



**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERIA
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA MECANICA
Cali - Colombia**

Guías de laboratorio para el equipo de refrigeración secundario CHILLER (edificio 340)



GUIAS

Laboratorios del sistema de refrigeración CHILLER (Edificio 340)

- Lab 1. Reconocimiento del sistema de refrigeración secundario.
- Lab 2. Balances de masa y energía subsistema refrigeración por Compresión de vapor.
- Lab 3. Segunda ley de la termodinámica del subsistema de Refrigeración por compresión de vapor.
- Lab 4. Análisis del diseño y eficiencia del condensador flujo cruzado en Contraflujo.
- Lab 5. Determinación de la carga de la bomba de la Torre de Enfriamiento y las Pérdidas de presión del recorrido.

Universidad del Valle
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Mecánica

RECONOCIMIENTO DEL SISTEMA DE REFRIGERACIÓN SECUNDARIO

1. Introducción

La escuela de ingeniería mecánica de la Universidad del Valle cuenta con un sistema de refrigeración secundario (El sistema de refrigeración secundario ó Chiller, es una maquina térmica diseñada para el enfriamiento de agua); este sistema está formado por tres subsistemas, que son: Subsistema de compresión de vapor (fluido de trabajo R22), Subsistema de Torre de enfriamiento (fluido de trabajo Agua), Subsistema de los tanques de Hielo (Fluido de trabajo Glicol).

El Chiller es monitoreado y controlado con un controlador Danfoss AK2-SC 255, el cual guarda un registro histórico y brinda la posibilidad de tener un acceso remoto por medio de internet o un acceso local a través de una consola en el laboratorio.

El subsistema de compresión de vapor, está compuesto por: un compresor BOCK semi-hermetico de desplazamiento alternativo (funcionamiento con pistones), un condensador, una válvula de expansión Danfoss TQ20 y un evaporador. En este subsistema circula refrigerante R22, el cual le extrae calor al glicol; este glicol se encarga de congelar el agua almacenada en los tanques.

El subsistema de torre de enfriamiento, está compuesto por una torre de enfriamiento Glaciar AMV-050 y una bomba WEG de 5hp. Este subsistema se encarga de ayudar a liberar calor del sistema de refrigeración en el condensador, para obtener resultados más eficientes en el equipo.

El subsistema de bancos de hielo, está compuesto por dos tanques con capacidad de 3metros cúbicos cada uno, una bomba de 3hp, dos válvulas de tres canales, y mangueras; estas mangueras son las que comunican la etapa de refrigeración con los tanques, ya que por estas viaja el glicol que le ha entregado el calor al refrigerante R22 quedando con una temperatura menor, además pasan por los tanques en forma de serpentín vertical donde a su paso congelan el agua que se encuentra almacenada.

Con este sistema se tienen diversos laboratorios en el área de energética y fluidos; con los cuales los estudiantes pueden tener un mejor conocimiento de los temas teóricos que se tratan en las aulas de clase.

En la práctica de este laboratorio el estudiante puede reconocer e identificar los equipos que componen el sistema de refrigeración y observar el comportamiento de las variables en tiempo real, o el historial del sistema, como el usuario lo desee.

2. Equipos

Los componentes del sistema de refrigeración secundario (CHILLER) son:

1. Compresor.
2. Filtro secador.
3. Separador de aceite.
4. Condensador.
5. Acumulador.
6. Válvula de expansión.
7. Evaporador.
8. Bomba 3hp.
9. Bancos de Hielo.
10. Válvulas 3 vías a 110v.
11. Bomba 5hp.
12. Torre de enfriamiento.
13. Ventilador.
14. Válvulas solenoides.

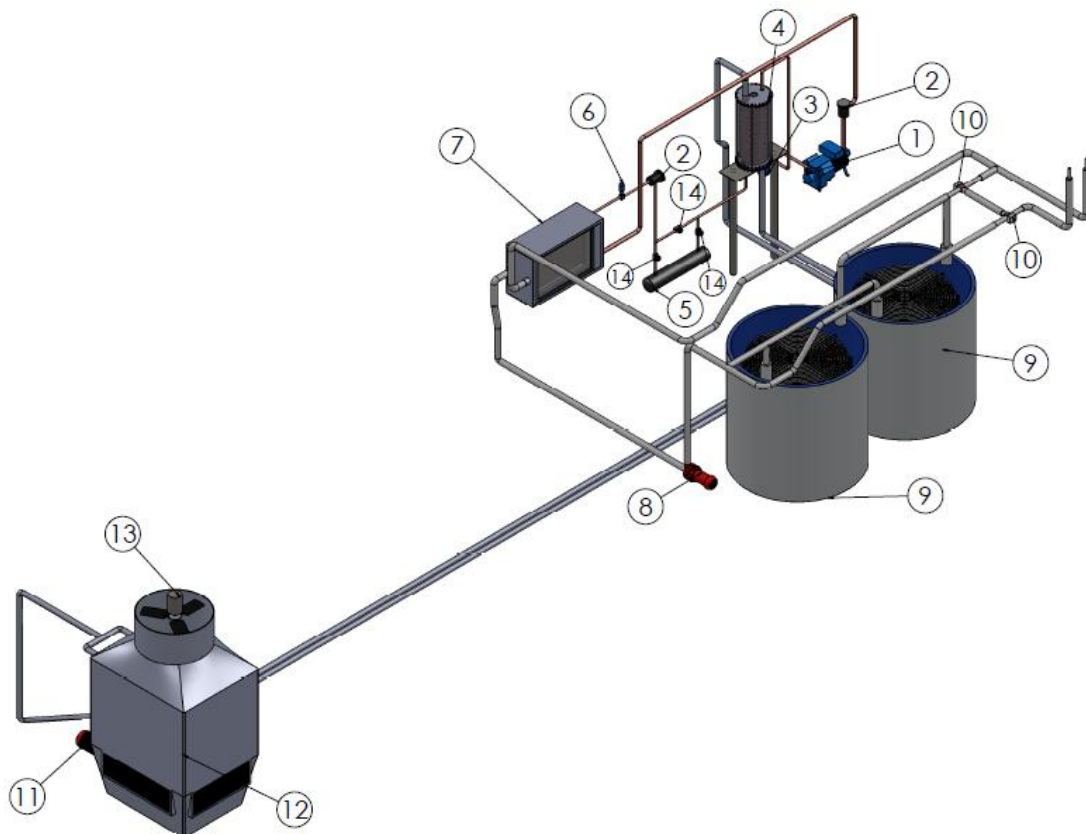
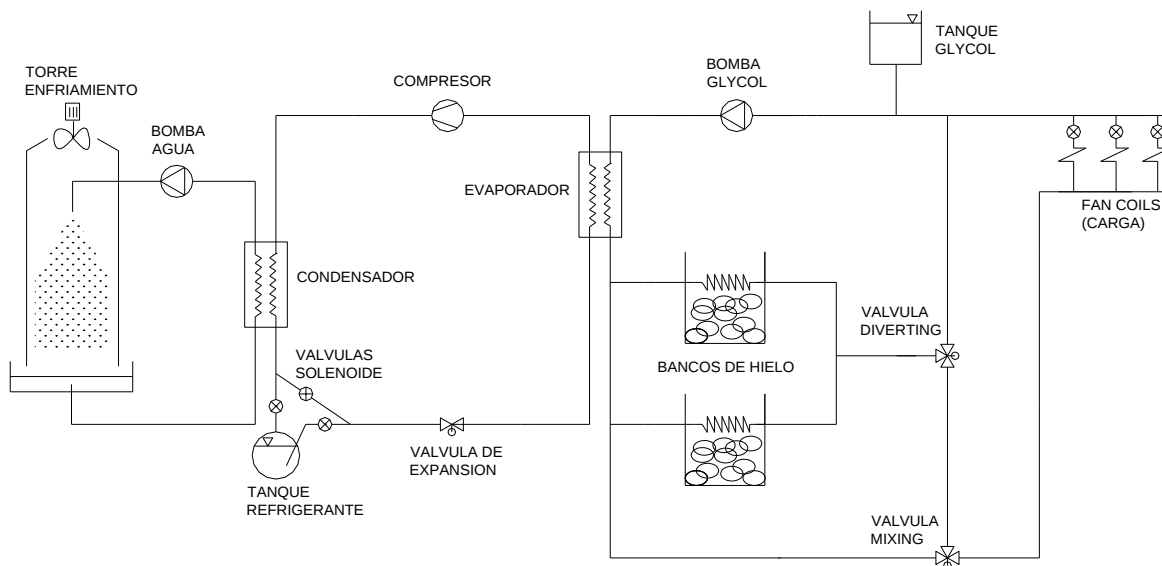


Figura 1. Ensamble Chiller (Edificio 340- Universidad del Valle).

3. Objetivo

- Conocer los elementos que componen el sistema de refrigeración secundario del edificio 340.
- Reconocer los sistemas mecánicos, de medición y control.
- Entender el funcionamiento del CHILLER y la relación que existe entre las etapas que lo componen.
- Con los datos obtenidos en el historial comparar las temperaturas y las presiones del refrigerante a la entrada y salida de:
 - Compresor.
 - Evaporador.
 - Condensador.
 - Válvula de expansión.

4. Montaje experimental



PREINFORME

1. ¿Cuál es el funcionamiento básico del CHILLER?
2. ¿Cuáles son los equipos que más te llamaron la atención y por qué?
3. ¿Qué mejoras le harías al equipo?

BALANCES DE MASA Y ENERGÍA
SUBSISTEMA REFRIGERACIÓN POR COMPRESIÓN DE VAPOR

1. INTRODUCCIÓN

Un enfriador o bomba de calor es una máquina que opera en ciclos, que consume trabajo y que absorbe calor a un nivel bajo de temperatura y lo descarga en un nivel alto.

El sistema de refrigeración de este laboratorio utiliza refrigerante R22 como fluido de trabajo, cuenta con un compresor de desplazamiento positivo con variador de velocidad, un condensador de contraflujo cruzado (Condensador combinado), un tanque para almacenamiento de gas refrigerante, una válvula de expansión electrónica, un evaporador de tubo aleteado y, lógicamente, con la tubería y accesorios necesarios. Además se dispone de elementos auxiliares como filtros, válvulas solenoides, visores de paso de refrigerante, separador de aceite y sensores para medición de presión y temperatura.

En el sistema de refrigeración por compresión de vapor, el refrigerante sale del compresor en estado gaseoso a alta temperatura y presión. Posteriormente, el refrigerante fluye a través de un intercambiador de calor llamado condensador en el cual el refrigerante le transfiere calor a un fluido (aire o agua), y como resultado de esto el refrigerante se condensa (Proceso isobárico). En este punto el refrigerante se encuentra en estado líquido a alta presión y con menor temperatura, comparada con la de la salida del compresor. Luego de su paso por el condensador, el refrigerante fluye a través de un dispositivo de estrangulamiento llamado válvula de expansión donde la presión y temperatura del refrigerante caen, en la salida de la válvula de expansión, el refrigerante se encuentra en una mezcla de liquido-vapor (este proceso es isoentálpico).

Seguidamente, el refrigerante fluye a través de un intercambiador de calor llamado evaporador, en el cual el refrigerante absorbe calor del fluido que se desea enfriar (aire, agua ó glicol, cumpliendo con la ley cero de la termodinámica), y de esta manera se evapora el refrigerante completamente (Proceso isobárico).

Por último, el refrigerante en forma de vapor a baja presión y baja temperatura, completa el ciclo pasando nuevamente por el compresor.

El Sistema de refrigeración es controlado por un PLC (Controlador Lógico Programable) que puede funcionar de manera automática y/o manual.

Los cuatro procesos que componen el ciclo mencionados anteriormente son clasificados como compresión isoentrópica (A-B), condensación isobara (B-C), expansión isoentálpica (C-D) y evaporación isobara (D-E). (Ver figura 1).

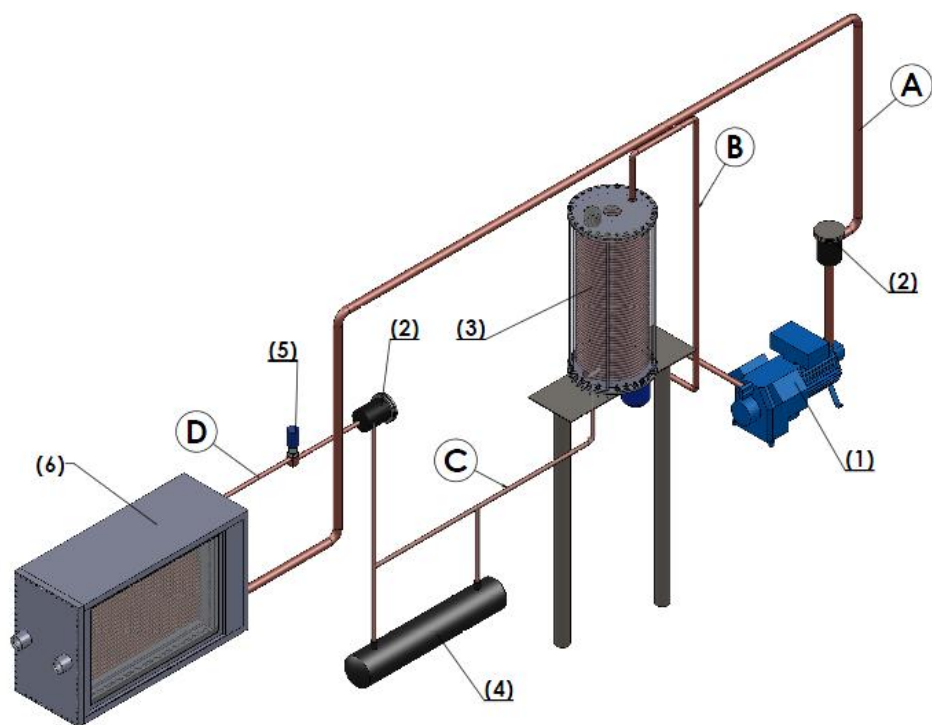


Figura 1. Ciclo compresión de vapor del CHILLER Edificio 340 Univalle.

Antes de realizar el análisis energético de los componentes del sistema de refrigeración por compresión de vapor, se debe considerar que este es un subsistema de flujo continuo, en el cual el análisis de flujo másico se considera constante en un instante de tiempo en cualquier punto del subsistema. Lo que quiere decir que:

$$\dot{m}_{R22} = \dot{m}_A = \dot{m}_B = \dot{m}_C = \dot{m}_D$$

El flujo volumétrico del circuito varía respecto a las revoluciones del compresor, además de ser diferente en un mismo instante de tiempo en diferentes puntos del circuito. Para este caso se toma el flujo volumétrico en la succión del compresor, por ser un dato entregado por el proveedor del componente. A continuación, en la tabla 1 se da la variación del flujo volumétrico a la entrada del compresor, teniendo en cuenta que el compresor trabaja dentro de los límites de operación entre 30 Hz y 60 Hz.

Frecuencia (Hz)	Flujo Volumétrico (m^3/s)
30	0,0090
35	0,0105
40	0,0120
45	0,0135
50	0,0157
55	0,0165
60	0,0189

Tabla 1. Flujo Volumétrico de succión de R22 en función de la frecuencia del compresor.

Para hallar el flujo másico se debe de utilizar la siguiente expresión:

$$\dot{m} = \dot{V}_{f(frecuencia)} \times \rho_{f(T,P)}$$

Donde:

$\dot{V}_{f(frecuencia)}$ =Flujo Volumétrico del compresor en la succión. (Ver tabla 1).

$\rho_{f(T,P)}$ =Densidad del refrigerante R22 en la succión del compresor.

Nota: Tener en cuenta que la densidad $\rho_{f(T,P)}$ se debe hallar con la presión y temperatura de succión del compresor.

Para los cálculos respectivos y de acuerdo con el diagrama **P Vs h** del ciclo termodinámico de la figura 2, las siguientes relaciones son resultados de los análisis de cada proceso.

$\dot{Q}_{entra} = \dot{m}_{R22}(h_A - h_D)$; Calor absorbido en el evaporador

$\dot{Q}_{sale} = \dot{m}_{R22}(h_C - h_B)$; Calor rechazado en el condensador

$W_{comp} = \dot{m}_{R22}(h_B - h_A)$; Flujo energético que le entrega el compresor al refrigerante.

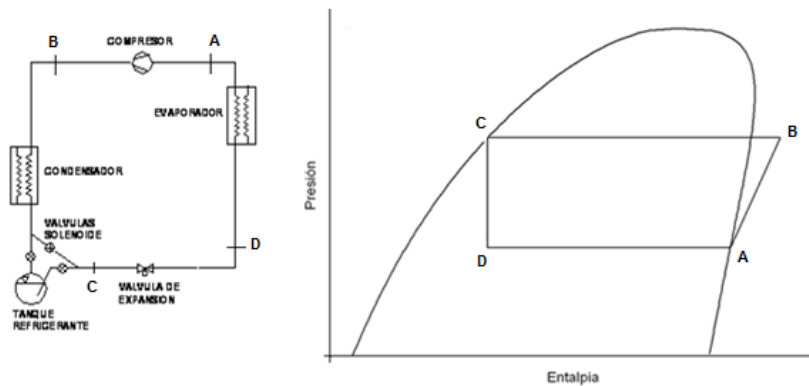


Figura 2. Ciclo de refrigeración por compresión de vapor representado en el diagrama P-h

2. EQUIPO DE LABORATORIO

El sistema de refrigeración del laboratorio (ver figura 1) consta de los siguientes equipos:

1. Compresor semihermético.
2. Filtro secador.
3. Condensador cruzado en contra flujo.
4. Acumulador.
5. Válvula de expansión electrónica.
6. Evaporador en contraflujo.

3. OBJETIVOS

- Realizar una prueba en el equipo CHILLER dentro de los parámetros de trabajo estable en el equipo. (Tener en cuenta que los parámetros están dados en el instructivo de proceso del equipo).
- Realizar balances de masa y energía del subsistema de refrigeración por compresión de vapor: compresor, condensador, evaporador y válvula de expansión.
- Determinar el cambio del consumo en el compresor vs tiempo.

4. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

En primera instancia se realizará una sesión de visita guiada, en la cual se realizará la toma y obtención de datos. Previo a la visita guiada usted deberá realizar el test de preinforme.

Durante la visita el profesor o instructor lo ilustrará en un recorrido donde le explicará en detalle el funcionamiento mecánico y energético de cada uno de los componentes de los tres sistemas. Usted observará en la pantalla del controlador AKS-255 los valores, en línea y en tiempo real, de las diversas variables de funcionamiento y de las acciones de control que se estén ejecutando.

Se tomarán diferentes valores de presión y temperatura, con los cuales se llena la tabla 2, para posteriormente hacer los cálculos de entalpías y energías tabla 3 y tabla 4.

Nota: La ubicación de los sensores de temperatura, los transductores de presión y medidores de caudal del CHILLER puede ser vista en el plano ensamble que se encuentra en el laboratorio.

Tiempo	P_1 (bar)	ΔP Cond (bar)	P_3 (bar)	P_4 (bar)	T_1 (°C)	T_2 (°C)	T_4 (°C)

Tabla 2. Toma de presiones y temperaturas.

Tiempo	$\dot{m}$ (Kg/s)	h_a (KJ/Kg)	h_b (KJ/Kg)	h_c (KJ/Kg)	h_d (KJ/Kg)	w_{comp} (KJ/Kg)	q_{ent} (KJ/Kg)	q_{sale} (KJ/Kg)

Tabla 3. Tabla de entalpías y energías específicas.

Tiempo	$\dot{Q}_{ent}$ (KW)	$\dot{Q}_{sale}$ (KW)	$\dot{W}_{comp-calculado}$ (KW)

Tabla 4. Tablas de potencias.

Nota: Se recomienda el programa Termo GrafV5.7 para la simulación de los estados y los procesos.

PREINFORME

Para el preinforme, él estudiante debe documentarse acerca del funcionamiento de refrigeración básica, para esto se plantean las siguientes preguntas las cuales el estudiante debe llevar resueltas para el día del laboratorio:

1. ¿Qué es un sistema de refrigeración?
2. ¿Qué equipos se encuentran en un sistema de refrigeración básico y cuáles son sus funciones?
3. Investigar sobre el diagrama presión Vs entalpía del refrigerante R22 e identifique sus variables.

SEGUNDA LEY DE LA TERMODINÁMICA DEL SUBSISTEMA DE REFRIGERACIÓN POR COMPRESIÓN DE VAPOR

1. INTRODUCCIÓN

Un enfriador o bomba de calor es una máquina que opera en ciclos, que consume trabajo y que absorbe calor a un nivel bajo de temperatura y lo descarga en un nivel alto. En el sistema de refrigeración por compresión de vapor, el refrigerante sale del compresor en estado gaseoso a alta temperatura y presión. Posteriormente, el refrigerante fluye a través de un intercambiador de calor llamado condensador en el cual el refrigerante le transfiere calor a un fluido de enfriamiento (aire o agua), y como resultado de esto el refrigerante se condensa. En este punto el refrigerante se encuentra en estado líquido a alta presión. Luego de su paso por el condensador, el refrigerante fluye a través de un dispositivo de estrangulamiento llamado válvula de expansión donde la presión y temperatura del refrigerante cae y parte de éste se evapora (este proceso es isoentálpico, $h_3 = h_4$). Seguidamente, el refrigerante fluye a través de un intercambiador de calor llamado evaporador, en el cual el refrigerante absorbe calor del fluido que se desea enfriar (aire, agua ó glicol, cumpliendo con la ley cero de la termodinámica), y de esta manera se evapora el refrigerante completamente. Por último, el refrigerante en forma de vapor a baja presión y temperatura completa el ciclo pasando nuevamente por el compresor.

El sistema de refrigeración por compresión de vapor en un ciclo ideal trabaja con un compresor isoentrópico, intercambiadores de calor isobáricos y una válvula de expansión isoentálpica; pero esto es una aproximación de lo que se presenta en la realidad; ya que el compresor aumenta su entropía por irreversibilidades del proceso, en los intercambiadores de calor la presión en el recorrido del fluido disminuye y en la válvula de expansión se tendrán pérdidas de energía.

Los cuatro procesos que componen el ciclo mencionados anteriormente son clasificados como compresión isoentrópica (A-B), condensación isobara (B-C), expansión isoentálpica (C-D) y evaporación isobara (D-E). (Ver figura 1).

En este sistema de refrigeración por compresión de vapor, el compresor es el componente que consume la mayor cantidad de energía; cuando una máquina está consumiendo energía su eficiencia isoentrópica esta expresada por la razón entre el trabajo ideal y el trabajo real como se observa en la ecuación (1), donde se calcula la eficiencia isoentrópica para un compresor.

$$\eta_c = \frac{\text{trabajo isentrópico del compresor}}{\text{trabajo real del compresor}} = \frac{w_s}{w_a} \quad \text{Ecuación (1)}$$

Entre más eficiente sea el compresor mayor coeficiente de desempeño COP obtendrá el sistema de refrigeración por compresión de vapor.

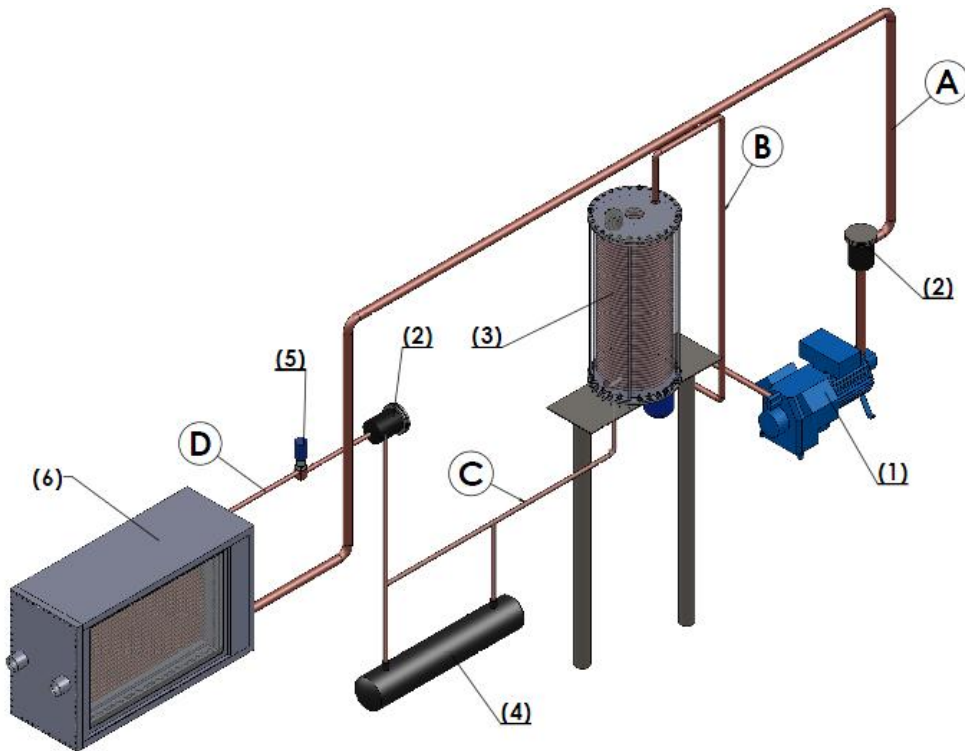


Figura 1. Ciclo compresión de vapor del CHILLER Edificio 340 Univalle.

Entonces, en el **ciclo ideal** de compresión de vapor, se considera que todo el sistema trabaja a dos presiones constantes, una de baja y una de alta; la de alta a la salida del compresor y la de baja a la salida de la válvula de expansión, para este caso presiones P_1 y P_3 respectivamente tomadas del control aks-255 del CHILLER. Además considerando lo siguiente:

- Estados:
 - ✓ Salida del condensador - Líquido saturado (Calidad $x=0$).
 - ✓ Salida del evaporador - Vapor saturado (Calidad $x=1$).
- Procesos:
 - ✓ Compresor- Isoentrópico (Adiabático).
 - ✓ Válvula de expansión- Isoentálpico.
 - ✓ Intercambiadores de Calor - Isobáricos.

Para esta práctica se deberá hallar la eficiencia del compresor mediante la ecuación (1), en diferentes instantes de tiempo del ciclo termodinámico. Además de calcular el coeficiente de desempeño del ciclo ideal. El coeficiente de desempeño ideal se puede hallar mediante la ecuación (2):

$$COP_{R_{ideal}} = \frac{\dot{Q}_{entrada}}{\dot{W}_{compresor}} = \frac{\dot{m}_{R22}(h_A - h_D)}{\dot{m}_{R22}(h_B - h_A)} \quad \text{Ecuación (2)}$$

Nota 1: Los subíndices A, B, C y D de las variables utilizadas en las ecuaciones hacen referencia al posicionamiento del estado en el proceso al cual se está midiendo, dicho posicionamiento se puede visualizar en la figura 1.

El flujo volumétrico del circuito varía respecto a las revoluciones del compresor, además de ser diferente en un mismo instante de tiempo en diferentes puntos del circuito. Para este caso se toma el flujo volumétrico en la succión del compresor, por ser un dato entregado por el proveedor del componente. A continuación, en la tabla 1 se da la variación del flujo volumétrico a la entrada del compresor, teniendo en cuenta que el compresor trabaja dentro de los límites de operación entre 30 Hz y 60 Hz.

Frecuencia (Hz)	Flujo Volumétrico (m^3/s)
30	0,0090
35	0,0105
40	0,0120
45	0,0135
50	0,0157
55	0,0165
60	0,0189

Tabla 1. Flujo Volumétrico de succión de R22 en función de la frecuencia del compresor.

Para hallar el flujo másico se debe de utilizar la siguiente expresión:

$$\dot{m} = \dot{V}_{f(frecuencia)} \times \rho_{f(T,P)}$$

Donde:

$\dot{V}_{f(frecuencia)}$ =Flujo Volumétrico del compresor en la succión. (Ver tabla 1).

$\rho_{f(T,P)}$ =Densidad del refrigerante R22 en la succión del compresor. **Tener en cuenta que la densidad $\rho_{f(T,P)}$ se debe hallar con la presión y temperatura de succión del compresor.**

Para hallar h_A , se toma como premisa que se consideró que la presión de baja en cada instante del ciclo es constante y es la que está a la salida de la válvula de expansión (P3), esto se debe a que el evaporador idealmente es isobárico ósea que la presión en el trayecto de la válvula de expansión hasta la salida del evaporador es constante. Además se debe garantizar que el refrigerante a la salida del evaporador está totalmente evaporado, es decir el refrigerante debe tener una calidad 1 (Vapor saturado, x=1). (Ver figura 2).

Para hallar h_B en el proceso ideal; el compresor trabaja isoentrópicamente hasta la presión de alta (P1). (Ver figura 2).

Para hallar h_D se debe hallar primero h_C . Considerando la presión de alta en cada instante del ciclo es constante y es la que está a la salida del compresor (P1); esto se debe a que el condensador para el caso ideal se toma como isobárico. Además se debe garantizar que el refrigerante a la salida del condensador está totalmente condensado, es decir el refrigerante debe tener una calidad 0 (Líquido saturado, x=0). (Ver figura 2).

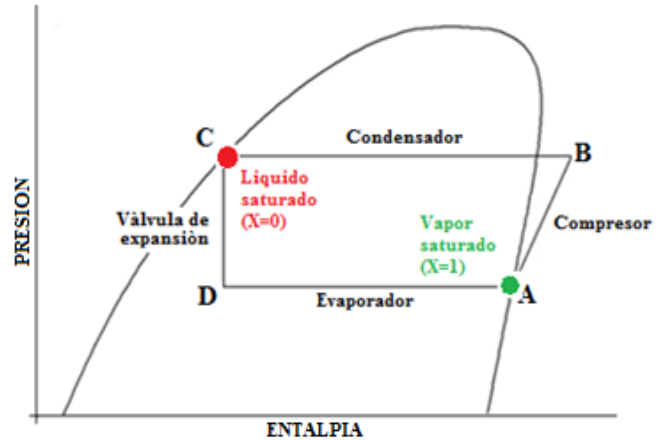
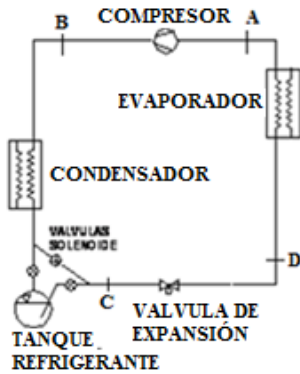


Figura 2. Esquema del ciclo de compresión de vapor.

Ahora bien, los datos utilizados para el **ciclo real** son los arrojados por el control AKS-255 del CHILLER. Además para el cálculo de desempeño real se debe utilizar la ecuación (3). Se toma el trabajo del compresor dado por el variador de frecuencia, ya que este es el trabajo que consume el compresor realmente.

$$COP_{R_{real}} = \frac{\dot{Q}_{entrada}}{\dot{W}_{compresor-variador}} = \frac{\dot{m}_{R22}(h_A - h_D)}{\dot{W}_{compresor-variador}} \quad \text{Ecuación (3)}$$

2. EQUIPO DE LABORATORIO

El sistema de refrigeración del laboratorio (ver figura 1) consta de los siguientes equipos:

1. Compresor semihermético.
2. Filtro secador.
3. Condensador cruzado en contra flujo.
4. Acumulador.
5. Válvula de expansión electrónica.
6. Evaporador en contraflujo.

3. OBJETIVOS

- Realizar la grafica ideal y la real de P vs H del ciclo de compresión de vapor, en uno de los tiempos indicados en las tablas, (sugerencia usar termograf).
- Calcular los coeficientes de desempeño del sistema de refrigeración ideal y real, ¿Qué conclusiones se pueden sacar de dichos resultados?
- Calcular la eficiencia isoentrópica del compresor, ¿qué conclusiones tiene?
- Identificar las irreversibilidades que se ignoran cuando se realiza el análisis ideal del ciclo.

4. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

En primera instancia se realizará una sesión de visita guiada, en la cual se realizará la toma y obtención de datos. Previo a la visita guiada usted deberá realizar el test de preinforme.

Durante la visita el profesor o instructor lo ilustrará en un recorrido donde le explicará en detalle el funcionamiento mecánico y energético de cada uno de los componentes del sistema. Luego le indicaran como se puede visualizar las variables involucradas en el sistema, por medio del monitor del controlador AKS-255 y de las acciones de control que se estén ejecutando.

Se tomarán los valores de presión P1 y P3, para la tabla 2. Estos valores son considerados la presión de alta (P1) y la presión de baja (P3) del ciclo ideal.

TABLA DE DATOS CICLO IDEAL		
Tiempo (min)	P1 (bar)	P3 (bar)

Tabla 2. Tabla de datos ciclo Ideal.

Luego se procede a calcular el coeficiente de desempeño del ciclo de compresión de vapor ideal (COP_{ideal}) en la tabla 3. (Ver ecuación 2 y nota 1).

CALCULOS PARA CICLO IDEAL												
Tiempo (min)	h_A (KJ/Kg)	h_B (KJ/Kg)	h_C (KJ/Kg)	h_D (KJ/Kg)	$\dot{m}_{R22}$ (Kg/s)	w_{comp} (KJ/Kg)	$\dot{W}_{comp-calculado}$ (KW)	q_{ent} (KJ/Kg)	$\dot{Q}_{ent}$ (KW)	q_{sale} (KJ/Kg)	$\dot{Q}_{sale}$ (KW)	$COP_{R-ideal}$

Tabla 3. Cálculos para ciclo ideal.

Para realizar el análisis del ciclo real, se deben tomar los datos desde el control AKS255 para la tabla 4.

TABLA DE DATOS CICLO REAL								
Tiempo (min)	P1 (bar)	ΔP Cond (bar)	P3 (bar)	P4 (bar)	T1 (°C)	T2 (°C)	T4 (°C)	

Tabla 4. Tabla de datos ciclo real.

Luego se procede a calcular el coeficiente de desempeño del ciclo de compresión de vapor real (COP_{real}) en la tabla 5. (Ver ecuación 3 y nota 1).

CALCULOS PARA CICLO REAL											
Tiempo (min)	h_A (KJ/Kg)	h_B (KJ/Kg)	h_C (KJ/Kg)	h_D (KJ/Kg)	$\dot{m}_{R22}$ (Kg/s)	$\dot{W}_{comp-variator}$ (KW)	q_{ent} (KJ/Kg)	$\dot{Q}_{ent}$ (KW)	q_{sale} (KJ/Kg)	$\dot{Q}_{sale}$ (KW)	COP_{R-real}

Tabla 5. Cálculos para ciclo real.

Por último, se debe calcular la eficiencia isoentrópica del compresor mediante la ecuación 1. Los cálculos deben ser diligenciados en la tabla 6.

EFICIENCIA ISOENTROPICA DEL COMPRESOR	
Tiempo (min)	η_c

Tabla 6. Eficiencia isoentrópica del compresor.

Nota 2: Se recomienda el programa Termo GrafV5.7 para la simulación de los estados y los procesos.

PREINFORME

- 1- Halle las siguientes definiciones:
 - ¿Qué es un proceso isoentrópico?
 - ¿Qué es un proceso isobárico?
 - ¿Qué es un proceso isoentálpico?
- 2- ¿Qué equipos se encuentran en un sistema de refrigeración básico y cuáles son sus funciones?
- 3- ¿Cuáles son las presiones de baja y de alta en un ciclo de compresión de vapor?

ANALISIS DEL DISEÑO Y EFICIENCIA DEL CONDENSADOR FLUJO CRUZADO EN CONTRAFLUJO

1. INTRODUCCIÓN.

Un intercambiador de calor es cualquier dispositivo en el cual se efectúa transferencia de calor entre dos fluidos.

Existen diferentes tipos de intercambiadores de calor, ya que se presentan en muchas formas, tamaños, materiales de manufactura y modelos, estos son categorizados de acuerdo con características comunes. Una de las características que se puede emplear es la dirección relativa que existe entre los dos flujos. Las tres categorías son: Flujo paralelo, Contra-flujo y Flujo cruzado.

- **Flujo paralelo.**

Como se ilustra en la figura 1, existe un flujo paralelo cuando el flujo interno o de los tubos y el flujo externo o de la carcaza ambos fluyen en la misma dirección. En este caso, los dos fluidos entran al intercambiador por el mismo extremo y estos presentan una diferencia de temperatura significativa. Como el calor se transfiere del fluido con mayor temperatura hacia el fluido de menor temperatura, la temperatura de los fluidos se aproximan la una a la otra, es decir que uno disminuye su temperatura y el otro la aumenta tratando de alcanzar el equilibrio térmico entre ellos. Debe quedar claro que el fluido con menor temperatura nunca alcanza la temperatura del fluido más caliente.

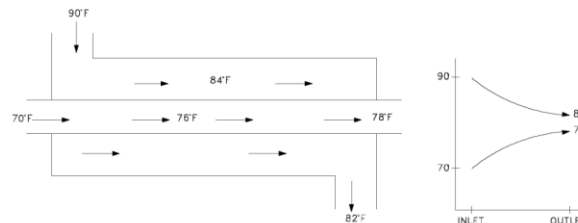


Figura 1. Intercambiador de calor de flujo paralelo.

- **Contraflujo.**

Como se ilustra en la figura 2, se presenta un contra-flujo cuando los dos fluidos fluyen en la misma dirección pero en sentido opuesto. Cada uno de los fluidos entra al intercambiador por diferentes extremos. Este tipo de intercambiador resulta ser más eficiente en contraste con el intercambiador de calor de flujo paralelo.

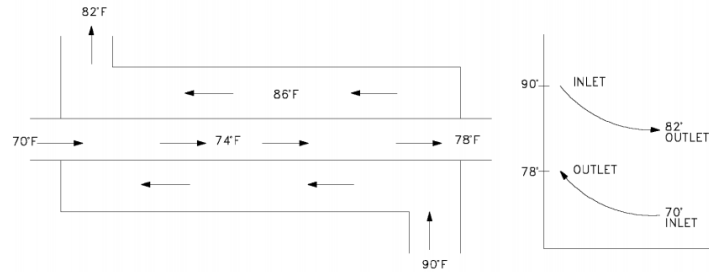


Figura 2. Intercambiador de calor de contra-flujo.

- **Flujo cruzado**

En la figura 3, se muestra como en el intercambiador de calor de flujo cruzado uno de los fluidos fluyen de manera perpendicular al otro fluido, esto es, uno de los fluidos pasa a través de tubos mientras que el otro pasa alrededor de dichos tubos formando un ángulo de 90 grados. Los intercambiadores de flujo cruzado son comúnmente usado donde uno de los fluidos presenta cambio de fase.

En la actualidad, la mayoría de los intercambiadores de calor no son puramente de flujo paralelo, contra-flujo, o flujo cruzado; estos son comúnmente una combinación de los dos o tres tipos de intercambiadores.

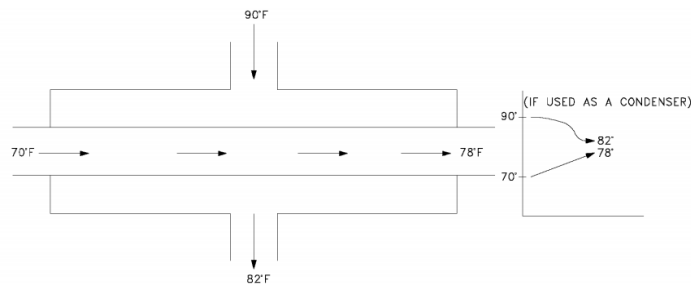


Figura 3. Intercambiador de calor de flujo cruzado.

El condensador del CHILLER es considerado una combinación de flujo cruzado con contraflujo, como se puede ver en la figura 4.



Figura 4. Condensador CHILLER Univale Edificio 340.

El calor transferido se puede calcular al aplicar un balance de energía a los fluidos caliente y frío; de donde obtenemos las ecuaciones 1a y 1b.

$$\dot{Q}_{R22} = \dot{m}_{R22}(h_A - h_B) \quad \text{Ecuación 1a.}$$

$$\dot{Q}_{agua} = \dot{m}_{agua}(h_C - h_D) \quad \text{Ecuación 1b.}$$

Nota: Recordar que el flujo másico varía respecto a las revoluciones del compresor. Ver Guías de segunda y primera Ley.

En el condensador se presentan el intercambio de calor entre el agua y el refrigerante a presiones constantes, por tal razón se suponen calores específicos a presión constante, con lo cual llegamos a las ecuaciones 2a y 2b.

$$\dot{Q}_{R22} = \dot{m}_{R22}c_{p,R22}(T_1 - T_2) \quad \text{Ecuación 2a.}$$

$$\dot{Q}_{agua} = \dot{m}_{agua}c_{p,agua}(T_5 - T_3) \quad \text{Ecuación 2b.}$$

Eficiencia.

La eficiencia de un intercambiador se define como se observa en la ecuación 3:

$$\varepsilon = \frac{\dot{Q}_{real}}{\dot{Q}_{máximo}} \quad \text{Ecuación 3.}$$

Donde la transferencia de calor máxima posible es la que resultaría si un fluido sufriera un cambio de temperatura igual a la máxima diferencia de temperatura disponible, la temperatura de entrada del refrigerante R22 (T_1) menos la temperatura de entrada del agua que viene de la torre de enfriamiento (T_5). Para este caso la eficiencia del condensador que interesa es la del refrigerante, ya que se debe garantizar que el refrigerante cuando salga del condensador se encuentre en un estado de líquido saturado o sub-enfriado.

Entonces el calor máximo está representado por la ecuación 4:

$$\dot{Q}_{máx} = \dot{m}_{R22}(h_A - h_{B@T5}) \quad \text{Ecuación 4.}$$

2. EQUIPO DE LABORATORIO

En esta práctica se centrará el estudio, a evaluar la eficiencia del condensador del sistema de compresión de vapor del equipo de refrigeración CHILLER. Pero de igual forma se debe utilizar todo el equipo. Los componentes con más relevancia para este laboratorio son:

- Condensador de flujo cruzado a contra flujo.
- Termocuplas T_1 , T_2 , T_3 , T_5
- Transductor de presión P_1 , P_2 y transductor diferencial de presión P_{1-2} .
- Tubo de Pitot
- Control del CHILLER (donde se visualiza la lectura de los sensores análogos y el transductor de presión mencionados anteriormente).

- Bomba de 5 HP (bomba torre de enfriamiento).
- Compresor Bock HG4/650-4SN.

Nota: Ver Plano de ensamble de los componentes.

3. OBJETIVOS

- Evaluar el funcionamiento del condensador del CHILLER de tipo combinado (contraflujo a flujo cruzado).
- Calcular el calor transferido del refrigerante al agua, y el calor absorbido por el agua. ¿Qué se puede concluir?
- Calcular la eficiencia del condensador para los parámetros de entrada dados.
- Estudiar la incidencia del caudal y las temperaturas de entrada en la eficiencia del condensador.

4. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

En primera instancia se realizará una sesión de visita guiada, en la cual se realizará la toma y obtención de datos. Previo a la visita guiada usted deberá realizar el test de preinforme.

Durante la visita el profesor o instructor lo ilustrará en un recorrido donde le explicará en detalle el funcionamiento mecánico y energético de cada uno de los componentes del sistema. Luego le indicaran como se puede visualizar las variables involucradas en el sistema, por medio del monitor del controlador AKS-255 y de las acciones de control que se estén ejecutando.

Antes de empezar a tomar los datos para la tabla 1. Se debe esperar un tiempo para que las temperaturas T_3 y T_5 se estabilicen, porque los valores de temperaturas tomados a la entrada y salida del condensador que provienen del ciclo de la Torre de enfriamiento fluctúan en los primeros minutos de funcionamiento o arranque del equipo.

Tiempo (min)	P_1 [bar]	P_4 [bar]	ΔP Cond (bar)	T_1 [°C]	T_2 [°C]	T_3 [°C]	T_4 [°C]	T_5 [°C]

Tabla1. Datos del condensador.

Posterior a la toma de datos diligenciados en la tabla 1, se deben realizar los cálculos de calor rechazado en el condensador, por medio de las ecuaciones 1 y 2.

Tiempo (min)	h_A (KJ/Kg)	h_B (KJ/Kg)	h_C (KJ/Kg)	h_D (KJ/Kg)	$\dot{m}_{R22}$ (Kg/s)	q_{R22} (KJ/Kg)	$\dot{Q}_{R22}$ (KW)	$\dot{m}_{agua}$ (Kg/s)	q_{agua} (KJ/Kg)	$\dot{Q}_{agua}$ (KW)

Tabla 2. Calor rechazado por el R22 y calor absorbido por el agua.

La eficiencia del condensador que interesa es la del refrigerante, ya que se debe garantizar que este cuando salga del condensador se encuentre en un estado de líquido saturado ($x=0$) o sub-enfriado. Entonces utilizando la ecuación 3 y 4, se debe calcular el calor máximo de rechazo y la eficiencia del condensador para diligenciarlo en la tabla 3.

Tiempo (min)	$h_{B@T5-P1}$ (KJ/Kg)	$\dot{Q}_{máximo}$ (KW)	$n_{condensador}$

Tabla 3. Cálculo de la eficiencia del condensador.

PREINFORME

1. Describa brevemente (incluya esquemas si es necesarios) los principales tipos de intercambiadores de calor.
2. Explique el concepto de eficiencia en un intercambiador de calor.

DETERMINACIÓN DE LA CARGA DE LA BOMBA DE LA TORRE DE ENFRIAMIENTO Y LAS PÉRDIDAS DE PRESIÓN DEL RECORRIDO

1. INTRODUCCIÓN.

Las bombas centrífugas son turbomáquinas rotodinámicas que transfieren energía a un líquido mediante la acción de un elemento en rotación denominado rodete, que impulsa al fluido a circular a través de unos canales delimitados por álabes de modo que el fluido entra en la dirección axial y sale en la dirección radial. El fluido que sale del rodete es recogido por una conducción de sección creciente, denominada voluta, que va rodeando la salida del rodete, dirigiendo finalmente el fluido hacia el conducto de impulsión a través de un tramo difusor.

La energía específica (es decir, la energía por unidad de volumen, masa o peso de fluido) que una bomba dada es capaz de transmitir al fluido depende del caudal circulante, el cual puede variar entre 0 y un cierto caudal máximo. También la energía consumida por la bomba (la que absorbe del motor de accionamiento) y el rendimiento (relación entre la energía entregada al fluido y la energía consumida) son función del caudal en circulación.

La representación gráfica de la energía específica, la potencia consumida y el rendimiento de la bomba en función del caudal se denominan curvas características de la bomba. Estas curvas constituyen la información básica necesaria para predecir las magnitudes de operación de la bomba en un circuito dado, y por lo tanto suelen ser aportadas por los fabricantes en sus catálogos y demás documentación técnica.

La determinación de la carga de una bomba es el dato más característico e importante en el funcionamiento de la misma.

Ahora, para el cálculo de la carga neta o de funcionamiento de la bomba se parte de la ecuación de Bernoulli (ver ecuación 1).

$$H_{carga\ neta} = \sum_i^f H_{descarga} = \left(\frac{P_f - P_i}{\gamma_{H_2O}} \right) + (H_f - H_i) + \left(\frac{v_f^2 - v_i^2}{2g} \right) + \sum_i^f H_{perdidas} \quad \text{Ecuación 1}$$

En la ecuación anterior se considera que la presión inicial y final son iguales, además que la velocidad inicial es igual a cero; por tanto la ecuación 1 queda expresada de la siguiente manera:

$$H_{carga\ neta} = \sum_i^f H_{descarga} = (H_f - H_i) + \left(\frac{v_f^2}{2g} \right) + \sum_i^f H_{perdidas}$$

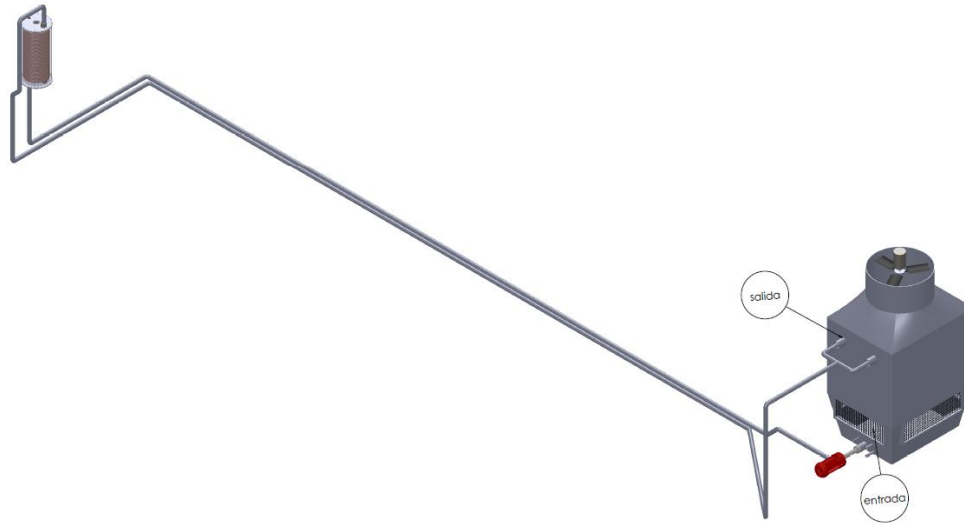


Figura 1. Recorrido sistema Torre de enfriamiento.

Nota: Los subíndices i,f indican inicial y final respectivamente.

Para hallar las pérdidas de presión de inicio a fin del recorrido ($\sum_i^f H_{perdidas}$) se deben considerar las pérdidas primarias y secundarias. En las pérdidas primarias se encuentran las que son originadas debido a la fricción (longitudes y áreas); mientras que en las pérdidas secundarias se encuentran las debidas a los accesorios del recorrido (válvulas, codos, cheques, etc).

Es decir que:

$$\sum_i^f H_{perdidas} = \sum_i^f H_{Tuberia\ recta} + \sum_i^f H_{ensanchamiento} + \sum_i^f H_{contraccion} + \sum_i^f H_{accesorios} \quad \text{Ecuación 2}$$

- Las pérdidas de carga debido al recorrido en las tuberías, está dada por la ecuación 3.

$$\sum H_{tuberia\ recta} = f \times \frac{\sum L}{D} \times \frac{V^2}{2g} \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde L longitud total de la tubería de PVC y f es el coeficiente de rozamiento.

Para hallar f se debe tener en cuenta el número de Reynolds y la rugosidad relativa del material.

$$f \begin{cases} R_e = \frac{VD}{\nu} \\ e = \frac{\epsilon}{D} \end{cases}$$

Donde : D= Diámetro del tubo.

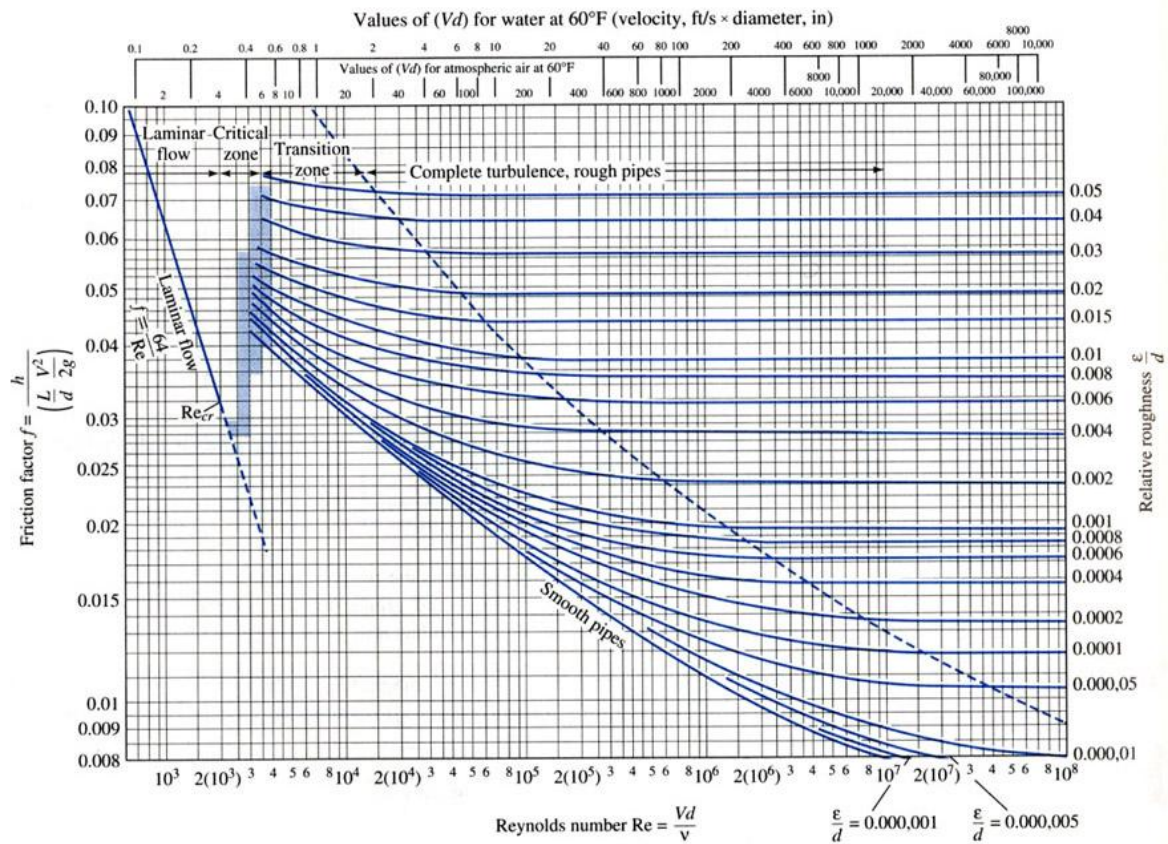
V= Velocidad del fluido.

ν = Viscosidad cinemática del fluido. [$\frac{m^2}{s}$]

ϵ = Rugosidad absoluta del tubo. [m]

La rugosidad absoluta del tubo es una constante que depende del material del que esté hecho el mismo, en este caso la rugosidad absoluta del tubo de PVC es aproximadamente $\epsilon = 0,0015$ mm.

Posterior a esto se ubica el coeficiente de rozamiento respectivo por medio del diagrama de Moody (Ver gráfico 1).



Gráfica 1. Diagrama de Moody.

- $\Sigma H_{\text{ensanchamiento}} = \left[1 - \left(\frac{d_1^2}{d_2^2}\right)\right]^2 \times \frac{V^2}{2g}$

Donde V es la velocidad en d_1 .

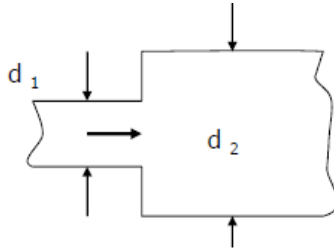


Figura 2. Ensanchamiento brusco

- $\Sigma H_{contraccion} = 0,5 \times \left[1 - \left(\frac{d_1^2}{d_2^2}\right)\right] \times \frac{v^2}{2g}$

Donde V es la velocidad en d_1 .

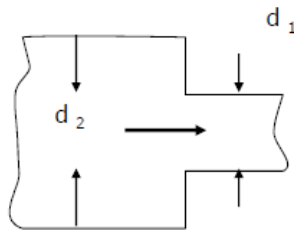


Figura 3. Contracción brusca.

- $\Sigma H_{accesorios} = \Sigma_i^f N^{\circ}accesorios \times K \times \frac{v^2}{2g}$

Donde k es el coeficiente de resistencia que varía respecto a la inclinación del codo o accesorio, como se observa en la tabla 1.

CODO PVC	k
45°	0,4
90°	0,75

Tabla1. Valor de coeficiente de resistencia.

2. EQUIPO DE LABORATORIO

El sistema o recorrido por la Torre de enfriamiento consta de los siguientes componentes:

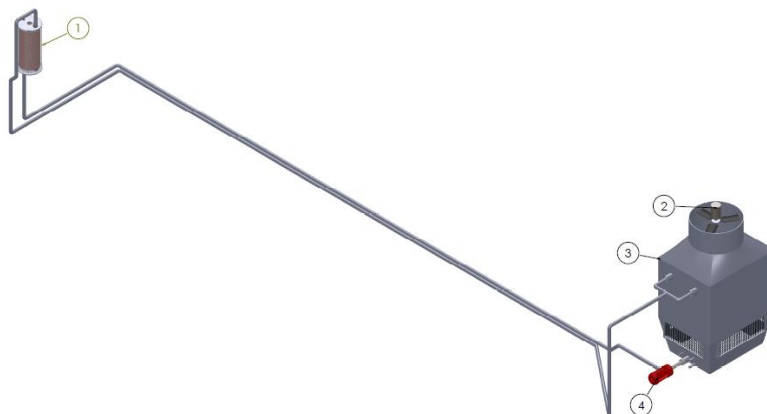


Figura 4. Componentes Sistema Torre de Enfriamiento.

Donde:

- 1- Condensador
- 2- Ventilador de la Torre.
- 3- Torre de Enfriamiento.
- 4- Bomba de 5hp de la Torre de enfriamiento.

3. OBJETIVOS

- El objetivo fundamental de la práctica es comprobar el teorema de Bernoulli experimentalmente. Para ello, será necesario determinar el caudal del fluido en función de la revolución de la bomba, por medio del tubo de Pitot.
- Calcular la carga neta de la bomba, en función de los parámetros establecidos.

PREINFORME

1. Por medio de qué curvas se puede caracterizar el funcionamiento de una bomba centrífuga.
- 2.Cuál es el principio de la ecuación de Bernoulli, explíquela y dedúzquela.

INFORME

El informe se entregará por escrito, debidamente presentado, al profesor dentro de las fechas acordadas

- **HOJA DE PRESENTACIÓN.** Incluirá el título de la práctica, integrantes del grupo, lugar y fecha, a quien se presenta, institución, facultad y programa académico.
- **OBJETIVOS.** Serán los mismos de la guía de laboratorio. Si se considera necesario se podrán modificar o incluir otros.
- **ESQUEMA DEL EQUIPO.** Se esquematizará el equipo utilizado, indicando instrumentos, servicios eléctricos y de control, etc.
- **TABLA DE DATOS.** Incluirá los datos presentados clara y coherentemente.
- **ANÁLISIS Y RESULTADOS.** Es la parte más importante del informe; es el tratamiento analítico de los datos enfocado a establecer si se cumplen o no los objetivos propuestos. La forma de presentación es a discreción del grupo, pero debe ser totalmente clara y concisa, y de alta calidad técnica.
- **OBSERVACIONES Y CONCLUSIONES.** Estas expondrán qué se obtuvo a través de la realización del ensayo, y qué cosas interesantes se deben tener en cuenta.