,750.40

Fuente: La propia autora

Tabla 4. Tabla de costos estimados de materiales y mano de obra de construcción

En el caso del presente trabajo, el valor total que consta en el cuadro anterior es referencial.

El beneficio que se espera obtener con este dispositivo es netamente social, orientado a satisfacer las necesidades de los alumnos de varias carreras de la **Universidad de las Américas**.

CAPITULO SIETE

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 CONCLUSIONES

El presente trabajo me ha permitido obtener las siguientes conclusiones:

1. Muchos procesos de producción, de prestación de servicios y de comercialización, requieren de algún sistema de climatización. Por ejemplo, no solo el procesamiento de alimentos (desde su captación hasta la entrega al cliente) requiere de una temperatura que los preserve; también un sistema de manejo de datos, de información o de telecomunicaciones requiere climatizar el entorno, a fin de que equipos de uso delicado, sensibles a las altas temperaturas, operen exitosamente, evitando igualmente que los operadores puedan sufrir quebrantos en su salud. Por último, incluso el solo filtrado del aire ambiental puede ser necesario para ciertos ambientes (quirófanos, fábricas de microcircuitos, etc.).
2. Todo sistema de climatización, sea este de enfriamiento, calentamiento, humidificación o deshumidificación, requieren del consumo de ciertas cantidades de energía. El costo de esta energía debe ser administrado adecuadamente para lograr dos cosas: resultados exitosos con bajos egresos. Y esto es función del ingeniero de producción industrial.
3. Es conveniente que los ingenieros de esta rama estén capacitados para determinar las necesidades de climatización en los procesos a ellos

encargados, y de ser posible cuantificar, al menos de una manera aproximada, los niveles de energía que pueden requerirse (y los costos que esto involucra).

4. Parece evidente que es más fácil enfriar que calentar el aire, pero esto no siempre es verdad, pues enfriar desde una temperatura por sobre la atmosférica, no representa un costo elevado (a no ser que se desee un enfriamiento rápido, con ayuda de un ventilador o soplador), pero enfriar por debajo de la temperatura ambiente (que es lo más común), puede consumir ingentes cantidades de energía a costos elevados. Este análisis puede ayudar al ingeniero a macar los niveles de temperatura operativos que minimicen estos costos.

7.2 RECOMENDACIONES

Las siguientes recomendaciones pueden realizarse una vez concluido el trabajo:

1. La construcción de este equipo de laboratorio y el uso por parte de los alumnos de la carrera (y de otras carreras afines), les permitirá comprender de mejor manera los fenómenos involucrados en los procesos de climatización, así como el manejo de las principales variables manipulables, para obtener los resultados requeridos.
2. En caso de no disponer del equipo, se debería buscar una solución alterna (alquiler de equipos, servicios de otras universidades, etc.), a fin de satisfacer esta innegable necesidad de los alumnos de pre-grado.

BIBLIOGRAFIA

1. Engineering Thermodynamics, Work and Heat Transfer, Rogers G., Mayhew Y., Longman, Third Edition, SI Units, 1980.
2. Thermodynamics, J. P. Holman, McGraw-Hill, International Students Edition, 1980.
3. Termodinámica Química para Ingenieros, Balzhiser R., Samuels M., Eliassen J., Editorial Prentice/Hall Internacional, 1974.
4. Introducción a la Termodinámica Clásica y Estadística, Sonntag R., Van Wylen J., Editorial Limusa, 1977.
5. Apuntes de Termodinámica, Cóndor J., 2003.
6. Refrigeration and Air Conditioning, Langley B., Ed. Prentice/Hall, 1978.
7. American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers, Inc. - 2001 ASHRAE Handbook, Fundamentals, SI Edition.
8. Diseño en Ingeniería Mecánica, Shigley J., Mischke C., McGraw-Hill, Sexta Edición, 2002.
9. Procesos de Manufactura, Schey J., McGraw-Hill, Tercera Edición, 2000.
10. Circuitos Eléctricos, Dorf/Svoboda, Editorial Alfaomega, Tercera Edición, 2000.

ANEXOS

ANEXO 1 CARTAS PSICROMETRICAS

ANEXO 2 TABLA DE PROPIEDADES DE ALGUNAS SUSTANCIAS

**ANEXO 3 GUIA DE PRÁCTICA No. 1: CALENTAMIENTO Y
ENFRIAMIENTO SENSIBLES**

ANEXO 4 GUIA DE PRÁCTICA No. 2: DESHUMIDIFICACION

ANEXO 5 MANUAL DE MANTENIMIENTO DEL EQUIPO

ANEXO 6 PLANOS

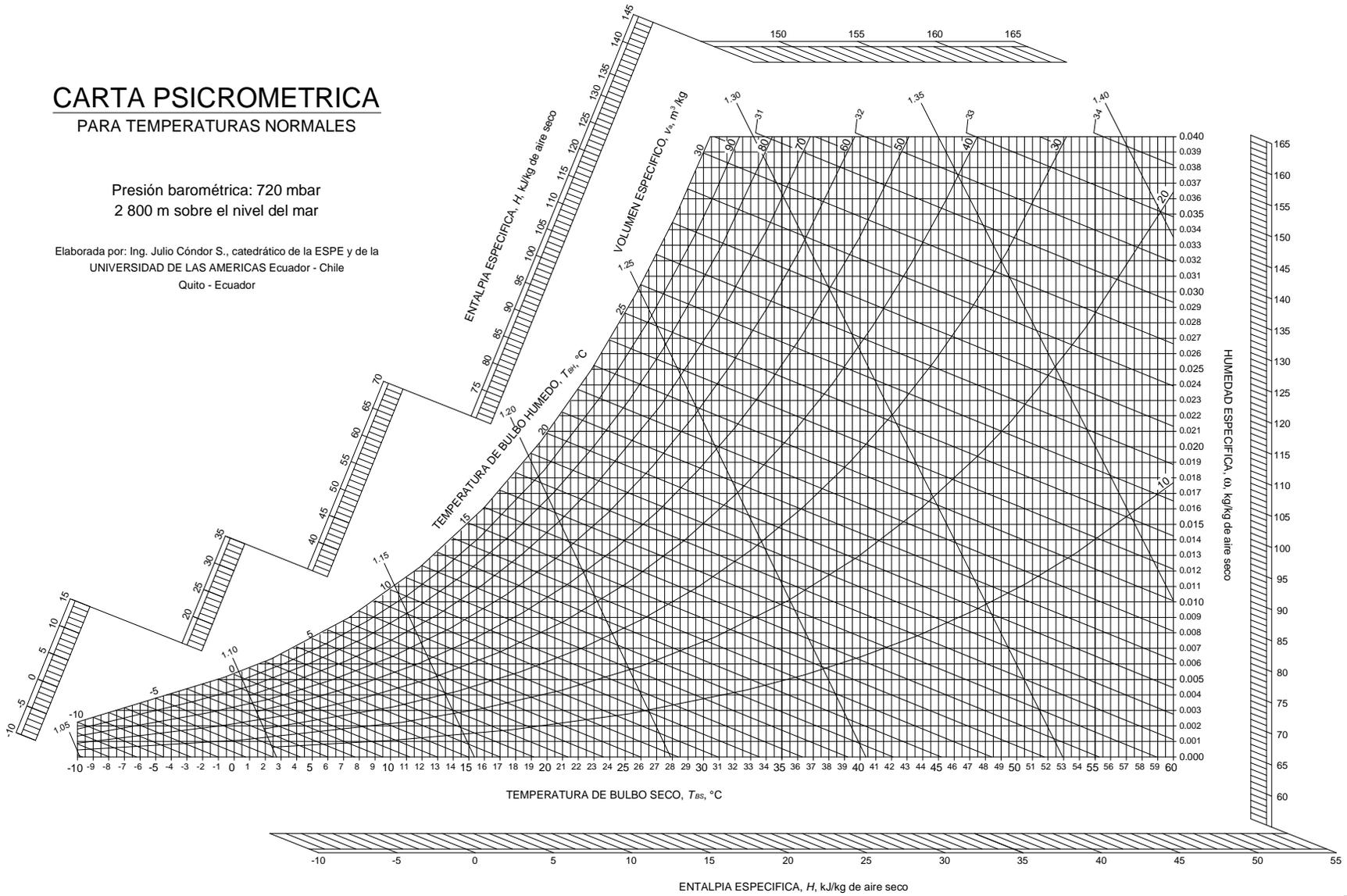
ANEXO 1 CARTAS PSICROMÉTRICAS

CARTA PSICROMETRICA

PARA TEMPERATURAS NORMALES

Presión barométrica: 720 mbar
2 800 m sobre el nivel del mar

Elaborada por: Ing. Julio Córdor S., catedrático de la ESPE y de la
UNIVERSIDAD DE LAS AMERICAS Ecuador - Chile
Quito - Ecuador

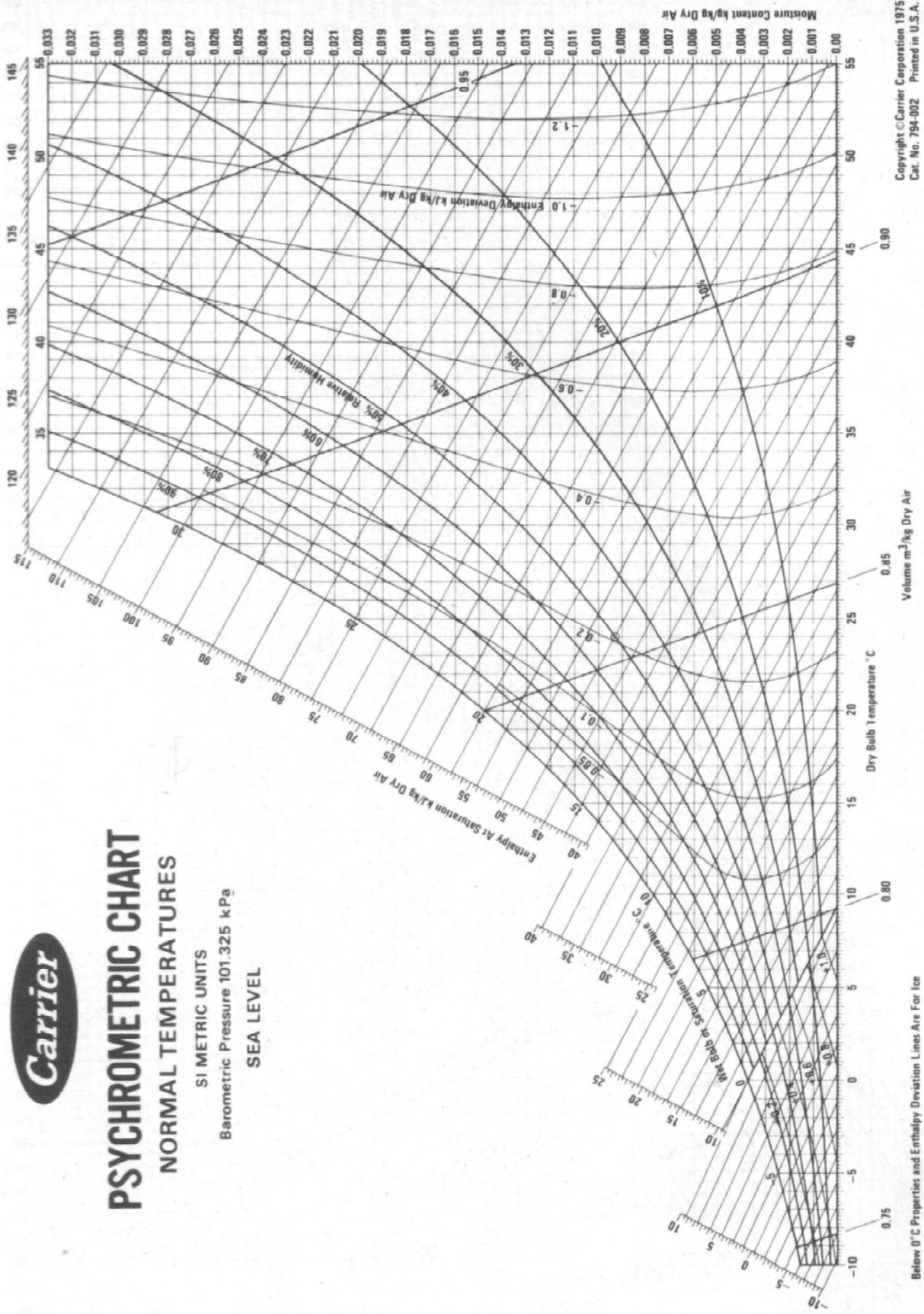




PSYCHROMETRIC CHART

NORMAL TEMPERATURES

SI METRIC UNITS
Barometric Pressure 101.325 kPa
SEA LEVEL



Copyright © Carrier Corporation 1975
Cat. No. 794-002 Printed in U.S.A.

**ANEXO 2 TABLA DE PROPIEDADES DE CIERTAS
SUSTANCIAS**

Aire Seco a Bajas Presiones

T [K]	c_p [kJ/kg K]	c_v	γ	Pr	a 1 atm	
					ρ [kg/m ³]	ν 10 ⁻⁵ [m ² /s]
175	1.0023	0.7152	1.401	0.744	2.017	0.586
200	1.0025	0.7154	1.401	0.736	1.765	0.753
225	1.0027	0.7156	1.401	0.728	1.569	0.935
250	1.0031	0.7160	1.401	0.720	1.412	1.132
275	1.0038	0.7167	1.401	0.713	1.284	1.343
300	1.0049	0.7178	1.400	0.707	1.177	1.568
325	1.0063	0.7192	1.400	0.701	1.086	1.807
350	1.0082	0.7211	1.398	0.697	1.009	2.056
375	1.0106	0.7235	1.397	0.692	0.9413	2.317
400	1.0135	0.7264	1.395	0.688	0.8824	2.591
450	1.0206	0.7335	1.391	0.684	0.7844	3.168
500	1.0295	0.7424	1.387	0.680	0.7060	3.782

Conductividades térmicas, k , de diferentes sustancias/[W/m K]

T/[K]	250	300	400	500	600	800
Aluminio	208	202	209	222	234	227
Cobre	593	386	377	372	367	357
Acero (5% C)	57	55	52	48	45	38
Vidrio	0.8 – 1.1					
Ladrillo	0.35 – 0.7					
Concreto	0.9 – 1.4					
Asbesto	0.163	0.194	0.206			
Mercurio, líquido	7.5	8.1	9.4	10.7	12.8	13.7
Sodio, líquido	135	135	86	80	74	6.3
Agua (saturada)	2.22	0.164	0.687	0.642		
Vapor (saturado)	0.0184 0.0275 0.0432					
Vapor (a baja presión)	0.0188 0.0266 0.0357 0.0463 0.0708					
Hidrógeno	0.156	0.182	0.228	0.272	0.315	0.402
Aire	0.0223	0.0262	0.0337	0.0404	0.0466	0.0577
Dióxido de carbono	0.0129	0.0166	0.0246	0.0355	0.0431	0.0560

Tabla 5. Tablas de propiedades de ciertas sustancias

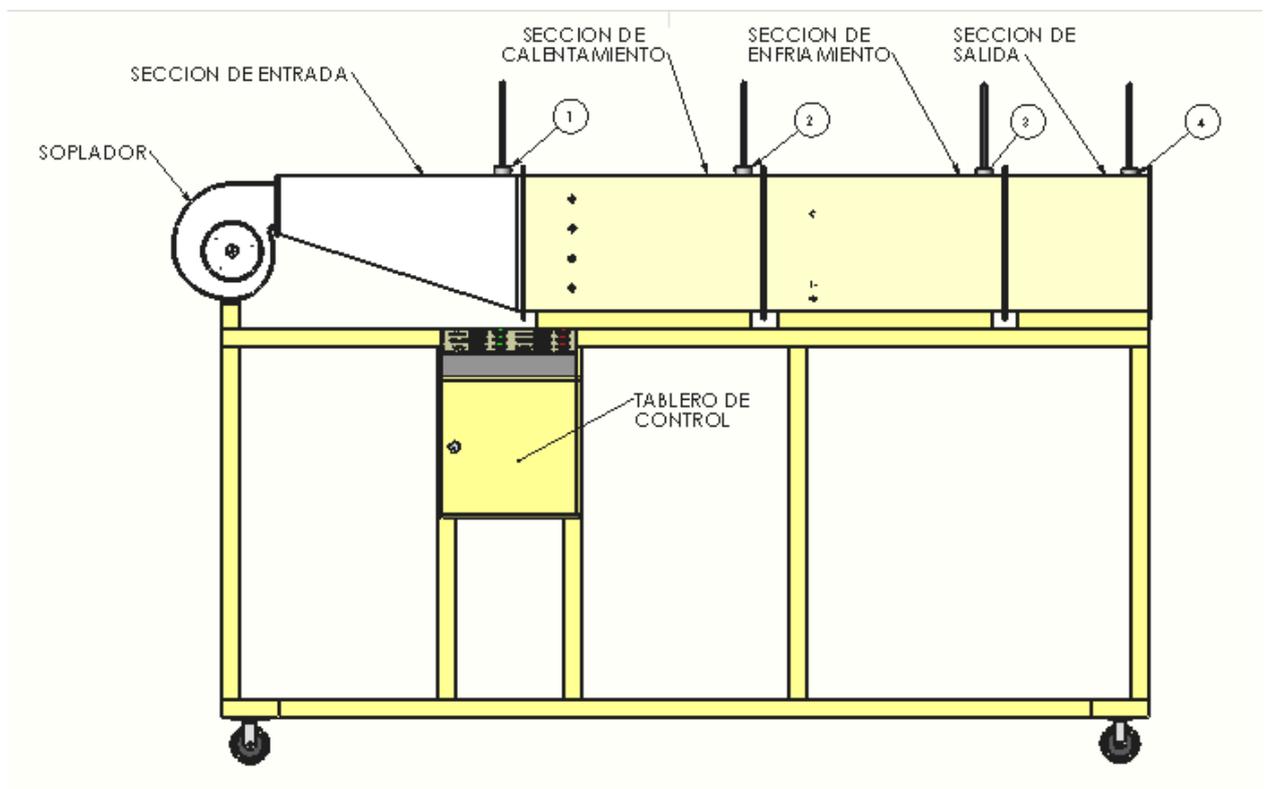
ANEXO 3 GUÍA DE PRÁCTICA No. 1
CALENTAMIENTO Y ENFRIAMIENTO SENSIBLES

GUÍA DE PRÁCTICA No. 1

CALENTAMIENTO Y ENFRIAMIENTO SENSIBLES

A. BASE TEÓRICA.- (La base teórica de para esta práctica se encuentra en el capítulo 2 de este Trabajo de Titulación)

B. DISPOSICIÓN DEL EQUIPO.- Para esta práctica, que contiene dos partes perfectamente diferenciadas, el equipo deberá disponerse de la siguiente manera: sección de entrada, sección de calentamiento, sección de enfriamiento y sección de salida, como se muestra en el esquema adjunto:



C. PROCEDIMIENTO.- El estudiante debe seguir los siguientes pasos, una vez ensamblado el equipo como se indica en la figura anterior:

a. CALENTAMIENTO

- Encender el soplador y dejarlo funcionando por 5 minutos antes de proseguir.
- Tomar las medidas de los termómetros de bulbo seco y bulbo húmedo, en las secciones 1, 2, 3 y 4.
- Tomar la medida de la velocidad del aire (utilizando un anemómetro) en la sección de salida del túnel. Llenar la sección D de la tabla.
- Encender la Resistencia 1, dejarla funcionar por 5 a 10 minutos, hasta que alcance la estabilidad; hacer lo mismo con las restantes dos resistencias, y tomar para cada uno de los casos las temperaturas en los puntos 2, 3 y 4.
- Apagar las tres resistencias y dejar que la temperatura del aire en los puntos 2, 3 y 4 se estabilicen.
- Llenar la sección A de la tabla adjunta.

b. ENFRIAMIENTO

- Llenar el recipiente con agua y hielo en cantidad suficiente.
- Encender la bomba de agua y dejarla funcionar, abriendo la válvula de recirculación de agua totalmente. Dejar que se estabilicen las condiciones de temperatura. Verificar que la temperatura de bulbo seco no se acerque

a la del punto de rocío (debe ser, por tanto, mayor a la de bulbo húmedo).

Tomar los datos y llenar la sección B de la tabla adjunta.

- Cerrar poco a poco la válvula de recirculación, dejando que el sistema se estabilice, y controlando que aún exista diferencia entre las temperaturas de bulbo seco y húmedo. Tomar los datos igual que en el caso anterior. Nunca debe dejar que el aire se enfríe tanto como para que llegue al punto de rocío, donde empezará el vapor de agua a condensarse.

D. TABLA DE DATOS.- Llenar los datos de la tabla.

A. CALENTAMIENTO					
DATOS t/[°C]; H/[Kj/kg]		Sección 1	Sección 2	Sección 3	Sección 4
Inicio	t_{BS}				
	t_{BH}				
	H				
Resistencia 1	t_{BS}				
	t_{BH}				
	H				
Resistencias 1 y 2	t_{BS}				
	t_{BH}				
	H				
Resistencias 1, 2 y 3	t_{BS}				
	t_{BH}				
	H				

B. ENFRIAMIENTO					
DATOS t/[°C]		Sección 1	Sección 2	Sección 3	Sección 4
Inicio	t_{BS}				
	t_{BH}				
	H				
Válvula totalmente abierta	t_{BS}				
	t_{BH}				
	H				
Válvula parcialmente abierta	t_{BS}				
	t_{BH}				
	H				

C. RECOLECCION DE AGUA DE RECIRCULACION	
Hora de inicio de recolección del agua	
Hora de finalización de recolección de agua	
Tiempo utilizado en la recolección de agua, s	
Volumen de agua recolectado, cm ³	
D. CAUDAL DE AIRE	
Velocidad del aire a la salida del túnel, m/s	

E. CÁLCULOS.- Con los datos de las tablas anteriores, realizar lo siguiente:

- a. Determinar la densidad del aire a las condiciones de entrada, utilizando la ecuación de estado de los gases ideales.

- b. Con la ecuación de continuidad, calcular el flujo volumétrico; con este valor y la densidad, determinar el flujo másico de aire
- c. En una carta psicrométrica para la altura barométrica apropiada, ubicar los puntos inicial, con una, con dos y con tres resistencias encendidas.
- d. Encontrar en la carta psicrométrica los valores de entalpía para cada sección y para cada caso de calentamiento.
- e. Realizar un balance de masa y energía. La ganancia (o pérdida) de energía del aire es igual al producto del flujo másico por la diferencia de entalpías entre los puntos considerados.
- f. Transportar los datos a una segunda carta psicrométrica, y efectuar los mismos cálculos para el caso de enfriamiento.
- g. Para el proceso de enfriamiento con condensación (deshumidificación)

F. PREGUNTAS.- Conteste las siguientes preguntas:

- a. En el proceso de calentamiento, ¿siguen los puntos una línea recta horizontal? En caso afirmativo y negativo de su respuesta, argúmentela.
- b. En este mismo proceso, compare la ganancia de energía del aire con la cantidad de energía suministrada por las resistencias eléctricas. Indique cuál es la eficiencia del sistema de calentamiento.
- c. En el proceso de enfriamiento, ¿siguen los puntos una línea recta horizontal? En caso afirmativo y negativo de su respuesta, argúmentela.
- d. ¿En qué casos de aplicación industrial sería conveniente la utilización de estos tipos de calentamiento y enfriamiento sensibles?

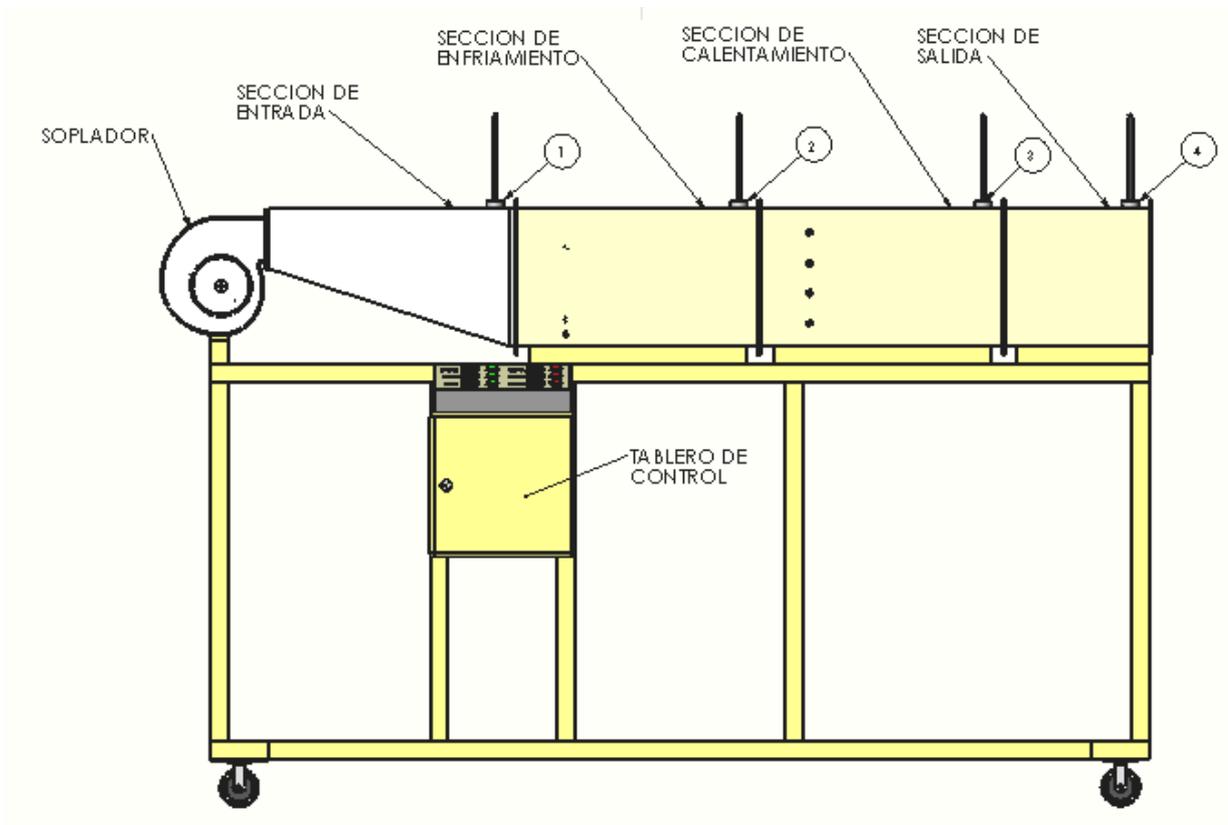
**ANEXO 4 GUÍA DE PRÁCTICA No. 2
DESHUMIDIFICACIÓN**

GUÍA DE PRÁCTICA No. 2

DESHUMIDIFICACIÓN

A. BASE TEÓRICA.- (La base teórica de para esta práctica se encuentra en el capítulo 2 de este Trabajo de Titulación)

B. DISPOSICIÓN DEL EQUIPO.- Para esta práctica, el equipo deberá disponerse de la siguiente manera: sección de entrada, sección de enfriamiento, sección de calentamiento y sección de salida, como se muestra en el esquema adjunto:



C. PROCEDIMIENTO.- El estudiante debe seguir los siguientes pasos, una vez ensamblado el equipo como se indica en la figura anterior:

a. ENFRIAMIENTO

- Encender el soplador y dejarlo funcionando por 5 minutos, antes de proseguir.
- Tomar las medidas de los termómetros de bulbo seco y bulbo húmedo, en las secciones 1, 2, 3 y 4.
- Tomar la medida de la velocidad del aire (utilizando un anemómetro) en la sección de salida del túnel. Llenar la sección D de la tabla.
- Llenar el recipiente con agua y hielo en cantidad suficiente.
- Encender la bomba de agua y dejarla funcionar, con la válvula de recirculación de agua abierta totalmente. Dejar que se estabilicen las condiciones de temperatura. Verificar que la temperatura de bulbo seco se vaya acercando a la del punto de rocío (debe ser muy cercana a la de bulbo húmedo). Tomar los datos de los puntos 2, 3 y 4, y llenar la sección A de la tabla adjunta.
- Cerrar poco a poco la válvula de recirculación, dejando que el sistema se estabilice, y controlando que cada vez la diferencia entre las temperaturas de bulbo seco y húmedo sea menor. Dejar que el aire se enfríe más allá del punto de rocío, para que el vapor de agua se condense ahora en forma continua. Tomar los datos en las secciones 2, 3 y 4, consignarlos en la

sección A de la misma tabla, y llenar la sección C de la misma tabla, para lo cual se deberá registrar la recolección de agua condensada y la de agua de recirculación.

b. CALENTAMIENTO

- Encender la Resistencia 1, dejarla funcionar por 5 a 10 minutos, hasta que alcance la estabilidad; en caso de no llegarse nuevamente a una temperatura similar a la temperatura ambiente, encender una a una las restantes dos resistencias, y tomar para cada uno de los casos las temperaturas en los puntos 2, 3 y 4. Cuando se alcance la estabilidad, llenar la sección B de la tabla adjunta.

D. TABLA DE DATOS.- Llenar los datos de la tabla.

A. ENFRIAMIENTO					
DATOS t[°C]		Sección 1	Sección 2	Sección 3	Sección 4
Inicio	t_{BS}				
	t_{BH}				
	H				
Válvula totalmente abierta	t_{BS}				
	t_{BH}				
	H				
Válvula totalmente cerrada	t_{BS}				
	t_{BH}				
	H				

B. CALENTAMIENTO					
DATOS t/[°C]; H/[Kj/kg]		Sección 1	Sección 2	Sección 3	Sección 4
Inicio	t _{BS}				
	t _{BH}				
	H				
Resistencia 1	t _{BS}				
	t _{BH}				
	H				
Resistencias 1 y 2	t _{BS}				
	t _{BH}				
	H				
Resistencias 1, 2 y 3	t _{BS}				
	t _{BH}				
	H				

C. RECOLECCION DE AGUA DE RECIRCULACION Y CONDENSADO		
Hora inicio recolección agua/condensado		
Hora finalización recolección agua/condensado		
Tiempo utilizado en recolección agua/condensado, s		
Volumen recolectado agua/condensado, cm ³		
D. CAUDAL DE AIRE		
Velocidad del aire a la salida del túnel, m/s		

E. CÁLCULOS.- Con los datos de las tablas anteriores, realizar lo siguiente:

- a. Determinar la densidad del aire a las condiciones de entrada, utilizando la ecuación de estado de los gases ideales.
- b. Con la ecuación de continuidad, calcular el flujo volumétrico; con este valor y la densidad, determinar el flujo másico de aire
- c. En una carta psicrométrica para la altura barométrica apropiada, ubicar los puntos inicial, con una, con dos y con tres resistencias encendidas.
- d. Encontrar en la carta psicrométrica los valores de entalpía para cada sección y para cada caso de calentamiento.
- e. Realizar un balance de masa y energía. La ganancia (o pérdida) de energía del aire es igual al producto del flujo másico por la diferencia de entalpías entre los puntos considerados.
- f. Transportar los datos a una segunda carta psicrométrica, y efectuar los mismos cálculos para el caso de enfriamiento.
- g. Para el proceso de enfriamiento con condensación (deshumidificación)

F. PREGUNTAS.- Conteste las siguientes preguntas:

- a. En el proceso de calentamiento, ¿siguen los puntos una línea recta horizontal? En caso afirmativo y negativo de su respuesta, arguméntela.
- b. En este mismo proceso, compare la ganancia de energía del aire con la cantidad de energía suministrada por las resistencias eléctricas. Indique cuál es la eficiencia del sistema de calentamiento.

- c. En el proceso de enfriamiento, ¿siguen los puntos una línea recta horizontal? En caso afirmativo y negativo de su respuesta, arguméntela.
- d. ¿En qué casos de aplicación industrial sería conveniente la utilización de este tipo de calentamiento sensible?

ANEXO 5 MANUAL DE MANTENIMIENTO

MANUAL DE MANTENIMIENTO DEL EQUIPO

El equipo una vez construido y en funcionamiento, tiene pocas partes móviles, por lo que sólo requiere del siguiente mantenimiento:

ELEMENTO	ACCION	PERIODICIDAD
TUNEL DE AIRE	Limpieza interna y externa de cada sección	Siempre después de realizada una práctica
SOPLADOR	Limpieza externa	Cada mes
	Limpieza interna	Cada 6 meses
	Chequeo de cojinetes	Cada 6 meses
TERMOMETROS/ CORCHOS	Chequeo/reposición	Con cada práctica
BOMBA DE AGUA	Chequeo y limpieza	Con cada práctica
RESISTENCIAS ELECTRICAS	Chequeo de contactos y aisladores	Con cada práctica
TABLERO DE CONTROL	Chequeo de contactos	Cada 6 meses
CABLEADO	Chequeo de contactos y aislante	Con cada práctica

ANEXO 6 PLANOS