

**INSTALACIÓN DE UNA UNIDAD DE ABSORCIÓN
ROBUR COMO HERRAMIENTA PEDAGÓGICA EN
LA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA DE LA
UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER**

**JUAN WALBERTO ARTEAGA CRAWFORD
JOSÉ LUIS NEGRETE OLIVERA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICO - MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2.004

**INSTALACIÓN DE UNA UNIDAD DE ABSORCIÓN
ROBUR COMO UNA HERRAMIENTA PEDAGÓGICA
EN LA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA DE LA
UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER**

**JUAN WALBERTO ARTEAGA CRAWFORD
JOSÉ LUIS NEGRETE OLIVERA**

**Trabajo de Grado para optar al título de
Ingeniero Mecánico**

**Director
OMAR ARMANDO GELVEZ AROCHA
Ingeniero Mecánico**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICO - MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2.004

DEDICATORIA

Al Padre Eterno, por ser el TODO
A Beryl, porque la vida es un fandango,
A Juan Arteaga Diaz, mi papá,
A Dolores, mi abuela,
A mis hermanos, por los abrazos que me dan,
A Sybil, mi tia querida,
A Adolfo Franklin, mi tio,
A mi tía Pacha, por los medios días,
Al señor Luis, por los momentos de folklore,
A mis sobrinos, por sus buenos ejemplos,
A AUCA, por ser como Phoenix,
A mis amigos, por ser mis amigos...
Claudia, mi nena querida.
Marcelys, mi gran amiga del alma.
Alexis, mi compadre.
José Luis, mi amigo de grado.
Fernando Pérez, el que me dio consejos.
Hugo García, el que creyó en mí.
John, el que me dijo las cosas como eran.
Fernando Durán, el que me ayudó mucho.
Sergio Costa, Alex del Rio los amigos del folklore.
Camilo, por lo olafo.
Zamir, Amith, Jorge Mario, Yajahira, Jorge Luis, por el 507.
Y todos los demás

Juan Walberto.

DEDICATORIA

A Dios,

A mi madre por ser la mujer que me ha impulsado a salir adelante con su tesón y barraquera.

A Juan, mi amigo de proyecto de grado

Alexis, Emmanuel, Goyo, Camilo e Iván por su amistad todos estos años.

A mis primos Paulo Reinstag, Alexander Reinstag y Kelly.

A dianita mi tia querida

José Luis

AGRADECIMIENTOS

A Omar Gélvez Arocha, ingeniero mecánico, director del proyecto y amigo, a Gildardo Guzmán por su gran ayuda, a Rafael Isaac por la continuación de la gran ayuda, a Libardo Morán por su confianza y colaboración oportuna, a Germán Moreno, a Henry Cruz por su colaboración desinteresada, a Edison y Diego, a Gonzalo, a Fredy y a Lenin.

A mis padres y familiares.

A todos mis amigos.

Juan Arteaga Crawford.

AGRADECIMIENTOS

A Omar Gélvez Arocha, ingeniero mecánico, director del proyecto y amigo, por su respaldo, confianza y colaboración oportuna, a Henry Cruz por su colaboración desinteresada, a Edison y Diego, a Gonzalo, a Fredy y a Lenin.

A mi madre y familiares

A todos mis amigos.

José Negrete Olivera

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	1
1. ESTUDIO DE LA REFRIGERACIÓN POR ABSORCIÓN	3
1.1. JUSTIFICACIÓN	3
1.2 OBJETIVOS	4
1.2.1. Objetivos generales	4
1.2.2. Objetivos específicos	4
2. UNIDAD ENFRIADORA DE AGUA POR ABSORCIÓN MARCA ROBUR	6
2.1 PARÁMETROS TÉCNICOS DEL SISTEMA ROBUR	6
2.1.1 Ciclo de operación	11
2.2 PUESTA A PUNTO DE LA UNIDAD	17
2.2.1 Instrucciones de puesta en marcha inicial	17
2.2.2 Verificación del sistema de encendido	25
3. DESCRIPCIÓN DE LA INSTALACIÓN	33
3.1 UBICACIÓN GEOGRÁFICA Y DIMENSIONES DEL LABORATORIO	33
3.2 ELEMENTOS DEL SISTEMA DE ENFRIAMIENTO INSTALADO	36
3.2.1 Unidad enfriadora	36
3.2.2 Bomba de agua fría	36
3.2.3 Rotámetro	40

3.2.4	Sistemas de tubería de agua y gas	41
3.2.5	Unidad manejadora de aire	41
3.2.6	Suministro eléctrico	42
4	DISEÑO DEL SISTEMA	44
4.1	CÁLCULO DE CARGAS TÉRMICAS DEL LABORATORIO	45
4.1.1	Cargas de enfriamiento	45
4.2	SICROMETRÍA DEL LABORATORIO	52
4.2.1	Condiciones de diseño	52
4.2.2	Factor de calor sensible del laboratorio	53
4.2.3	CFM impulsados	53
4.2.4	CFM aire exterior	53
4.2.5	Temperatura de mezcla	53
4.2.6	Temperatura de adp	53
4.3	DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE DUCTOS	54
4.3.1	Ductos de suministro	54
4.3.2	Ductos de retorno	56
4.3.3	Pérdidas en los ductos de suministro	57
4.4	DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LA UNIDAD MANEJADORA	60
4.4.1	Selección del ventilador	60
4.4.2	Cálculo del serpentín	62
5	INFORMACIÓN Y GUÍA PARA EL MANTENIMIENTO	79
5.1	LIMPIEZA DEL GENERADOR	79
5.2	LIMPIEZA DE LAS SERPENTINAS DEL CONDENSADOR- ABSORBEDOR	82
5.3	SERVICIO GENERAL	83
5.4	VERIFICACIÓN DEL CIRCUITO INTERNO	87

5.5 ANÁLISIS DE LA UNIDAD	88
5.5.1 Carga de refrigerante	97
5.5.2 Extracción del exceso de refrigerante	99
5.5.3. Control del nivel de la solución	99
5.5.4 Preparación de la solución	101
5.5.5 Carga de solución	102
5.5.6 Ajuste de la carga de solución	104
5.5.7 Corrección del defecto de la solución o refrigerante fuera de su lugar (STORE OUT)	105
5.5.8 Purgado de gases no condensables	107
5.6 BOMBA HIDRÁULICA	108
 6 SEGUIMIENTO DEL SISTEMA ROBUR INSTALADO	 113
6.1 PARÁMETROS ECONÓMICOS	113
6.1.1 Consumo energético de la unidad ROBUR	113
6.1.2 Consumo energético de la unidad YORK	115
6.1.3 Comparación energética	116
6.1.4 Comparación económica	117
6.2 PARÁMETROS DE OPERACIÓN	118
6.2.1 Puesta en marcha	121
6.2.2 Respuesta bajo carga diversa	122
6.2.3 Controles	122
 7 DESARROLLO DE LA MULTIMEDIA SOBRE REFRIGERACIÓN POR ABSORCIÓN	 131
7.1 DESCRIPCIÓN DE LA MULTIMEDIA.	131
7.1.1 Pantalla de presentación	131
7.1.2 Pantalla de home	131

7.1.3 Pantalla de los módulos	132
7.1.4 Pantalla de contenido	134
CONCLUSIONES	136
BIBLIOGRAFÍA	138
ANEXOS	139

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Vista lateral de la unidad enfriadora ROBUR modelo ACC 60 – 00.	9
Figura 2. Vista frontal de la unidad enfriadora ROBUR modelo ACC 60– 00.	9
Figura 3. Panel de servicios de la unidad enfriadora de agua ROBUR modelo ACC 60 - 00.	10
Figura 4. Esquema básico de la unidad enfriadora de agua ROBUR.	11
Figura 5. Generador de la unidad enfriadora ROBUR.	12
Figura 6. Cámara niveladora de la unidad ROBUR.	13
Figura 7. Rectificador de la unidad ROBUR.	14
Figura 8. Serpentina del evaporador de la unidad ROBUR.	15
Figura 9. Absorbedor enfriado por solución de la unidad ROBUR.	15
Figura 10. Verificación del nivel de líquido de la bomba hidráulica.	18
Figura 11. Llenado del tanque de agua fría.	19
Figura 12 Ajuste del caudal de agua fría.	20
Figura 13 Control del nivel de agua del tanque.	20
Figura 14. Deflexión de 3 a 7 mm recomendada para la correa de transmisión entre las poleas del motor y bomba.	23
Figura 15. Altura recomendada del ventilador del condensador en la unidad enfriadora ROBUR modelo ACC 60 – 00.	25
Figura 16. Prueba del sistema de encendido.	26

Figura 17. Revisión del interruptor de seguridad...	30
Figura 18. Ubicación del laboratorio de mecánica de fluidos en el campus universitario de la sede principal de la Universidad Industrial de Santander.	34
Figura 19. Vista frontal del laboratorio de mecánica de fluidos de la escuela de ingeniería mecánica de la UIS.	34
Figura 20. Vista lateral del laboratorio de mecánica de fluidos de la escuela de ingeniería mecánica de la UIS.	35
Figura 21. Vista de planta del laboratorio de mecánica de fluidos de la escuela de ingeniería mecánica de la UIS.	35
Figura 22. Ubicación de la unidad enfriadora Robur respecto al laboratorio de mecánica de fluidos.	36
Figura 23. Bomba BARNES tipo caracol modelo c.	37
Figura 24. Dimensiones de la tubería de suministro de agua fría	38
Figura 25. Curva de rendimiento de la bomba BARNES tipo caracol modelo c-210.	40
Figura 26. Gráfica de calibración del rotámetro, caudal en GPM en función de la altura del flotador cm.	41
Figura 27. Ubicación del rotámetro, bomba de agua fría, unidad manejadora de aire y tuberías para agua fría, caliente y de llenado.	42
Figura 28. Tubería de gas y líneas eléctricas de la bomba de agua fría, unidad enfriadora ROBUR y unidad manejadora.	43
Figura 29. Carta psicrométrica que muestra la evolución del aire en el recinto.	54
Figura 30. Distribución de los CFM desde la unidad manejadora por medio del método de igual carga.	55
Figura 31. Sección transversal del ducto de retorno para el sistema de aire acondicionado del laboratorio de mecánica de fluidos.	57

Figura 32. Dimensiones del tramo 2 del ducto de suministro.	57
Figura 33. Dimensiones del tramo 5 del ducto de suministro.	58
Figura 34. Dimensiones del tramo 7 del ducto de suministro.	59
Figura 35. Vista lateral de la unidad manejadora de aire.	60
Figura 36. Datos técnicos del ventilador y tabla para la selección de las rpm del motor y la potencia de frenado del motor.	61
Figura 37. Temperaturas de diseño para el cálculo del serpentín.	62
Figura 38. Esquema de todas las temperaturas en los tubos del serpentín.	63
Figura 39. Dimensiones externas del serpentín.	65
Figura 40. Arreglo a 45° de los tubos en el serpentín.	66
Figura 41. Diámetros interno y externo de los tubos del serpentín	66
Figura 42. Disposición de los tubos en el serpentín.	67
Figura 43. Área de flujo libre en el serpentín.	67
Figura 44. Área de transferencia de las aletas en el serpentín.	68
Figura 45. Valores de L y M para el arreglo del serpentín.	73
Figura 46. Distancias entre tubos en el serpentín.	74
Figura 47. Triángulo de distancias en el serpentín.	74
Figura 48. Interfaz gráfica del programa que calcula la cantidad de calor que el serpentín puede saca del recinto, así como las temperaturas de salida del aire y agua.	78
Figura 49. Desarme del generador para su limpieza.	81
Figura 50. Serpentina del condensador absorbedor.	83
Figura 51 Comportamiento de los manómetros cuando se presenta Store out del refrigerante	90
Figura 52. Comportamiento de los manómetros cuando se presenta el Store out de solución	90

Figura 53. Comportamiento de los manómetros cuando el restrictor de solución parcialmente tapado	91
Figura 54. Comportamiento de los manómetros cuando el restrictor de la solución está tapado	91
Figura 55 Comportamiento de los manómetros cuando hay acomodo incorrecto de la válvula de control de flujo o la válvula check de la bomba de solución	92
Figura 56 Comportamiento de los manómetros cuando la válvula de control de flujo de la bomba hidráulica está defectuosa	93
Figura 57 Comportamiento de los manómetros cuando el restrictor del refrigerante está tapado	93
Figura 58 Comportamiento de los manómetros cuando hay fugas en el absorbedor enfriado por solución	94
Figura 59. Comportamiento de los manómetros cuando hace falta refrigerante	95
Figura 60. Comportamiento de los manómetros cuando hay exceso de refrigerante	95
Figura 61. Comportamiento de los manómetros cuando la solución está baja	96
Figura 62. Comportamiento de los manómetros cuando hay exceso de solución	96
Figura 63. Disposición de las mangueras para cargar el refrigerante	98
Figura 64. Disposición de mangueras para la extracción del exceso de refrigerante.	99
Figura 65. Disposición de mangueras para el control del nivel de solución.	100
Figura 66. Disposición de tanques para la preparación de la solución	102

Figura 67. Disposición de tanques para la carga de la solución.	103
Figura 68. Disposición de elementos para el ajuste de la carga de la solución.	104
Figura 69 Corrección del store-out	106
Figura 70. Purgado de gases no condensables	108
Figura 71 Bomba hidráulica	112
Figura 72 Válvula de control de flujo	112
Figura 73. Medidor de gas	114
Figura 74. Diagrama esquemático de la instalación con los elementos de medición instalados	119
Figura 75. Rotámetro.	119
Figura 76. Reguladora de caudal.	120
Figura 77. Termómetro y manómetros a la entrada y salida de la serpentina de la manejadora	120
Figura 78. Manómetros de alta, bomba de solución y baja instalados en la unidad ROBUR.	121
Figura 79. Manómetro diferencial	121
Figura 80. Esquema eléctrico de la unidad ROBUR ACC 60-00	123
Figura 81. Termostato de agua fría	125
Figura 82. Control de flujo de aire	126
Figura 83. Relay de tiempo	127
Figura 84. Control de encendido eléctrico	128
Figura 85. Válvula de gas	129
Figura 86. Capacitor	129
Figura 87. Interruptor de flujo	130
Figura 88. Pantalla de presentación.	132
Figura 89. Pantalla de módulos.	134
Figura 90. Pantalla de contenidos	135

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Especificaciones técnicas de la unidad enfriadora de agua por absorción marca ROBUR modelo ACC 60-00.	7
Tabla 2. Capacidad de la unidad enfriadora de agua por absorción marca ROBUR modelo ACC 60 -00 en función de la temperatura de salida del agua y de la temperatura de entrada del aire al condensador.	8
Tabla 3. Dimensiones del panel de servicios de la unidad enfriadora ROBUR modelo ACC 60 - 00.	10
Tabla 4. Convención de colores para el esquema de una unidad enfriadora absorción ROBUR.	12
Tabla 5. Presiones en el múltiple del quemador de una unidad enfriadora ROBUR.	22
Tabla 6. Verificación del sistema de encendido.	28
Tabla 7. Valores de L/D para los accesorios del sistema instalado.	38
Tabla 8 Pérdidas a través del circuito de agua fría.	39
Tabla 9. Resumen de las ganancias de calor en el laboratorio de mecánica de fluidos.	52
Tabla 10. Resumen de pérdidas totales y dimensiones de las secciones de los ductos.	56
Tabla 11. Propiedades del aire a las temperaturas de 250 y 300K.	63
Tabla 12. Propiedades del aire a la temperatura de interpolación de 286.75 K.	64
Tabla 13. Valores de la conductividad térmica del cobre a 200 y 400K.	64

Tabla 14. Propiedades del agua a la temperatura de interpolación de 286.75 K.	65
Tabla 15. Resumen de todos los parámetros geométricos del serpentín	70
Tabla 16. Presiones normales de alta y de baja en la unidad ROBUR	97
Tabla 17. Componentes instalados en el sistema.	114
Tabla 18. Potencias realmente consumidas de la red por los componentes eléctricos del sistema.	115
Tabla 19. Especificaciones técnicas de la unidad por compresión de vapor marca YORK.	116
Tabla 20. Costos de energía eléctrica y de gas en Colombia.	117
Tabla 21. Costos específicos de consumo de energía por hora para las unidades ROBUR y YORK.	118

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. ENFRIAMIENTO POR ABSORCIÓN	136

RESUMEN

TÍTULO:

INSTALACIÓN DE UNA UNIDAD DE ABSORCIÓN ROBUR COMO UNA HERRAMIENTA PEDAGÓGICA EN LA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA DE LA UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER.*

AUTORES:

Juan Walberto Arteaga Crawford.

José Luis Negrete Olivera. **

PALABRAS CLAVES:

Absorción, refrigeración, ROBUR, multimedia.

DESCRIPCIÓN:

Este proyecto de grado marca el inicio del estudio, desde la práctica, de la refrigeración por absorción en la escuela de ingeniería mecánica de la Universidad Industrial de Santander pues se cuenta con una unidad enfriadora de agua marca ROBUR instalada en el laboratorio de Mecánica de Fluidos.

Se diseñó la unidad manejadora de aire, la cual es un intercambiador de calor donde el agua fría absorbe calor del aire, provocando que este se enfríe y condense gran parte de su humedad. El aire en estas condiciones es impulsado al recinto, mediante los ductos de suministro, generando las condiciones de confort. Para el monitoreo y control del sistema se instalaron termómetros y manómetros en la línea de agua. En la unidad enfriadora se instalaron tres manómetros para observar las presiones de alta, baja y de bomba.

Se hizo una comparación entre este sistema por absorción y el sistema análogo por compresión de vapor, desde el punto de vista del gasto energético y costos económicos.

* Trabajo de grado de grado

** Facultad de Ciencias Físico-Mecánicas, Escuela de Ingeniería Mecánica, Ing. Omar Gélvez.

Para un conocimiento más profundo de esta tecnología se diseñó una multimedia donde se explica con animaciones, gráficos e imágenes las bases teóricas, termodinámicas y técnicas, de la absorción.

SUMMARY

TITLE:

INSTALLACIÓN OF A ROBUR ABSORTION UNIT AS A TEACHING TOOL IN THE MECHANICAL ENGINNERING DEPARTMENT AT THE UNIVERSITY INDUSTRIAL DE SANTANDER *

AUTHORS:

Juan Walberto Arteaga Crawford.

José Luis Negrete Olivera. **

KEY WORDS:

Absorption, Refrigeration, ROBUR, Media toll.

DESCRIPTION:

This degree project is the beginning of cooling by absorption in the Mechanical Engineering department at the Universidad Industrial de Santander for this purpose a ROBUR cooling water unit was obtained and installed in the Fluid Mechanics Lab.

An air manager unit was designed, which is a heat exchanger where the heat fom air is become absorbed by de cold water, causing the air to become cold and a big part of its moisture to be condensed the air in these conditions is impelled into the vessel by the supply pipes, generating comfort conditions. For monitoring and controlling the system thermometers and pressure meters in the water line were installed in the cooling unit three pressure meters for watching the high, low, and pump pressure were installed.

A comparison between the absorption system and the vapor compression analogous system was made, taking into account the energetic consumption and the economics.

* Degree Work.

** Physical-Mechanical Sciences Faculty, Mechanical Engineering, Eng. Omar Gélvez.

For a deeper knowledge in this technology a media tool with animation, graphics, and images about absorption was designed.

INTRODUCCIÓN

La mayoría de las materias pertenecientes al plan de estudios de la carrera de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander tienen su componente práctico y las que no lo tienen son la base teórica necesaria para aquellas que si cuentan con él. A pesar de todo, todavía encontramos asignaturas sin prácticas de laboratorio y que le son necesarias. Sin embargo, se hacen esfuerzos, por parte de los profesores y estudiantes, en conseguir formas de llevar a la experiencia los conceptos que se emiten en clases.

Refrigeración y aire acondicionado es una materia electiva en el plan de estudios y se puede tomar como un ejemplo de la situación planteada. En ella se dan conceptos teóricos acerca de la refrigeración y el aire acondicionado, se hacen visitas técnicas donde el estudiante se acerca más a la realidad y hasta se construyen prototipos; pero no existe la posibilidad de medición y estudio de comportamientos de sistemas.

Este proyecto de grado da una aproximación más en el sentido del componente práctico de la materia, pues ofrece el estudio de una unidad de absorción de tipo industrial que ha sido instalada en el laboratorio de mecánica de fluidos, ubicado en el campus de la Escuela. Es así que los estudiantes podrán conocer más de fondo la tecnología por absorción aplicada a aires acondicionados, hacer mediciones de flujos, temperaturas y presiones, y, estudiar la secuencia de los componentes eléctricos que hacen parte de la unidad instalada.

Existe conciencia de que sólo la instalación no garantiza una real ayuda en aras del conocimiento de este sistema, es por eso que se ha diseñado una herramienta pedagógica tipo multimedia que cuenta con animaciones, explicaciones, fotos y diagramas dispuestos en forma amena para acercar aún más al estudiante a la comprensión de la absorción.

Finalmente se hizo un estudio económico comparativo entre un sistema de enfriamiento convencional por compresión de vapor y el de absorción instalado, para conocer cual ofrece más ventaja en términos de inversión.

1. ESTUDIO DE LA REFRIGERACIÓN POR ABSORCIÓN

1.1. JUSTIFICACIÓN

Existen tecnologías alternativas para producir aire acondicionado, dentro de las cuales están los sistemas de compresión de gas, termoeléctrico, magnético y de compresión de líquidos, conociéndose este último, como refrigeración por absorción.

Dada la marcada influencia de la tecnología por compresión de vapor, la mayoría de empresas no se han interesado por el sistema de absorción con la implicación de un alto desconocimiento del tema. Es así que las empresas de nuestro medio, que cuentan con unidades de este tipo, se enfrentan a la escasez de personal entrenado en estos sistemas, lo cual hace costoso el mantenimiento.

El no conocer estos sistemas de absorción tiene implicaciones tales como: la ineficiencia de la operación de los equipos, pues no se ha hecho un estudio de ingeniería que conlleve a un máximo aprovechamiento de ellos; los costos de mantenimiento se incrementan debido a la poca existencia de personal técnico calificado; y por último, se presentan altas inversiones en tiempo y dinero debido, muchas veces, a la importación de los repuestos.

El estudio del enfriamiento por absorción, aplicado a aires acondicionados y refrigeración, relacionado específicamente con su operación, funcionamiento y mantenimiento, sentará las bases teórico-prácticas que ayudarán al

desarrollo, comprensión y conocimiento de esta tecnología; así se conseguirá ampliar el campo para que futuros proyectos logren implementar estos sistemas, o rediseñar los componentes que presenten fallas muy frecuentes.

La apropiación de la tecnología de aire acondicionado por absorción, en la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander, traerá beneficios académicos a estudiantes de los niveles de pregrado, quienes tendrán la oportunidad de afianzar sus conocimientos teóricos, al trasladarlos a la práctica. Las ventajas podrán también ser económicas porque se podrá asesorar y capacitar en este campo a técnicos de las empresas que lo requieran.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivos generales.

- ❖ Introducir, para su mejor conocimiento, la tecnología de la absorción en aire acondicionado en la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander
- ❖ Dar bases teórico – prácticas para desarrollos futuros de proyectos de investigación o diseño en este campo.

1.2.2. Objetivos Específicos.

- ❖ Instalar y poner en funcionamiento una unidad de aire acondicionado por absorción ROBUR^z, para acondicionar el laboratorio de Mecánica de

^z Unidad de absorción a gas marca Robur modelo ACC60 donada por el ICP a la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander.

fluidos de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander.

❖ Hacer un seguimiento de la operación del sistema por absorción instalado con el fin de conocer parámetros de funcionamiento técnicos y económicos, como son:

- **Parámetros económicos**

- costos de operación
- costos de energía eléctrica
- costo de gas

- **Parámetros técnicos**

- Presiones
- Temperaturas
- Flujos

- **Parámetros de operación**

- Control
- Componentes
- Comportamiento bajo condiciones de carga diversa.

❖ Desarrollar una herramienta pedagógica de tipo multimedia para esta tecnología.

2. UNIDAD ENFRIADORA DE AGUA POR ABSORCIÓN MARCA ROBUR.

2.1. PARÁMETROS TÉCNICOS DEL SISTEMA ROBUR

El enfriador de agua por absorción marca ROBUR modelo ACC 60-00 destinado a producir refrigeración es de calentamiento directo a gas natural, enfriado por aire, es un sistema hermético, la única parte móvil es la bomba de solución de desplazamiento positivo tipo diafragma y está diseñado para instalarse al aire libre. La energía requerida para su funcionamiento es:

❖ **Calor:** Producido por la llama generada por la combustión del gas natural.

❖ **Energía eléctrica:** De cantidad reducida y necesaria para el funcionamiento de controles y motores que mueven dos bombas y un ventilador.

La unidad sellada del equipo de refrigeración contiene una solución de amoníaco, que es el refrigerante, y agua, que es el absorbente.

La tabla 1 muestra las especificaciones técnicas de la unidad dadas por el fabricante.

Tabla 1. Especificaciones técnicas de la unidad enfriadora de agua por absorción marca ROBUR modelo ACC 60-00.

ESPECIFICACIONES	MODELO ACC 60-00
DATOS DE FUNCIONAMIENTO	
CONSUMO DE GAS	$3.4 \frac{Nm^3}{h}$
CAPACIDAD	$15000 \frac{Kcal}{h}$
DIMENSIONES GENERALES	
ANCHO	850 <i>mm</i>
LARGO	1235 <i>mm</i>
ALTO	1075 <i>mm</i>
CONEXIÓN ENTRADA DE AGUA	1"
CONEXIÓN SALIDA DE AGUA	1"
CONEXIÓN DE GAS	$\frac{1}{2}$ "
PESO	350 <i>kg</i>
DATOS ELÉCTRICOS	
TENSIÓN	220 <i>V</i>
TENSIÓN EN EL CONTROL	24 <i>V</i>
POTENCIA MOTOR VENTILADOR	0.5 <i>HP</i>

Fuente: Manual de aplicación Servel por Robur.

La capacidad del enfriador de agua varía con la temperatura del aire ambiente y la temperatura de salida del agua fría de acuerdo a la tabla 2, que es una tabla de capacidad suministrada por el fabricante.

Tabla 2. Capacidad de la unidad enfriadora de agua por absorción marca ROBUR modelo ACC 60 -00 en función de la temperatura de salida del agua y de la temperatura de entrada del aire al condensador.

CAPACIDAD $\left[\frac{kcal}{h} \right]$				
Temperatura de Salida del agua [°C]	Temperatura de entrada del aire al condensador [°C]			
	32.2	35	37.8	40.6
10	15590	15350	14750	13750
8.6	15420	15180	14590	13600
7.2	15360	15120	14210	12850
5.8	15300	15010	13890	12100
4.4	15120	14710	12850	9830

Fuente: Manual de aplicación Servel por Robur.

Las dimensiones de la unidad enfriadora se muestran en sus vistas lateral y frontal en las figuras 1 y 2.

El panel de servicios es la zona de la unidad donde se ubican las entradas y salidas del agua, la entrada del gas y electricidad, y la ranura para la manguera de nivel de agua.

En la figura 3 se muestran los detalles y dimensiones genéricas del panel de servicios.

En la tabla 3 se especifican los valores de las dimensiones.

Figura 1. Vista lateral de la unidad enfriadora ROBUR modelo ACC 60 - 00.

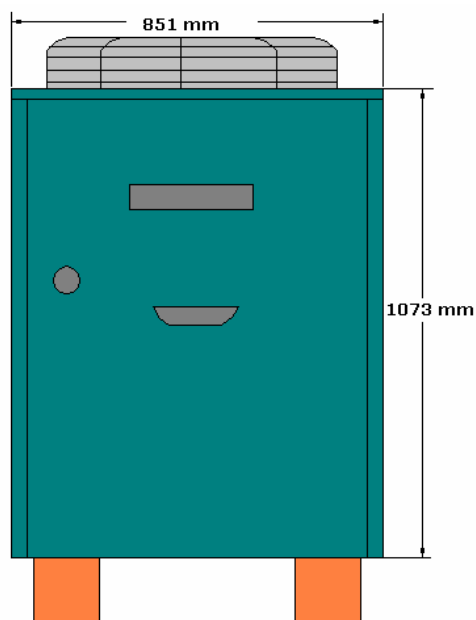


Figura 2. Vista frontal de la unidad enfriadora ROBUR modelo ACC 60- 00.

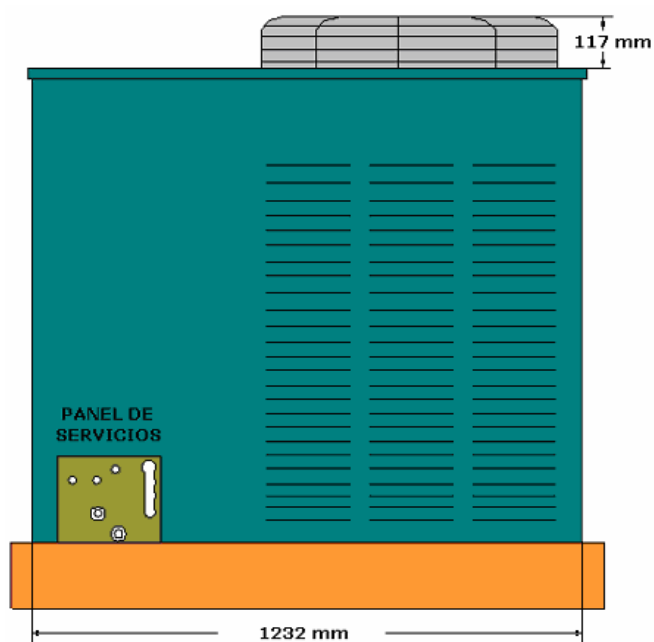


Figura 3. Panel de servicios de la unidad enfriadora de agua ROBUR modelo ACC 60 - 00.

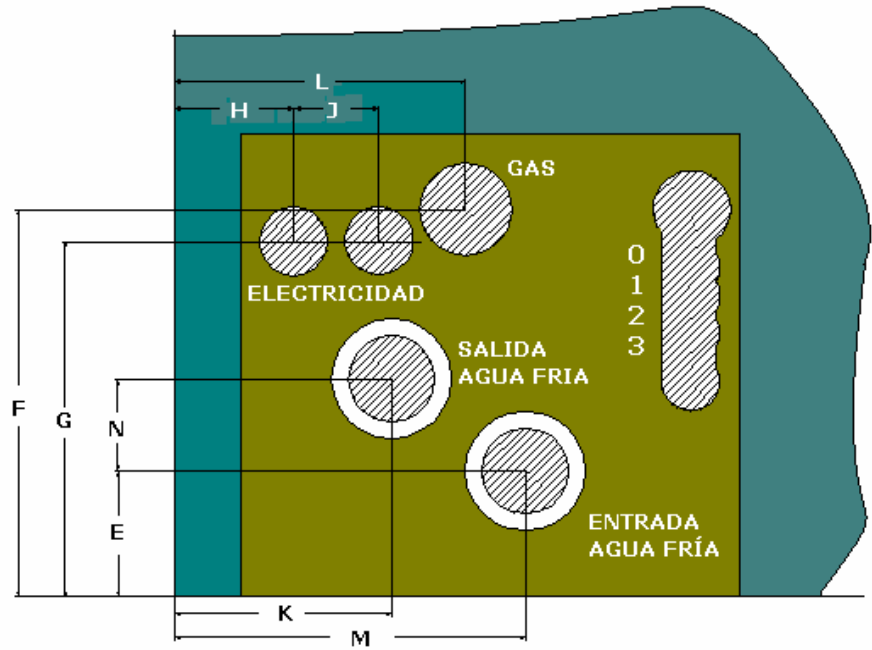


Tabla 3. Dimensiones del panel de servicios de la unidad enfriadora ROBUR modelo ACC 60 - 00.

LETRA	MEDIDA [mm]
M	189
K	117
E	68
N	51
G	192
F	211
H	64
J	46
L	157

Fuente: Manual de aplicación Servel por Robur.

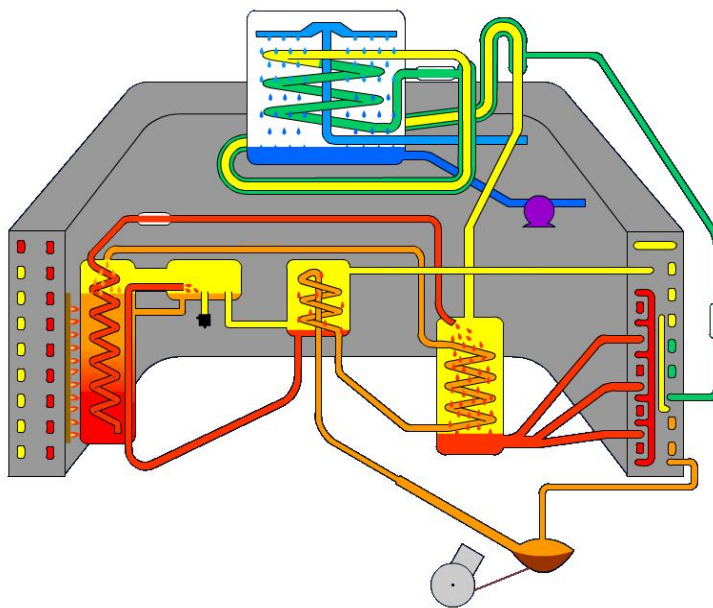
2.1.1 Ciclo de operación. El conocimiento general del funcionamiento del equipo facilita el diagnóstico de sus problemas y la solución de los mismos.

La carga de la unidad es de aproximadamente 2 partes de agua por 1 parte de amoníaco. Es un sistema de dos presiones, alta y baja.

Las presiones de operación están principalmente determinadas por la temperatura del aire ambiente que circula por la serpentina del condensador-absorbedor. La separación de las presiones es mantenida durante la operación por restrictores ubicados en el circuito de refrigerante y en la línea de solución débil, y por una bomba de solución en la línea de solución fuerte.

En la figura 4 se muestra un esquema de la unidad enfriadora de agua ROBUR, en el cual los colores se indican en la tabla 4.

Figura 4. Esquema básico de la unidad enfriadora de agua ROBUR.



Fuente: Manual de aplicación Servel por Robur

Tabla 4. Convención de colores para el esquema de una unidad enfriadora absorción ROBUR.

Color	Tipo de solución	Concentración
Naranja	Solución fuerte	Rica en amoníaco
Rojo	Solución débil	Pobre en amoníaco
Amarillo	Refrigerante vapor	Amoníaco
Verde	Refrigerante líquido	Amoníaco
Azul	Agua fría	Carga térmica

Manual de aplicación Servel por Robur.

Cuando se pone en marcha el equipo, el calor de la llama es aplicado al generador, haciendo hervir la solución contenida en el mismo. Debido a que el punto de ebullición del amoníaco es menor que el del agua, se producen vapores de amoníaco con bajo porcentaje de agua que ascienden a la parte superior del generador, quedando solución pobre que tiende a descender. La figura 5 muestra el generador de la unidad enfriadora ROBUR

Figura 5. Generador de la unidad enfriadora ROBUR



Cuando se produce esta acción de ebullición la presión impulsa esta solución débil a través de un restrictor hacia el absorbedor.

Sigamos ahora el camino del vapor refrigerante. Este deja el generador y entra a la cámara de nivelación, donde reduce su velocidad ocasionando la separación de gotas arrastradas y pasa al rectificador. Una ilustración de la cámara de nivelación se muestra en la figura 6.

Figura 6. Cámara niveladora de la unidad ROBUR.



El rectificador es simplemente un intercambiador de calor. Dentro del mismo hay una serpentina a través de la cual la solución fuerte fría fluye hacia el generador. Cuando el vapor caliente hace contacto con la serpentina del rectificador, se condensa el agua contenida conjuntamente con una pequeña cantidad de amoníaco. El vapor de amoníaco prácticamente seco continua su camino hacia el condensador. El líquido condensado vuelve al generador por efecto de termosifón.

El vapor refrigerante deja el rectificador a alta presión y a alta temperatura y entra en la serpentina del condensador donde se enfría y condensa. El

condensador es enfriado por aire. La figura 7 muestra el rectificador de la unidad ROBUR.

Figura 7. Rectificador de la unidad ROBUR



El líquido refrigerante sale del condensador y pasa por el primer restrictor ubicado antes del subenfriador de líquido.

El líquido refrigerante circula por la camisa externa del intercambiador y es enfriado por el vapor frío que circula en contracorriente por la parte interna.

El líquido refrigerante entra al evaporador a través de un segundo restrictor, donde se expande a la presión de baja.

La serpentina del evaporador esta rociada por el agua que retorna del sistema de aire acondicionado. Esta evapora el refrigerante a baja temperatura entregando el calor de la instalación al equipo. El agua enfriada cae al fondo del tanque desde donde es bombeada nuevamente a la instalación.

El refrigerante evaporado en el evaporador pasa por el subenfriador de líquido y entra en el absorbedor enfriado por la solución fuerte fría que circula dentro de una serpentina. La solución débil proveniente del generador es rociada sobre esta serpentina donde se enfría para poder mezclarse con el vapor de amoníaco, a la presión correspondiente al absorbedor (Baja). La serpentina de intercambio de calor entre el amoníaco y el agua y el absorbedor enfriado por solución se muestran en la figura 8 y 9, respectivamente.

Figura 8. Serpentina del evaporador de la unidad ROBUR.



Figura 9. Absorbedor enfriado por solución de la unidad ROBUR.



La absorción de los vapores de amoníaco por parte de la solución débil se realiza dentro de la serpentina del absorbedor, la solución es enfriada por el aire que circula a través de la serpentina. Esta absorción se realiza a presión constante, hasta que la solución, al enriquecerse, alcanza el equilibrio con la concentración correspondiente a la temperatura del absorbedor y a la presión de baja.

Esta solución rica es subenfriada en la sección externa del absorbedor en contacto con el aire mas frío, y es impulsada por la bomba de solución al generador.

La bomba de solución es del tipo de desplazamiento positivo a diafragma de teflón accionado mediante pulsaciones hidráulicas producidas por una bomba hidráulica. La capacidad para pulsar el líquido hidráulico va de 0 a 400 lb/pulg².

La solución fuerte que sale de la bomba entra en la serpentina del rectificador donde se calienta al enfriar los vapores calientes que salen del generador. Entra luego a la serpentina del absorbedor enfriado por solución donde eleva su temperatura al enfriar la lluvia de solución débil.

La solución rica precalentada retorna al generador, completando el ciclo de los dos circuitos, el de solución y el de refrigerante.

Para resumir el ciclo de operación destacaremos lo siguiente:

- ❖ El sistema es de dos presiones.

- ❖ La alta está determinada principalmente por la temperatura del aire ambiente. Oscila entre 200 y 300 lb/pulg² presiones que corresponden a temperaturas de condensación de 38 y 54°C, respectivamente.
- ❖ La baja varía entre 35 y 60 lb/pulg² , presiones que corresponden a temperaturas de evaporación de -5 y 5°C, respectivamente. Varía según la temperatura del aire y la carga térmica.
- ❖ La separación de las presiones es mantenida durante la operación del equipo por medio de restrictores en el circuito de refrigeración y en la línea de la solución débil, y por las válvulas de la bomba de solución en la línea de la solución concentrada.

2.2. PUESTA A PUNTO DE LA UNIDAD

2.2.1 Instrucciones de puesta en marcha inicial. Para tal efecto se sugiere utilizar las siguientes Herramientas:

- Un nivel.
- 7 termómetros -10/50°C.
- Un manómetro de agua tipo “U” para medir presión del gas.
- Herramientas de mano comunes.

Antes de poner en marcha cualquier unidad, deben seguirse los siguientes pasos:

Revisar toda la instalación asegurándose que se han respetado las recomendaciones de este manual y del manual de aplicación.

1. Quitar la tapa de la bomba hidráulica y verificar el nivel de líquido, como se muestra en la figura 10. El nivel correcto es 30mm debajo del borde superior de la tapa abierta.

Figura 10. Verificación del nivel de líquido de la bomba hidráulica.



2. Verificar la tensión y alineación de la correa.
3. Verificar el nivel de la unidad.
4. Realizar los ajustes en el siguiente:
 - a) Llenar con agua el circuito de agua fría. Controlar pérdidas
 - b) Verificar el giro correcto de los motores.
 - c) Verificar el caudal de agua.
 - d) Verificar la altura del ventilador.
 - e) Regular el consumo de gas.
 - f) Verificar el caudal de aire del ventilador.

❖ **Nivelación.** La unidad debe estar perfectamente nivelada, de frente a fondo y de un lateral al otro. Si se usan suplementos de nivelación es necesario apoyar también el centro del equipo.

❖ **Llenado y prueba del circuito de agua.**

1. La manguera del control de nivel se encuentra dentro del gabinete, detrás del panel de servicio.

NOTA: tener cuidado de no retorcer esta manguera.

2. Llenar el tanque enfriador como se muestra en la figura 11.

Figura 11. Llenado del tanque de agua fría



3. Ajustar el caudal de agua de fría por medio de la válvula reguladora de caudal y el rotámetro, como se muestra en la figura 12. El caudal nominal de agua fría es de 12 gpm y el caudal máximo es de 16 gpm.
4. Reponer el tapón de la manguera de control de nivel
5. Poner en marcha el enfriador. El arranque demorara 45 segundos aproximadamente por el relay de tiempo.
6. El sistema de agua fría debe estar libre de perdidas. Revisar todas las cañerías antes de continuar el procedimiento,

NOTA: SI aparece suciedad en el agua fría, se deberá vaciar el sistema y llenarlo nuevamente.

Figura 12 Ajuste del caudal de agua fría.



7. Arrancar eléctricamente la unidad para establecer el nivel correcto de agua fría en el tanque. Para sacar el exceso de agua del tanque enfriador, se coloca la manguera de control en posición horizontal a través de la ranura "O" como se muestra en la figura 13.

Figura 13 Control del nivel de agua del tanque.



❖ **Ajuste del suministro de gas.** Antes de realizar cualquier operación de prueba se deberá controlar el suministro de gas natural y ajustarlo si fuera necesario.

Las presiones del suministro de gas deben ser:

Máximo 360mm de c.a.

Mínimo 125mm de c.a.

Las presiones en el múltiple del quemador deben ser las que se indican en la tabla 5.

1. Girar la perilla de la válvula de gas a la posición "OFF".
2. Quitar el tapón de 1/8" del múltiple del quemador e instalar un manómetro de agua tipo "U".
3. Conectar el equipo eléctricamente y ponerlo en marcha en refrigeración mediante su sistema de comando.
4. Al arrancar la unidad se escucha durante 10-11 segundos el chispeo de la bujía de encendido. Después de este lapso el control de encendido queda desconectado.
5. Para conectar el encendido nuevamente es necesario desconectar el circuito de comando del equipo durante un minuto.
6. Estando el equipo desconectado por su circuito de comando, girar la perilla de la válvula de gas a la posición "ON". El manómetro instalado en el múltiple no debe acusar presión.
7. Poner en marcha el equipo de refrigeración, mediante su circuito de comando.
8. En instalaciones que se ponen en marcha por primera vez, el quemador puede no encender debido a la falta de purga en la línea de gas. En este caso es conveniente purgar el aire de la cañería y volver a conectar el sistema de encendido (punto 5). Si el suministro de gas es normal, el quemador debe encender en 4-5 segundos. Para regular la presión del gas, es necesario quitar el tapón del regulador de presión de la válvula de

gas, girando el tornillo de regulación en sentido horario la presión aumenta, y en sentido antihorario disminuye.

Tabla 5. Presiones en el múltiple del quemador de una unidad enfriadora ROBUR.

Gas natural	Densidad 0.6	Valor calorífico 9300Kcal/Nm ³					
Gas licuado	Densidad 1.52	Valor calorífico 22400Kcal/Nm ³					
Modelo	Consumo Kcal/h	Gas natural			Gas licuado		
		Presión mm c.a	Orificio		Presión mm c.a	Orificio	
			Nº	φmm		Nº	φmm
AC 36-00	19750	80	831	3.0	254	849	1.9
ACD 36-00	19750	80	832	2.9	254	850	1.75
ACC 48-00	25000	76	841	2.4	254	853	1.3
ACC 60-00	31250	78	836	2.75	254	852	1.6

Fuente: Manual de aplicación Servel por Robur.

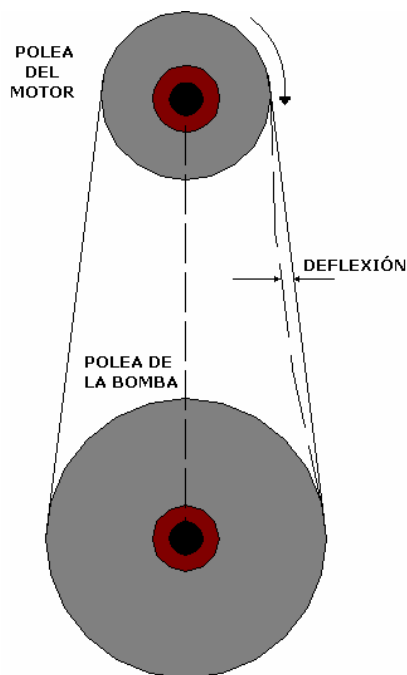
9. Detener el equipo mediante su sistema de comando.
10. Quitar el manómetro y colocar el tapón del múltiple.
11. Poner el equipo en marcha.
12. Controlar las juntas del sistema de gas con jabón para detectar eventuales fugas de gas.

❖ **Tensión y alineación de la correa.** La tensión y alineación de la correa de la bomba deben ser verificadas al realizar la puesta en marcha inicial y periódicamente durante la temporada de refrigeración.

Después de desmontar el cubre correas se controla la alineación de la correa colocando una regla sobre las caras de las poleas del motor y de la bomba hidráulica.

En la figura 14 se muestra la deflexión de la correa. La tensión de la correa es correcta cuando su deflexión, medida entre la polea del motor y la de la bomba hidráulica es de 3 a 7mm.

Figura 14. Deflexión de 3 a 7 mm recomendada para la correa de transmisión entre las poleas del motor y bomba.



❖ **Bomba hidráulica.** En el equipo ACC 60 00 se deben tener 104 pulsaciones por minuto. En cada pulsación la presión de descarga de la bomba fluctúa entre 0 y 400lb/pulg² aproximadamente. Esta pulsación es transmitida, a través de una línea hidráulica a la cara inferior del diafragma de teflón de la bomba de solución.

El nivel de líquido hidráulico deberá mantenerse aproximadamente 30mm debajo del borde superior de la tapa de la bomba abierta. Este nivel deberá controlarse cuando el fluido este caliente y al bomba detenida.

El circuito hidráulico utiliza fluido hidráulico ARKLA N° Z 2169. Como alternativa se pueden utilizar los siguientes fluidos, General motors G.M. N° 1050017, texaco 1833 P.S. fluido 4634.

❖ **Ventilador del condensador.** Para obtener el flujo apropiado de aire y el mínimo nivel de ruido es importante ubicar correctamente las paletas del ventilador con relación al panel superior de la unidad. Cuando el motor o el ventilador son desmontados por alguna razón, asegurarse de que sean colocados en su posición correcta.

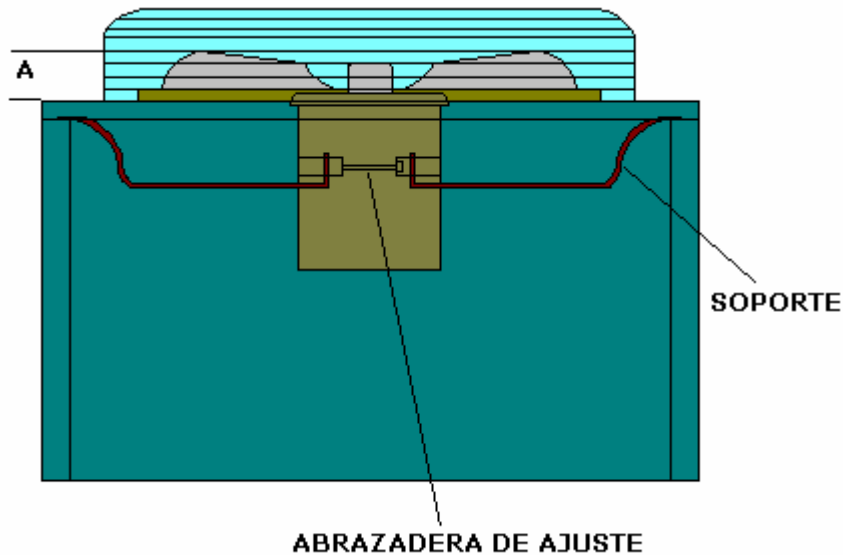
El ventilador debe ser instalado con el borde superior de las paletas por encima de la tapa de la unidad, tal como se indica en la figura 15.

El motor del ventilador es enfriado por aire y está provisto de lubricación permanente. No requiere lubricación.

El motor de la unidad es del tipo capacitor permanente.

Nota: Las paletas deben girar en sentido horario mirando la unidad desde arriba.

Figura 15. Altura recomendada del ventilador del condensador en la unidad enfriadora ROBUR modelo ACC 60 - 00.



A = 57mm (unidades de 3 toneladas)

A = 76mm (unidades de 4 y 5 toneladas)

2.2.2 Verificación del sistema de encendido. Si el sistema de encendido a chispa se desconecta y no vuelve a operar, o conecta y desconecta irregularmente, seguir en orden exacto el siguiente procedimiento:

1 Inspección preliminar

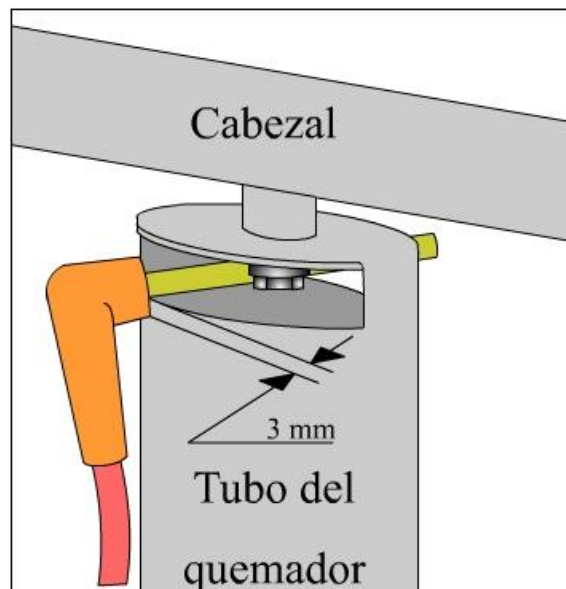
1. Cortar la corriente eléctrica del equipo. Desmontar el panel frontal y la tapa del tablero. Cerrar el gas.
2. Controlar que el transformador de 220V este instalado en el tablero.
3. El sistema de comando de la unidad debe estar eléctricamente separado de los otros sistemas de 24V de la instalación.
4. Controlar las conexiones y cableados.

2 Verificación preliminar

❖ Primer procedimiento

1. Controlar el cable de encendido, cambiarlo si fuera necesario.
2. Desconectar el cable de encendido de la bujía
3. Colocar un palito de madera de $\phi 6 \times 75 \text{ mm}$ de largo en el terminal del cable de encendido.
4. Poner el palito en la abertura del aire primario en uno de los tubos del quemado, como se muestra en la figura 16. Ubicarlo de tal manera que haya una distancia de 3mm entre el terminal metálico del cable de ignición y el tubo del quemador. Es importante asegurar un buen contacto entre el cable de ignición y el control del sistema, que el cable de encendido no toque ninguna parte metálica del equipo y que la distancia entre el palito de madera y el cable del sensor de llama sea de 25mm como mínimo.

Figura 16. Prueba del sistema de encendido



❖ **Segundo procedimiento**

1. Girar la perilla de la válvula de gas a la posición “OFF”.
2. Conectar una lámpara de prueba de 24V a los terminales de la válvula de gas.

❖ **Tercer procedimiento**

1. Desconectar el alambre sensor del electrodo sensor.
2. Conectar el voltímetro escala 0-300V da CA entre el cable del sensor y el quemador.

Nota: Durante los pasos cuatro y cinco no se debe tocar el cableado ni el quemador.

3. Desconectar el alambre sensor del electrodo sensor
4. Conectar la corriente eléctrica del equipo.
5. Cuando el equipo arranca:
 - 5.1 Se deberá escuchar y observar una pulsación uniforme de la chispa entre el cable de encendido y los tubos del quemador. Puede ser difícil la observación de la chispa si la luz del sol es muy intensa.
 - 5.2 La lámpara de prueba deberá encenderse.
 - 5.3 El voltímetro marcará valores entre 110 y 150V con M-H. Con Fenwal los valores son $125 \pm 10V$, luego sube a $150 \pm 10V$ y finalmente baja a $125 \pm 10V$.
 - 5.4 El control del sistema deberá desengancharse después de 9-11 segundos.
 - 5.5 Cuando el control del sistema se desengancha, la aguja del voltímetro descenderá a 0V en el sistema Fenwal. En el sistema M-H continuara indicando 110 a 130V.

5.6 Si los cinco pasos se cumplen el sistema funciona correctamente. Continuar con los procedimientos IV y V. Si alguno o la totalidad de los cinco pasos no se cumplen se debe referir a la tabla 6.

Tabla 6. Verificación del sistema de encendido

COMPORTAMIENTO	LÁMPARA DE 24V ENCENDIDA	TENSIÓN	CORTE	ÍTEM
Pulsación continua	Si	Normal	9-11 s	IV
No hay chispa	No	0		6
No hay chispa o Es irregular	Si	Normal	9-11 s	7
Pulsación continua	No	Normal	9-11 s	8
	Si	0-Baja		9
	No	Normal	Menos de 9 o más de 11 s	10

Fuente: Manual de aplicación Servel por Robur.

6. Si no ocurre ninguno de los cinco pasos, controlar la tensión entre el terminal "O" y el terminal del termostato de agua fría, al que está conectado el cable rojo (Nº 33), si la lectura es 0V, continuar con el procedimiento III para verificar los controles de seguridad. Si la lectura es de 24V, desconectar la corriente eléctrica. Controlar las conexiones de los terminales T1 y T2 con M-H o las de la línea de tierra con Fenwal. Controlar la continuidad y conexiones del cable a tierra. (Nº 39). Repetir los pasos 4 y 5. Si ninguno de
7. Si no se produce la chispa o esta es irregular, cortar la corriente eléctrica y comprobar el estado del cable de encendido. Con el cable de encendido en

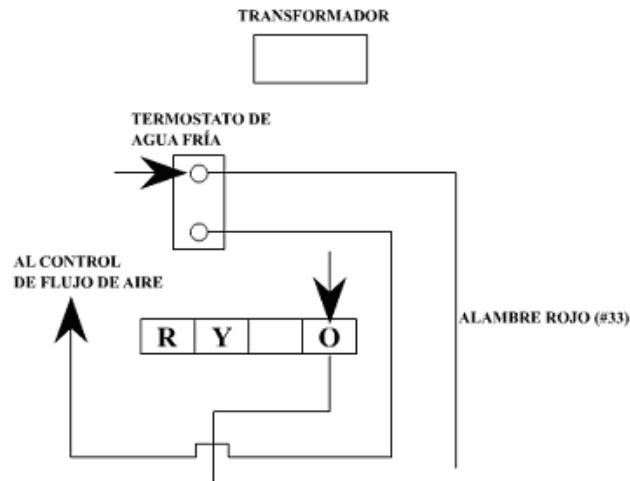
buen estado y correctamente conectado al control del sistema, repetir los pasos numero 1 4 y 5. Si no se produce la chispa, o esta sigue siendo irregular, remplazar el control del sistema.

8. Si la luz de prueba no se enciende, desconectar la corriente eléctrica. Comprobar el estado de los cables y verificar las conexiones. Repetir los pasos N° 2, 4 y 5. Si la luz no se enciende, cambiar el control del sistema.
9. Cuando no hay tensión o la tensión es baja desconectar la corriente eléctrica. Controlar el estado del cable del sensor y del cable a tierra N° 39. Repetir los pasos N° 3, 4 y 5. Si no hay tensión Instalar un cable directo a tierra desde el terminal de tierra del control del sistema.
10. Si el control del sistema se desengancha en menos de 9 segundos o mas de 11 segundos, desconectar la corriente eléctrica, esperar un minuto y repetir los pasos N° 4 y 5. Si el tiempo de desenganche sigue siendo incorrecto, cambiar el control del sistema.

3 Verificación de los controles de seguridad

1. Controlar la tensión entre el borne “O” y terminal del cable N° 33 del termostato de agua fría. (figura 17)
2. Si la lectura es de 24V, controlar la continuidad de los cables y sus conexiones.
3. Si la lectura es 0V, conectar el voltímetro al otro borne del termostato. (figura 17)
4. Si la lectura es 24V, remplazar el termostato de agua fría.
5. Si la lectura es 0V, indica que el control de flujo de aire está defectuoso o no cierra por falta de circulación de aire.

Figura 17 Revisión del interruptor de seguridad



4 Procedimiento de verificación del electrodo

1. Cortar la corriente eléctrica del equipo (220V).
2. Desmontar el quemador.
3. Controlar que los orificios no estén sucios ni tapados, limpiarlos si fuese necesario.
4. Controlar la limpieza del quemador y de la cámara de combustión.
5. Ubicar un tubo del quemador en la última conexión del múltiple Limpiar el electrodo de la bujía y la superficie del quemador debajo del electrodo.
6. Asegurarse que el soporte de la bujía este firmemente fijado al quemador.
7. Asegurarse que el electrodo de la bujía este firmemente fijado al quemador.
8. Controlar la ubicación y la luz del electrodo.
9. Conectar la lámpara de prueba de 24V a la válvula de gas.
10. Instalar el cable de ignición y el alambre sensor, y verificar las conexiones.

Asegurarse que el cable de ignición no toque partes metálicas.

11. Poner el voltímetro en su escala 0-300VCA. Conectar uno de sus terminales al sensor y el otro al quemador.
12. El gas debe estar cortado.
13. Energizar eléctricamente la unidad.
14. Cuando el equipo arranca, durante los primeros 11 segundos, deberá ocurrir lo siguiente:
 - a) La lámpara de prueba debe encenderse.
 - b) El voltímetro debe registrar 110-130V con control M-H y $125\pm 10V/150\pm 10V$ con control Fenwal.
 - c) Una chispa fuerte continuamente pulsante debe aparecer entre el electrodo y el tubo del quemador.
15. En 9-11 segundos el control debe desengancharse. Finaliza la chispa y la lámpara de prueba se apaga. El voltímetro indica 0V con control Fenwall y 110-130V con el control M-H.
16. Desconectar la corriente eléctrica de la unidad
17. Si durante el paso N° 15 se observa que las chispas bailan sobre el quemador, reposicionar el electrodo manteniendo la luz correcta y repetir los pasos 14 y 17.

5 Verificación final

1. Con la corriente y el gas cortado, instalar el quemador
2. Conectar un manómetro de agua tipo “U” al manifold de gas.
3. Dejar conectada la lámpara de prueba de 24V.
4. Conectar un micro amperímetro con escala 0-50 de la siguiente forma
 - a) El conductor negro conectado al sensor.
 - b) El conductor colorado al cable del sensor proveniente del CONTROL DEL SISTEMA.
5. Colocar la perilla del gas en la posición “ON”

6. Energizar eléctricamente la unidad.
7. Cuando la unidad arranca inmediatamente:
 - a) La lámpara de prueba se debe encender.
 - b) Se debe escuchar la chispa de la bujía
 - c) El manómetro "U" debe indicar la presión correcta de gas.
8. A los tres o cuatro segundos:
 - a) El quemador debe encender.
 - b) El micro amperímetro debe indicar 4 microamperios como mínimo y continuar subiendo hasta un mínimo de 7 microamperios.
 - c) El chispeo debe terminar. Con el control Fenwall podría producirse ocasionalmente.
9. Controlar que la presión del gas sea correcta.
10. Cerrar la válvula de gas (posición "OFF")
 - a) la presión del gas debe bajar a cero
 - b) la lámpara de prueba debe continuar encendida.
 - c) El micro amperímetro debe volver a cero.
 - d) Se debe escuchar el chispeo de la bujía de encendido.
11. Después de de cortar el CONTROL DEL SISTEMA, abrir la válvula de gas. El gas no debe pasar. Si el manómetro indica presión se debe cambiar la válvula de gas.
12. Desconectar la corriente eléctrica
13. Colocar la tapa del tablero (sacar puente R-Y).
14. Sacar la lámpara de prueba, el manómetro y el micro amperímetro
15. Conectar nuevamente la corriente eléctrica.
16. Ubicar el cable del sensor de tal manera que la distancia mínima entre este y las partes metálicas sean por lo menos de 25mm.
17. Colocar el panel frontal
18. El equipo esta listo para funcionar

3. DESCRIPCIÓN DE LA INSTALACIÓN

3.1. UBICACIÓN GEOGRÁFICA Y DIMENSIONES DEL LABORATORIO.

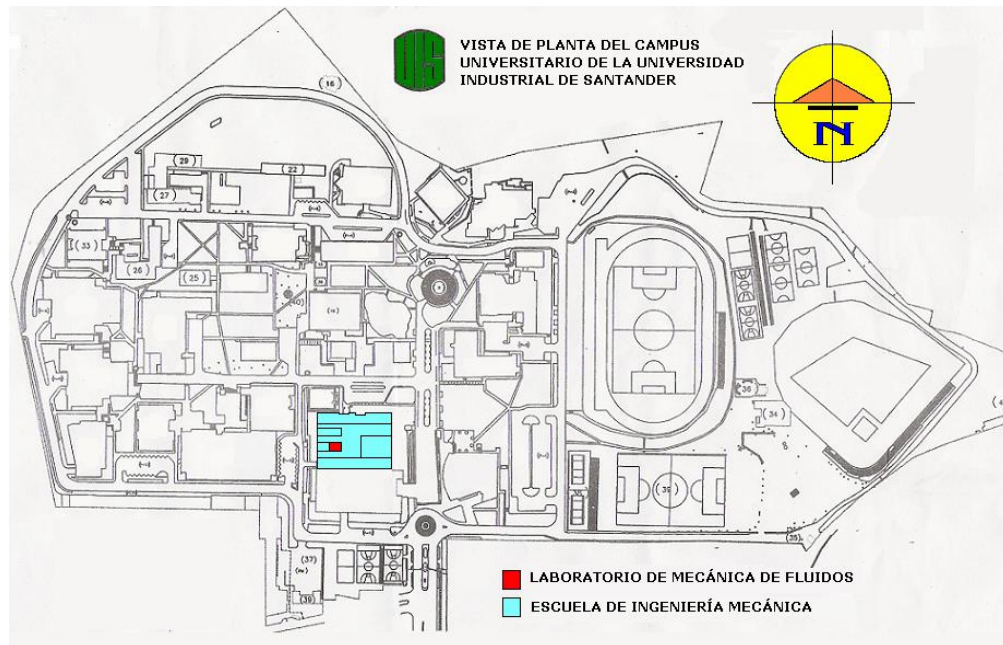
El laboratorio de mecánica de fluidos se encuentra ubicado en la escuela de Ingeniería Mecánica en el campus universitario de la sede principal de la Universidad Industrial de Santander.

Está orientado de tal manera que su entrada da al oriente, dos paredes laterales: una al norte y otra al sur y su pared posterior colinda con el laboratorio de CNC.

La figura 18 muestra la vista de planta de la Universidad Industrial de Santander en su sede principal y en ella la ubicación de dicho laboratorio.

Las medidas del laboratorio se muestran en las figuras 19, 20 y 21 que son sus vistas frontal, lateral y de planta, respectivamente.

Figura 18. Ubicación del laboratorio de mecánica de fluidos en el campus universitario de la sede principal de la Universidad Industrial de Santander.



Fuente: Catálogo de pregrado UIS

Figura 19. Vista frontal del laboratorio de mecánica de fluidos de la escuela de ingeniería mecánica de la UIS.

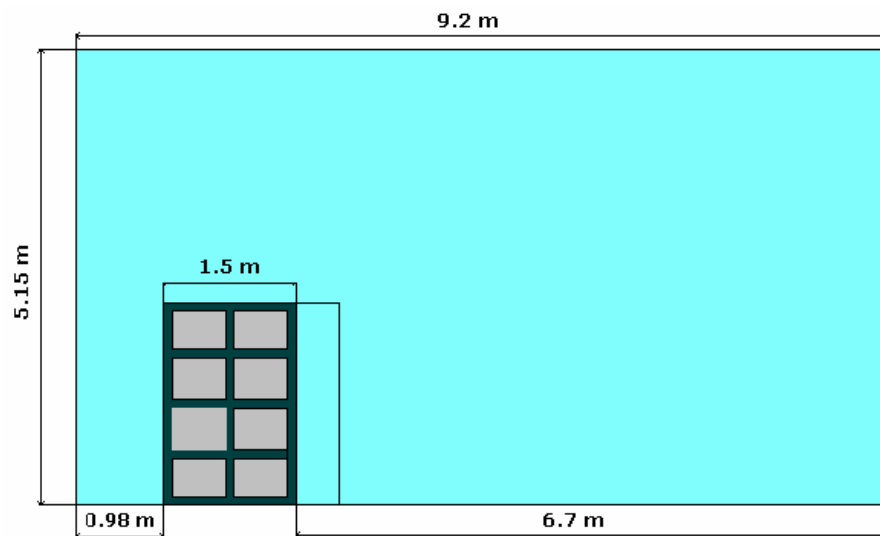


Figura 20. Vista lateral del laboratorio de mecánica de fluidos de la escuela de ingeniería mecánica de la UIS.

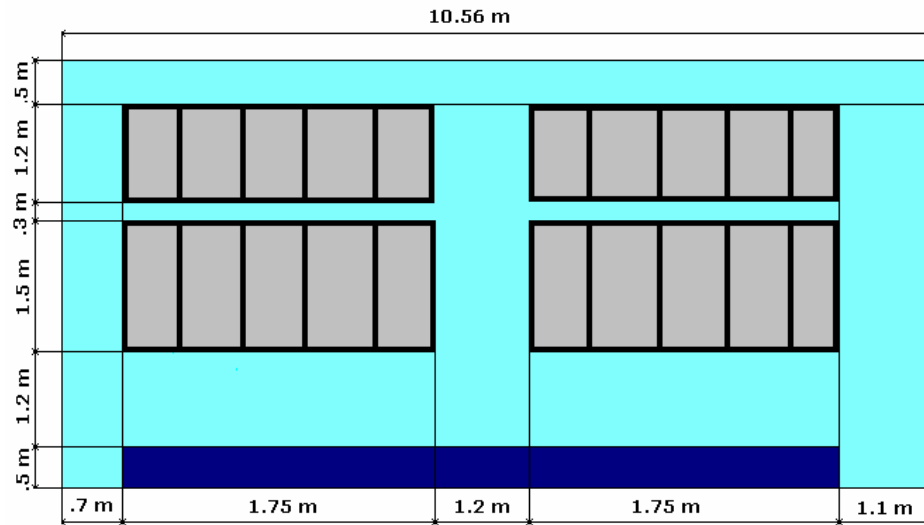
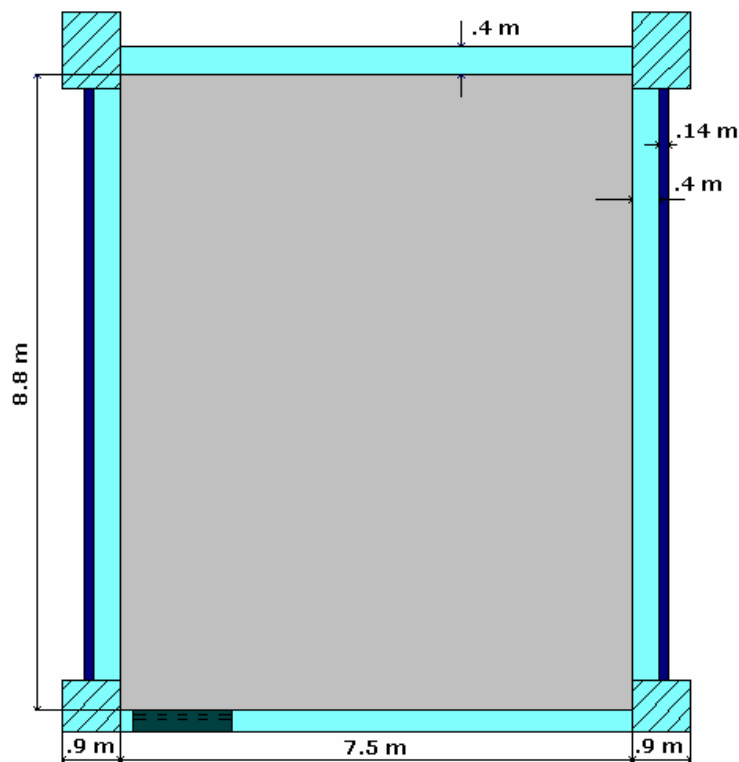


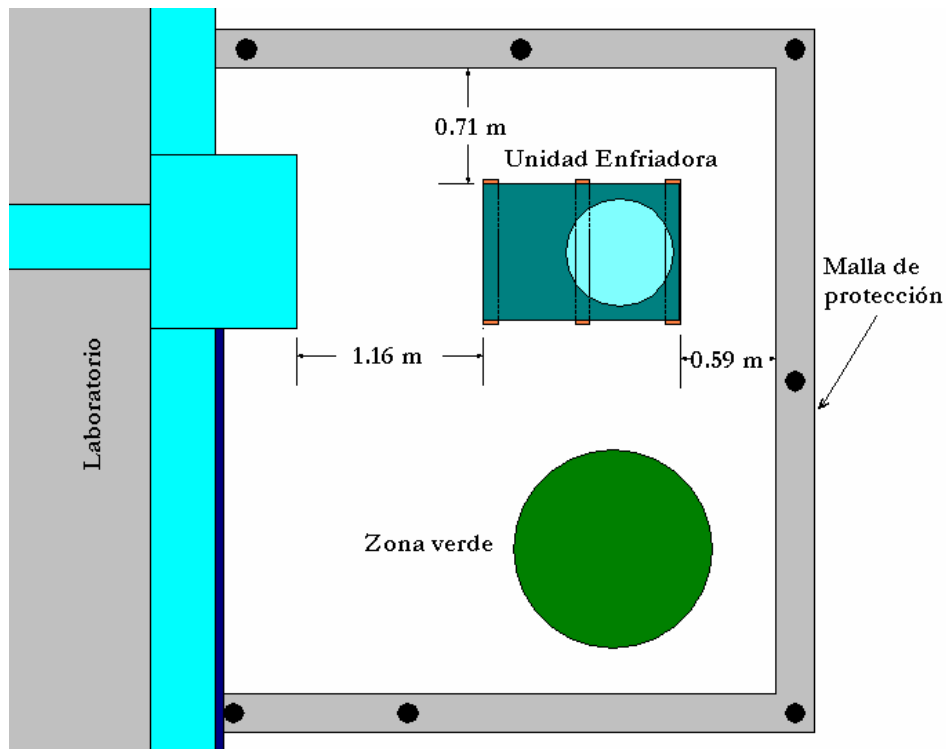
Figura 21. Vista de planta del laboratorio de mecánica de fluidos de la escuela de ingeniería mecánica de la UIS.



3.2. ELEMENTOS DEL SISTEMA DE ENFRIAMIENTO INSTALADO

3.2.1 Unidad enfriadora. La unidad enfriadora de agua ROBUR se encuentra instalada en el lado norte del laboratorio de tal manera que su panel de control está orientado hacia el oriente. Las distancias, respecto al laboratorio, se muestran en la figura 22. El agua, impulsada por la bomba, recorre un circuito cerrado pasando por el rotámetro y por la unidad manejadora de aire para luego retornar a la unidad ROBUR.

Figura 22. Ubicación de la unidad enfriadora Robur respecto al laboratorio de mecánica de fluidos.



3.2.2 Bomba de agua fría. La bomba, que se muestra en la figura 23, es marca BARNES tipo caracol modelo c-210 cuenta con un motor de 1 HP y

3450 rpm. Toma el agua enfriada por la unidad y la impulsa hacia la unidad manejadora de aire pasando por el rotámetro. El agua menos fría retorna a la unidad enfriadora donde se cierra el circuito.

Figura 23. Bomba BARNES tipo caracol modelo c 210.



Fuente: www.barnes.com.co

❖ **Pérdidas en el sistema.** El sistema cuenta con los siguientes accesorios y elementos:

7 codos de $\frac{3}{4}$ " , 1 rotámetro, 4 universales de $\frac{3}{4}$ " , 4 uniones de $\frac{3}{4}$ " , 1 válvula bola de $\frac{3}{4}$ " , 5 té ciegas de $\frac{3}{4}$ " , 2 uniones roscadas de $\frac{3}{4}$ " , 1 reducción de 1 a $\frac{3}{4}$ " y el serpentín. La figura 24 muestra la isometría de la tubería de suministro de agua a la serpentina, con sus dimensiones y el rotámetro. La tabla 7 indica los valores de L/d correspondientes a cada uno de los accesorios.

Figura 24. Dimensiones de la tubería de suministro de agua fría.

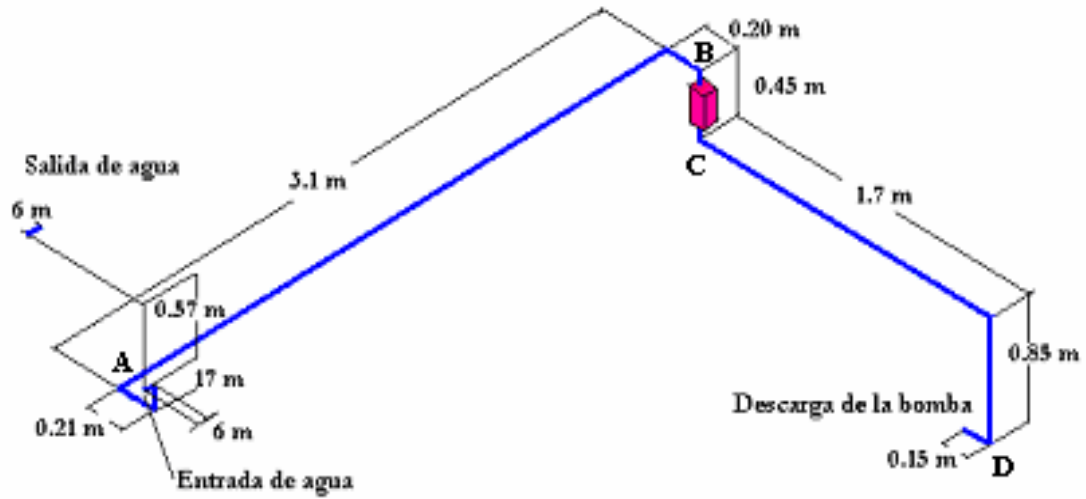


Tabla 7. Valores de L/D para los accesorios del sistema instalado.

Accesorios	L/D
Codo estándar 90°	30
Te estándar 1 (flujo por la línea principal)	20
Te estándar 2 (flujo por el ramal)	60
Válvula de bola	648
Reducción 1 (1.5' a 0.75')	285
Reducción 2 (1' a 0.75)	30
Ensanchamiento (0.75 a 1)	26

La pérdida por fricción en un tramo de tubería esta dada por la ecuación

$h_L = RQ^x$, donde h_L es la perdida de carga en un tramo de tubería de longitud L, R es el coeficiente de resistencia, Q es la descarga de la tubería y x un exponente.

Para calcular el coeficiente de resistencia R se utilizó la ecuación de Hazen-

Williams $R = \frac{K_1 L}{C^x D^m}$, donde los exponentes son $x = 1.85$ $m = 4.87$, y C es el

coeficiente de Hazen-Williams que para tubería lisa es de 140 y para tubería de cobre se tomó un valor de 130. La constante K_1 tiene una magnitud de 10.59 en el SI. La tabla 8 resume las pérdidas en el circuito de agua.

Tabla 8. Pérdidas a través del circuito de agua fría.

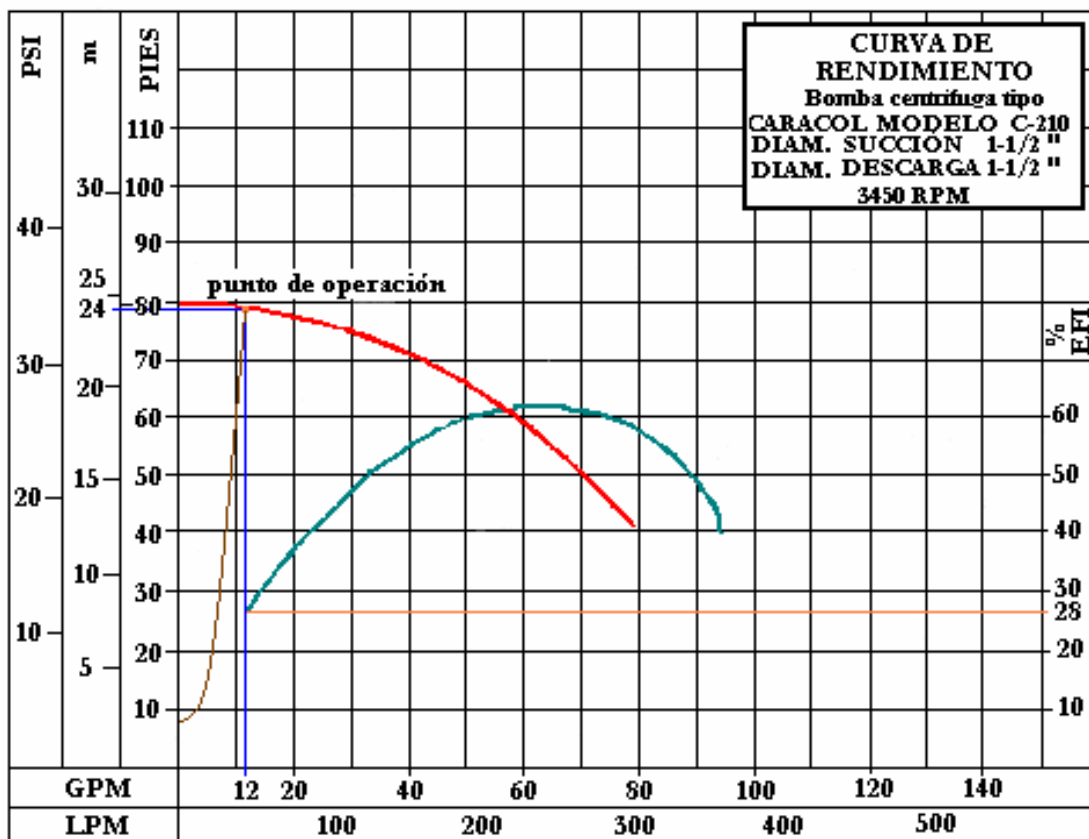
Tramo	Accesorios	Diámetro (m)	Caudal (m³/s)	Longitud de accesorios (m)	Longitud de tramo (m)	Longitud total (m)	Pérdida (m)
A - B	3 Tl, 4 codos, 1 válvula y una reducción2	0.01905	7.57E-4	16.531	3.74	20.271	10
C - D	1 reducción1, 2 codos y un ensanchamiento	0.01905	7.57E-4	12.51	2.7	15.21	6
succión	ensanchamiento	0.0254	7.57E-4	1.79	1	2.79	0.5

La pérdida a través de la serpentina es de 2 m y la pérdida a través del rotámetro es de 1 m aproximadamente. Suponiendo una presión de 2 m a la salida del agua de la serpentina y teniendo un $\Delta z = 2.1m$ entones

$$H_{total} = 10 + 6 + 2.5 + 0.5 + 1 + 2 + 2 = 24 \text{ m}$$

La figura 25 muestra el punto de operación de la bomba. Esta trabaja con una eficiencia del 28% que se considera muy baja para el sistema. Sin embargo se utilizó debido a que era la única con la que se contaba.

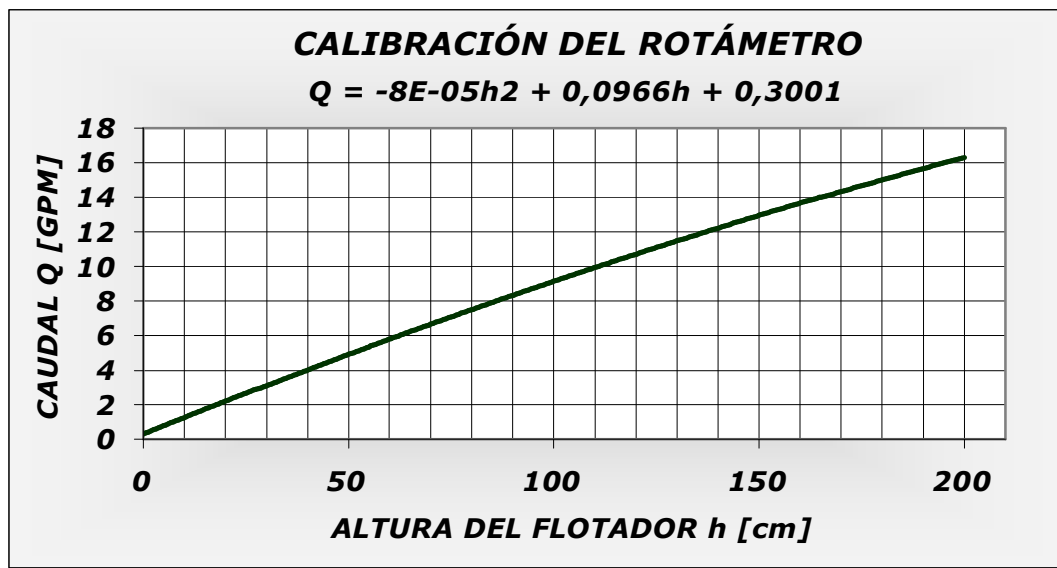
Figura 25. Curva de rendimiento de la bomba BARNES tipo caracol modelo c-210.



3.2.3 Rotámetro. El rotámetro, conectado en serie con la bomba de agua fría se utiliza para medir y controlar el caudal que la unidad enfriadora debe manejar. Está ubicado en la columna norte del laboratorio. La calibración del rotámetro arrojó la gráfica que se muestra en la figura 26.

3.2.4 Sistemas de tuberías de agua y gas. La tubería de agua es de PVC de ¾" La acometida del agua se encuentra en un punto ubicado en la parte interna de la pared norte del laboratorio, mientras que la acometida del gas se encuentra en un punto de la parte externa de la pared del laboratorio de Máquinas Térmicas Alternativas donde está instalado el medidor de flujo.

Figura 26. Gráfica de calibración del rotámetro, caudal en GPM en función de la altura del flotador cm.



3.2.5 Unidad manejadora de aire. La UMA es un intercambiador de calor entre el agua fría que viene de la unidad ROBUR y el aire exterior y del recinto. El aire que acondicionará el laboratorio cede calor al agua de enfriamiento, que es suministrada por la bomba, disminuyendo la temperatura y humedad. En la figura 26 se indica la ubicación de la unidad manejadora de aire, la bomba de agua fría, el rotámetro y las tuberías de agua.

3.2.6 Suministro eléctrico. La unidad enfriadora está conectada eléctricamente a la red. La figura 27 muestra las líneas eléctricas de la bomba, unidad enfriadora y unidad manejadora de aire además de la tubería de gas.

Figura 27. Ubicación del rotámetro, bomba de agua fría, unidad manejadora de aire y tuberías para agua fría, caliente y de llenado.

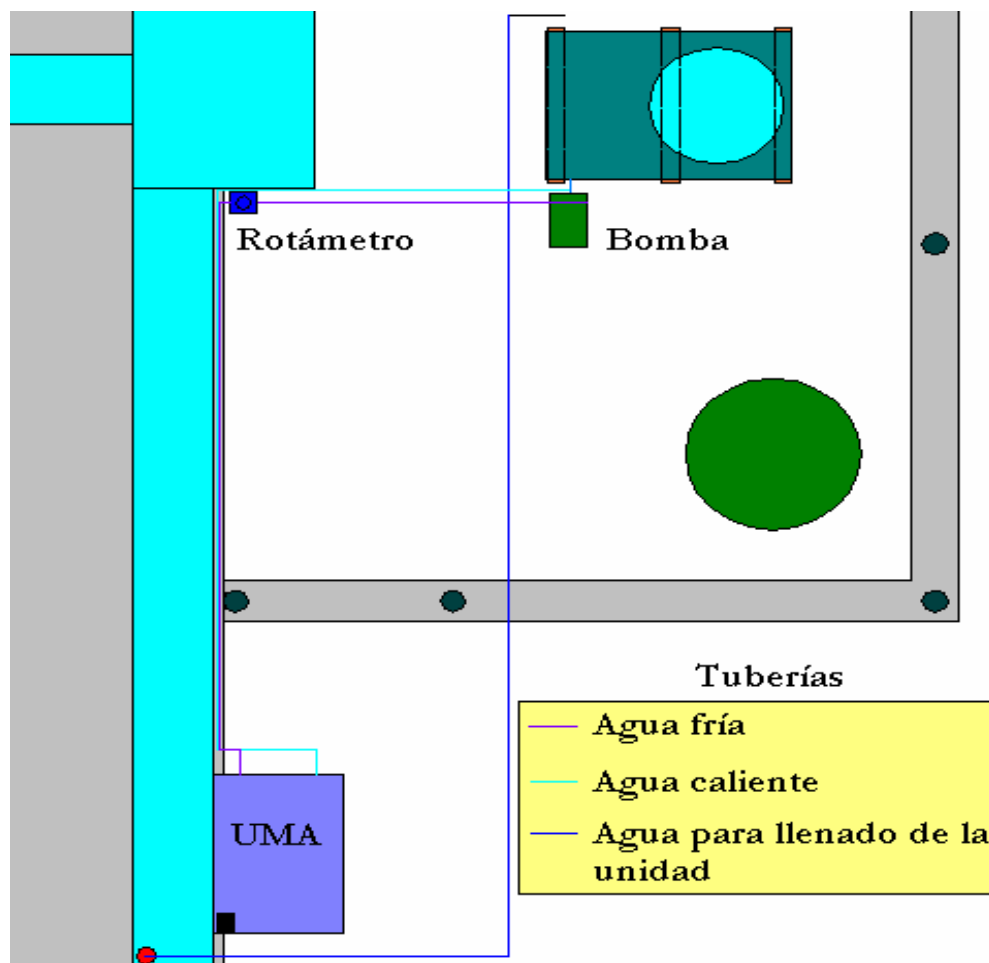
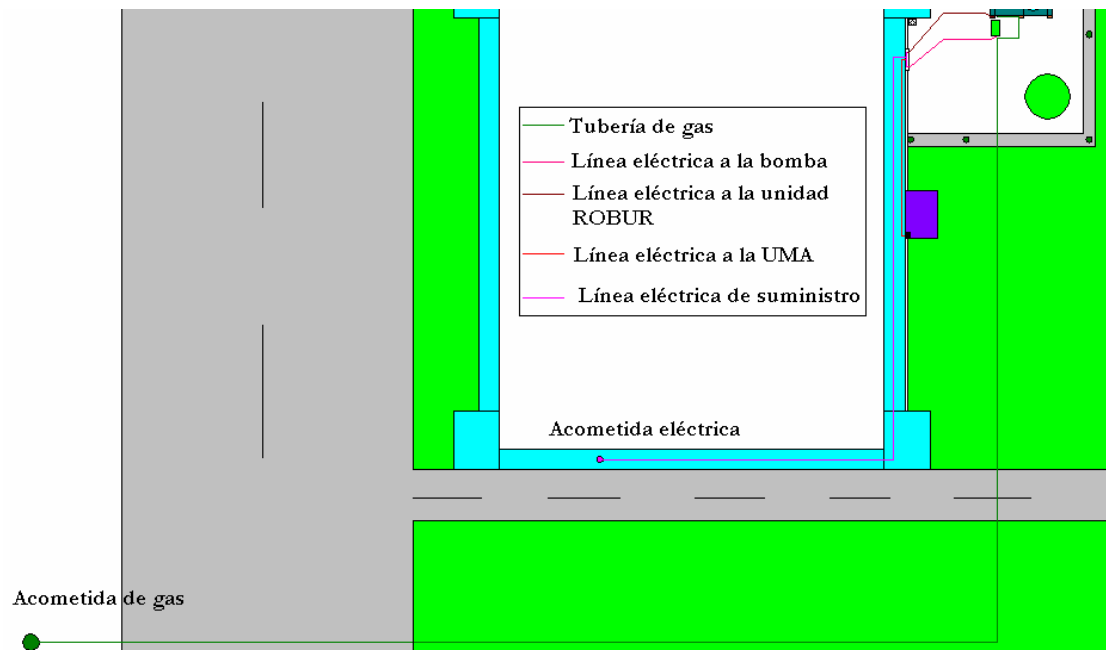


Figura 28. Tubería de gas y líneas eléctricas de la bomba de agua fría, unidad enfriadora ROBUR y unidad manejadora.



4. DISEÑO DEL SISTEMA.

4.1. CÁLCULO DE LAS CARGAS TÉRMICAS DEL LABORATORIO.

Las condiciones de diseño para el recinto a acondicionar son:

Temperatura del recinto $T_R = 24^\circ C = 75.2^\circ F$

Temperatura ambiente $T_o = 29^\circ C = 84.2^\circ F$

Humedad relativa $H_R = 50\%$

Hora solar 14

Latitud 8°

Mes *Febrero* .

Las áreas de las paredes, ventanas, puerta y techo del laboratorio son las siguientes:

Pared norte 250 ft^2

Pared sur 250 ft^2

Pared oriente 378.28 ft^2

Pared oeste 415.26 ft^2

Ventana norte 214.84 ft^2

Ventana sur 214.84 ft^2

Puerta oriente 27.41 ft^2

Techo 845.18 ft^2

4.1.1 Cargas de enfriamiento.

❖ **Conducción en paredes.** Para el cálculo de las cargas utilizaremos la ecuación $Q = U * A * DTCE_e \left[\frac{BTU}{h} \right]$, donde Q es la ganancia neta del recinto por conducción a través de la pared, A es el área de la pared y $DTCE_e$ es la diferencia de temperatura corregida para carga de enfriamiento. El valor de la $DTCE_e$ se obtiene aplicando la ecuación $DTCE_e = [(DTCE + LM) * K + (78 - T_R) + (T_O - 85)] * f$, donde $DTCE$ es la diferencia de temperatura para carga de enfriamiento, LM es la corrección para latitud al color y mes, K que corrige de acuerdo al color de la superficie, las temperaturas de recinto y ambiente T_R y T_O se dan en $^{\circ}F$ y f es el factor de corrección para ventilación del cielo raso. Todos estos valores los obtenemos de tablas.

- **Pared norte.** Esta pared se encuentra a la sombra de los árboles todo el año, por tanto tomamos una temperatura ambiente a la sombra $T_{os} = 82.4^{\circ}F$ y calculamos la carga mediante la ecuación $Q = U * A * (T_{os} - T_R) \left[\frac{BTU}{h} \right]$. El coeficiente global de transferencia de calor de la pared es $U = 0.302 \frac{BTU}{h \cdot ft^2 \cdot ^{\circ}F}$, por tanto el calor sensible por conducción por esta pared se calcula:

$$Q = 0.302 * 250 * (82.4 - 75.2) \frac{BTU}{h}, \text{ entonces,}$$

$$Q = 543.6 \frac{BTU}{h}$$

- **Pared sur.** Los datos obtenidos para esta pared son:

$$U = 0.302 \frac{BTU}{h \text{ ft}^2 \text{ } ^\circ F}$$

$$DTCE = 12^\circ F$$

$$LM = 4$$

$$K = 0.65$$

$$DTCE_e = 12.4^\circ F$$

$$Q = 0.302 * 250 * 12.4 \frac{BTU}{h}, \text{ entonces,}$$

$$Q = 936.2 \frac{BTU}{h}$$

- **Pared oriente.** Los datos son:

$$U = 0.302 \frac{BTU}{h \text{ ft}^2 \text{ } ^\circ F}$$

$$DTCE = 22^\circ F$$

$$LM = -1$$

$$K = 0.65$$

$$DTCE_e = 15.6^\circ F$$

$$Q = 0.302 * 378.28 * 15.6 \frac{BTU}{h}, \text{ entonces,}$$

$$Q = 1787.86 \frac{BTU}{h}$$

- **Pared oeste.** Esta pared es común con el laboratorio de CNC, el cual se encuentra acondicionado, por tanto $Q = 0$.

- ❖ **Conducción en techo.** Los datos recopilados para el techo son:

$$U = 0.134 \frac{BTU}{h \text{ ft}^2 \text{ } ^\circ F}$$

$$DTCE = 48^\circ F$$

$$LM = -1$$

$$K = 1$$

$$DTCE_e = 49^\circ F$$

$$Q = 0.134 * 845.18 * 49 \frac{BTU}{h}, \text{ entonces,}$$

$$Q = 5549.45 \frac{BTU}{h}$$

❖ **Conducción en ventanas.** Para este caso el valor de la $DTCE_e$ lo calculamos mediante la ecuación $DTCE_e = DTCE + (78 - T_R) + (T_o - 85)$.

• **Ventana norte.** Debido a la sombra de los árboles todo el año, calcularemos la carga mediante la ecuación

$$Q = U * A * (T_{os} - T_R) \left[\frac{BTU}{h} \right], \text{ donde el valor del coeficiente global de}$$

transferencia de calor es $U = 1.04 \frac{BTU}{h \text{ ft}^2 \text{ } ^\circ F$, por tanto,

$$Q = 1.04 * 214.84 * (82.4 - 75.2) \frac{BTU}{h}, \text{ entonces, } Q = 1608.72 \frac{BTU}{h}$$

• **Ventana sur.** Esta ventana tiene la parte superior sombreada a toda hora y en todas las épocas del año debido a la prolongación del techo, por tanto los valores de la $DTCE_e$ varían para la parte superior e inferior.

Ventana superior. El área es $A = 93.75 \text{ ft}^2$, el coeficiente global de

transferencia de calor es $U = 1.04 \frac{BTU}{h \text{ ft}^2 \text{ } ^\circ F$, la $DTCE = 13^\circ F$ y la

$$DTCE_e = 13.2^\circ F, \quad \text{por tanto} \quad Q = 1.04 * 93.75 * 13.2 \frac{BTU}{h}, \quad \text{entonces,}$$

$$Q = 1287 \frac{BTU}{h}.$$

Ventana inferior. El área es $A = 121.09 \text{ ft}^2$, el coeficiente global de transferencia de calor es $U = 1.04 \frac{BTU}{h \text{ ft}^2 \text{ } ^\circ F}$, la $DTCE = 13^\circ F$ y la

$$DTCE_e = 15^\circ F, \quad \text{luego el calor es } Q = 1.04 * 121.09 * 15 \frac{BTU}{h}, \quad \text{entonces,}$$

$$Q = 1889 \frac{BTU}{h}$$

- **Puerta oriente.** Esta puerta es de vidrio, por tanto la consideramos como una ventana para efecto de cálculos. El área es $A = 27.41 \text{ ft}^2$, el coeficiente global de transferencia de calor es $U = 1.04 \frac{BTU}{h \text{ ft}^2 \text{ } ^\circ F}$, la

$$DTCE = 13^\circ F \text{ y la } DTCE_e = 15^\circ F, \quad \text{luego el calor es } Q = 1.04 * 27.41 * 15 \frac{BTU}{h},$$

$$\text{entonces, } Q = 427.6 \frac{BTU}{h}.$$

Calor total por conducción: $14029.43 \frac{BTU}{h}$

❖ **Calor por radiación solar a través de vidrios.** Para este caso utilizamos la ecuación $Q = FGCS * A * CS * FCE$, donde Q es la ganancia neta por radiación solar a través de vidrios, $FGCS$ es el factor de ganancia máxima de calor solar, A el área del vidrio, CS el coeficiente de sombreado y FCE es el factor de carga de enfriamiento para el vidrio.

- **Vidrio norte.** Los valores son los siguientes:

$$A = 214.84 \text{ ft}^2$$

$$FGCS = 34 \frac{BTU}{h \text{ ft}^2}$$

$$CS = 1$$

$$FCE = 0.82$$

El calor es $Q = 34 * 214.84 * 1 * 0.82 \frac{BTU}{h}$, entonces $Q = 5989.73 \frac{BTU}{h}$. Debido a

la sombra de los árboles este calor es menguado, por tanto consideramos un

60% de este valor, así que $Q_{REAL} = 3593.83 \frac{BTU}{h}$.

- **Vidrio sur.** Los datos obtenidos son los siguientes

Superior

$$A = 93.75 \text{ ft}^2$$

$$FGCS = 34 \frac{BTU}{h \text{ ft}^2}$$

$$CS = 1$$

$$FCE = 0.65$$

El calor es $Q = 34 * 93.75 * 1 * 0.65 \frac{BTU}{h}$, entonces $Q = 2071.87 \frac{BTU}{h}$.

Inferior

$$A = 121.09 \text{ ft}^2$$

$$FGCS = 110 \frac{BTU}{h \text{ ft}^2}$$

$$CS = 1$$

$$FCE = 0.65$$

El calor es $Q = 110 * 121.09 * 1 * 0.65 \frac{BTU}{h}$, entonces $Q = 8657.9 \frac{BTU}{h}$.

- **Vidrio oriente.** Los valores son los siguientes:

$$A = 27.41 \text{ ft}^2$$

$$FGCS = 239 \frac{BTU}{h \text{ ft}^2}$$

$$CS = 1$$

$$FCE = 0.32$$

El calor es $Q = 239 * 27.41 * 1 * 0.32 \frac{BTU}{h}$, entonces $Q = 2096.31 \frac{BTU}{h}$.

Calor total por radiación: $16419.9 \frac{BTU}{h}$

❖ **Calor por alumbrado.** Utilizamos la expresión $Q = 3.4 * W * FB * FCE$, donde Q es la ganancia neta de calor debida al alumbrado, W la capacidad del alumbrado, FB el factor de balastra y FCE es el factor de carga de enfriamiento para el alumbrado.

El laboratorio cuenta con 12 lámparas de $40W$ cada una, por tanto $W = 480$. Los factores de balastra y de carga de enfriamiento para el alumbrado son, respectivamente, $FB = 1.25$ y $FCE = 1$. Luego $Q = 3.4 * 480 * 1.25 * 1 \frac{BTU}{h}$, entonces $Q = 2040 \frac{BTU}{h}$.

❖ **Calor por personas.** Utilizamos la expresión $Q_s = q_s * n * FCE$ para el calor sensible y $Q_L = q_L * n$ para el calor latente, donde q_s y q_L son, respectivamente, las ganancias de calor sensible y latente por persona, n es el número de personas y FCE es el factor de carga de enfriamiento para las personas.

Al laboratorio asisten en promedio 18 personas, $q_s = 315 \frac{BTU}{h \text{ persona}}$,

$q_L = 325 \frac{BTU}{h \text{ persona}}$ y $FCE = 1$. Luego $Q_s = 315 * 18 * 1 \frac{BTU}{h}$, entonces,

$Q_s = 5670 \frac{BTU}{h}$. Además $Q_L = 325 * 18 \frac{BTU}{h}$, entonces, $Q_L = 5850 \frac{BTU}{h}$

❖ Otros calores.

- 7 bombas sumergibles de $\frac{1}{4} Hp$, entonces $Q = 7000 \frac{BTU}{h}$
- 1 motor eléctrico de $\frac{3}{4} Hp$, entonces $Q = 2680 \frac{BTU}{h}$
- 1 equipo de baño termostatado de $1 Hp$. Este equipo emite calor sensible y latente en las mismas proporciones que una cafetera, así,
 $Q_s = 1781.15 \frac{BTU}{h}$ y $Q_L = 763.35 \frac{BTU}{h}$.
- 5 computadores $Q = 3198 \frac{BTU}{h}$
- 1 fuente de 24 Voltios y 2 Amperios $Q = 163.68 \frac{BTU}{h}$
- Dos fuentes de 24 Voltios y 5 Amperios $Q = 409.2 \frac{BTU}{h}$

Calor total sensible de otros calores: $15232.03 \frac{BTU}{h}$

Calor total latente otros calores: $763.35 \frac{BTU}{h}$.

Todos los calores están resumidos en la tabla 9.

Tabla 9. Resumen de las ganancias de calor en el laboratorio de mecánica de fluidos.

CALORES FUENTE	$Q_s \left[\frac{BTU}{h} \right]$	$Q_L \left[\frac{BTU}{h} \right]$	$Q_r \left[\frac{BTU}{h} \right]$
CONDUCCIÓN	14029.43	0	14029.43
RADIACIÓN	16419.9	0	16419.9
ALUMBRADO	2040	0	2040
PERSONAS	5670	5850	11520
OTROS	15232	763.35	15995.35
TOTALES	53391.33	6613.35	60004.68

El calor total es entonces $\frac{60004.68}{12000} Ton = 5 Ton$

La carga de enfriamiento del laboratorio de mecánica de fluidos es entonces

$$Q = 5 Ton .$$

4.2. SICROMETRÍA DEL LABORATORIO

4.2.1 Condiciones de diseño.

$$\text{❖ Aire exterior: } \begin{cases} T_{AE} = 28^\circ C = 82.4^\circ F \\ \phi = 70\% \end{cases}$$

$$\text{❖ Laboratorio: } \begin{cases} T_R = 24^\circ C = 75.2^\circ F \\ \phi = 50\% \end{cases}$$

$$\text{❖ Impulsión: } T_i = 14^\circ C = 57.2^\circ F$$

4.2.2 Factor de calor sensible del laboratorio.

$$RSHF = \frac{RSH}{RSH + RLH} = \frac{53391.33}{60004.68} = 0.89$$

4.2.3 CFM impulsados.

$$CFM_i = \frac{53391.33 \frac{BTU}{h}}{1.08(75.2 - 57.2)^\circ F} = 2746.46 CFM, \quad \text{al redondear se tiene}$$

$$CFM_i = 2800 CFM.$$

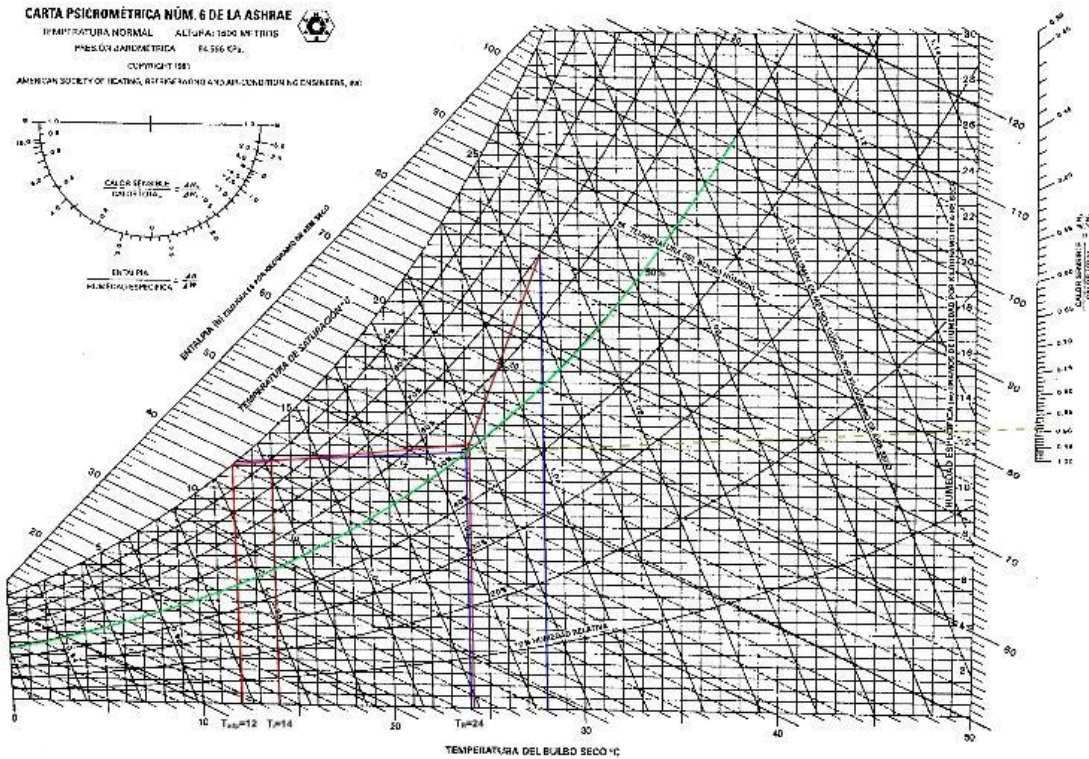
4.2.4 CFM aire exterior. Con el área de entrada del aire exterior es de $0.0166 m^2$ y la velocidad del aire de $1.7 \frac{m}{s}$ se obtiene $CFM_{AE} = 59.79 CFM$

4.2.5 Temperatura de mezcla. La temperatura de mezcla se obtiene de

$$T_M = T_R + \frac{CFM_{AE}}{CFM_i} (T_{AE} - T_R) = 75.2^\circ F + \frac{59.79}{2746.46} (82.4^\circ F - 75.2^\circ F) = 75.4^\circ F = 24.1^\circ C$$

4.2.6 Temperatura de adp. Los valores obtenidos se ubicaron en la carta sicrométrica como lo muestra la figura 29 y se consiguió la temperatura de adp de $12^\circ C$.

Figura 29. Carta sicrométrica que muestra la evolución del aire en el recinto.



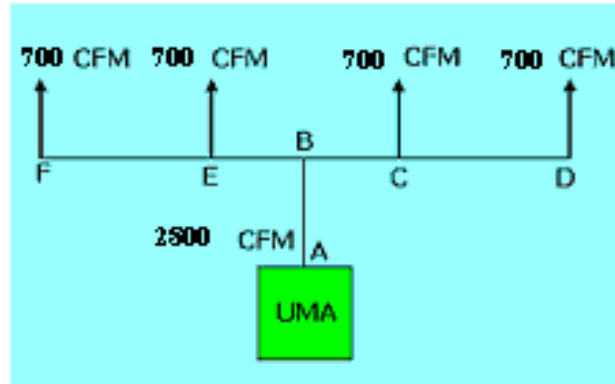
4.3. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE DUCTOS

4.3.1 Ductos de suministro. Para dimensionar los ductos de esta instalación utilizamos el método de igual fricción, es decir seleccionamos un valor para la pérdida por fricción, por longitud de ducto, y la mantuvimos constante para todas las secciones a lo largo del sistema. El valor seleccionado estuvo basado en la velocidad máxima permisible para evitar demasiado ruido, su

valor es $1200 \frac{ft}{min}$.

El esquema general de la ductería se muestra en la figura 30.

Figura 30. Distribución de los CFM desde la unidad manejadora por medio del método de igual carga.



Se cuenta con una salida rectangular en el ventilador de 15.9"x18.7" que produce un diámetro equivalente de 19" (gráfica 8.23 Pita) lo cual arroja, según gráfica (8.21 Pita) una velocidad de $1400 \frac{ft}{min}$ y una pérdida por fricción de $H_f = \frac{0.14 \text{ in Agua}}{100 \text{ ft}}$. Esta velocidad no es adecuada pues es mayor que la velocidad de diseño, previamente concebida. Se hace necesario hacer una transición a una sección rectangular que cumpla con la velocidad de diseño.

Tomamos el tramo AB y con la velocidad de diseño y los 2800 CFM entramos a la gráfica 8.21 y obtuvimos el diámetro equivalente del ducto, $D_{EQUIV} = 21"$ y las pérdidas por fricción $H_f = \frac{0.09 \text{ in Agua}}{100 \text{ ft}}$. Con el diámetro equivalente y teniendo fija una dimensión del ducto rectangular (18.7") entramos a la gráfica 8.23 y elegimos la otra dimensión del ducto, la cual es 20". Para los demás tramos mantuvimos las pérdidas por fricción y restábamos progresivamente los CFM, de tal manera que podríamos entrar

de nuevo a la gráfica con los CFM y las pérdidas para obtener el diámetro equivalente y seguir con el procedimiento. Los resultados se relacionan en la tabla 10.

Tabla 10. Resumen de pérdidas totales y dimensiones de las secciones de los ductos.

<i>TRAMO</i>	<i>CFM</i>	$V \left[\frac{ft}{min} \right]$	$\frac{H_f}{100 \text{ } ft}$	D_{EQUIV}	<i>SECCIÓN RECTANGULAR</i>
<i>AB</i>	2800	1200	0.09	21	18.7"x20"
<i>BE y BC</i>	1400	1000	0.09	16	18.7"x12"
<i>FE y CD</i>	700	850	0.09	12.5	18.7"x7.5"

4.3.2 Ductos de retorno. Para el cálculo del ducto de retorno se impuso una velocidad de diseño de $5 \frac{m}{s} = 984.25 \frac{ft}{min}$, tomando como criterio el nivel de ruido. Se calculó el área requerida a la salida del recinto:

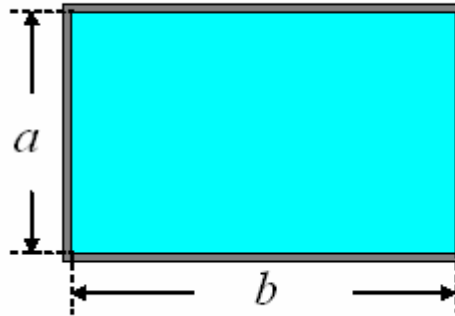
$$984.25A = 2800, \text{ donde } A = \frac{2800}{984.25} ft^2. \text{ Luego el área requerida es } A = 2.85 ft^2.$$

Se utilizaron dos ramales de retorno por razón de espacio en la pared del laboratorio. Por tanto cada ramal tiene un área requerida de salida del recinto

$$\text{de } A = \frac{2.85}{2} = 1.425 ft^2 = 1319.22 cm^2.$$

Este ducto será rectangular, como se muestra en la figura 31.

Figura 31. Sección transversal del ducto de retorno para el sistema de aire acondicionado del laboratorio de mecánica de fluidos.



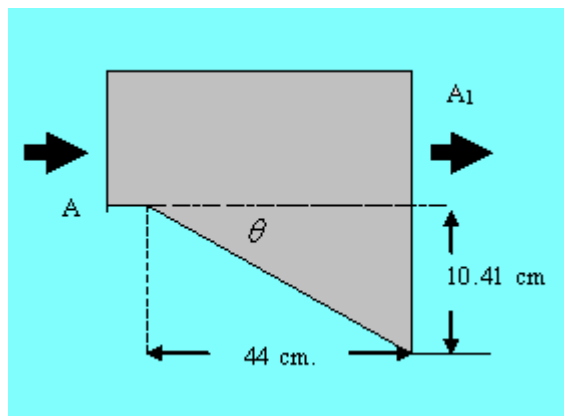
Tomamos $b = 40 \text{ cm}$, entonces $ab = 1319.22$ de donde $a = 33 \text{ cm}$.

4.3.3 Pérdidas en los ductos de suministro.

❖ **Tramo 1.** $H_f = \frac{0.14''}{100 \text{ ft}} * \frac{1 \text{ ft}}{30.48 \text{ cm}} * 21.3 \text{ cm} = 9.78 * 10^{-4} \text{ in}$

❖ **Tramo 2.** Las dimensiones del tramo 2 se muestran en la figura 32.

Figura 32. Dimensiones del tramo 2 del ducto de suministro.



$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{10.41}{44}\right) = 13.3^\circ \quad \text{además} \quad \frac{A_1}{A} = \frac{47.5 * 50.8}{47.5 * 40.39} = 1.25 \quad \text{vamos a la tabla 8.5 y}$$

tomamos $C = 0.18$ la velocidad de entrada viene dada por $V = \frac{Q}{A}$, entonces

$$V = \frac{2800}{2.06} = 1400 \frac{ft}{min}, \quad \text{por tanto de la ecuación } H_f = C * \left(\frac{V}{4000}\right)^2, \quad \text{obtenemos la}$$

$$\text{pérdida para este tramo: } H_f = 0.18 * \left(\frac{1400}{4000}\right)^2 = 0.022 \text{ in}$$

$$\diamond \quad \text{Tramo 3. } H_f = \frac{0.09''}{100 ft} * \frac{1 ft}{30.48 cm} * 21.2 cm = 6.25 * 10^{-4} \text{ in}$$

$$\diamond \quad \text{Tramo 4. } \frac{A_b}{A_s} = \frac{47.5 * 50.8}{47.5 * 50.8} = 1 \quad \text{y} \quad \frac{A_b}{A_c} = \frac{47.5 * 50.8}{47.5 * 50.8} = 1 \quad \text{además}$$

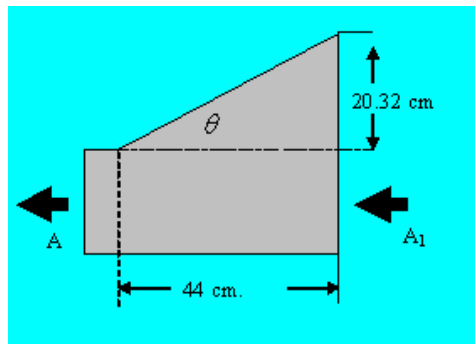
$$\frac{Q_b}{Q_c} = \frac{1400 CFM}{2800 CFM} = 0.5, \quad \text{por tanto de la tabla 8.8 } C = 0.32. \quad \text{La velocidad es}$$

$$V = 1200 \frac{ft}{min}, \quad \text{por tanto la pérdida en este tramo es}$$

$$H_f = 0.32 * \left(\frac{1200}{4000}\right)^2 = 0.0288 \text{ in}$$

$\diamond$ **Tramo 5.** Las dimensiones del tramo 5 se muestran en la figura 33.

Figura 33. Dimensiones del tramo 5 del ducto de suministro.



$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{20.32}{44}\right) = 24.8^\circ \text{ y } \frac{A_1}{A} = \frac{47.5 * 50.8}{47.5 * 30.48} = 1.66, \text{ de donde } C = 0.05 \text{ y la}$$

velocidad $V = \frac{1400}{2.6} = 538.5 \frac{ft}{min}$ entonces la pérdida es

$$H_f = 0.05 * \left(\frac{538.5}{4000}\right)^2 = 9.06 * 10^{-4} in$$

❖ **Tramo 6.** $H_f = \frac{0.09''}{100 ft} * \frac{1 ft}{30.48 cm} * 151.5 cm = 4.47 * 10^{-3} in$

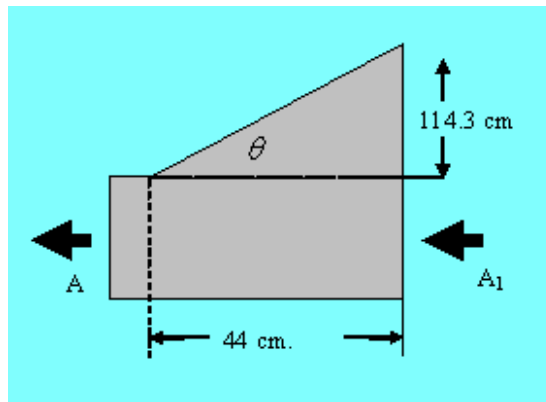
Tramo 7. Las dimensiones del tramo 7 se muestran en la figura 34. Aquí

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{114.3}{44}\right) = 44.6^\circ \text{ y } \frac{A_1}{A} = \frac{47.5 * 30.48}{47.5 * 19.05} = 1.60 \text{ por tanto } C = 0.05, \text{ la}$$

velocidad es $V = \frac{700}{1.56} = 449 \frac{ft}{min}$, lo que arroja una pérdida en este tramo de

$$H_f = 0.05 * \left(\frac{449}{4000}\right)^2 = 6.3 * 10^{-4} in.$$

Figura 34. Dimensiones del tramo 7 del ducto de suministro.



❖ **Tramo 8.** $H_f = \frac{0.09''}{100 ft} * \frac{1 ft}{30.48 cm} * 149.75 cm = 4.42 * 10^{-3} in.$

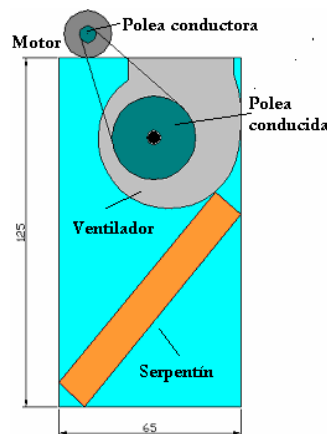
❖ **Pérdidas en rejillas.** Según catálogos las pérdidas son de 0.055 in en cada una, por tanto la pérdida en las dos es 0.11 in .

❖ **Pérdida total.** 0.173 in .

4.4. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LA UNIDAD MANEJADORA

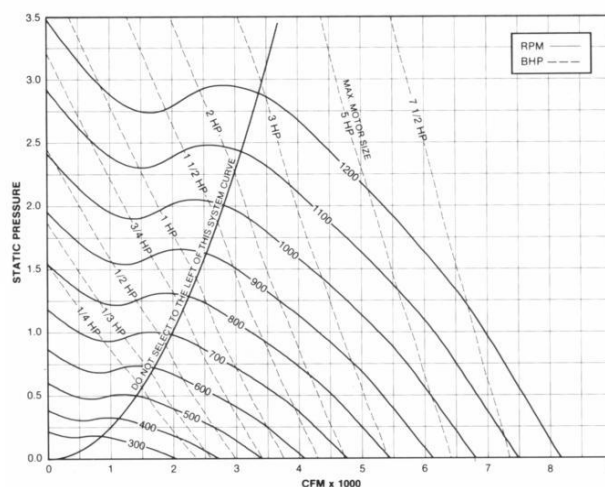
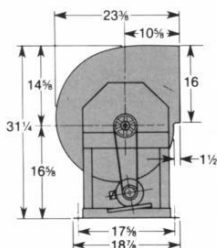
4.4.1 Selección del ventilador. Por donación del ICP se contaba con un ventilador modelo SFB -15. Para encontrar las rpm del motor se entra con el valor de la pérdida total en los ductos de 0.173 in que se aproxima a $\frac{1}{4}$ y los cfm de 2600, así se obtiene 497 rpm y una potencia de frenado de 0.48 BHP las figuras 35 y 36 se indican la vista lateral de la unidad manejadora de aire y los valores de los BHP y rpm, así como las especificaciones técnicas del ventilador. El motor con el que se cuenta es de 1 HP monofásico a 220 V y 3450 rpm, con lo cual se obtuvo una relación de poleas de 0.5 y una relación de velocidades de 6.94. La distancia entre centros es 44 cm.

Figura 35. Vista lateral de la unidad manejadora de aire.



SFB-15

Wheel Diameter = 15 Inches
 Outlet Area = 1.39 Square Feet
 Maximum RPM = 1200
 Tip Speed, FPM = 3.93 X RPM
 Maximum Motor Frame = 184T*
 *184T Open Frame Motor



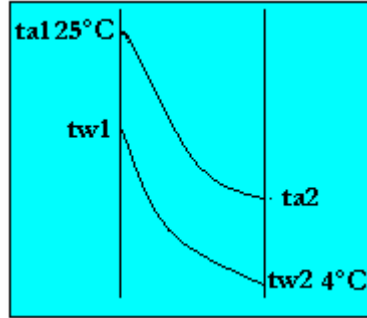
CFM	OV	Static Pressure in inches of W.G. / Capacity (CFM)															
			1/8"	1/4"	3/8"	1/2"	5/8"	3/4"	7/8"	1"	1 1/4"	1 1/2"	1 3/4"	2"	2 1/4"	2 1/2"	
1600	1155	RPM	326	398	457	511	559										
		BHP	0.12	0.17	0.21	0.26	0.30										
1700	1227	RPM	336	407	465	517	565										
		BHP	0.14	0.19	0.24	0.28	0.33										
1800	1299	RPM	347	416	474	524	572	616									
		BHP	0.16	0.21	0.26	0.31	0.36	0.41									
1900	1371	RPM	358	425	482	532	578	622	662								
		BHP	0.19	0.24	0.29	0.35	0.40	0.45	0.50								
2000	1443	RPM	369	434	491	541	585	628	668	706							
		BHP	0.21	0.27	0.32	0.38	0.43	0.49	0.54	0.59							
2100	1515	RPM	381	444	500	549	593	634	674	712							
		BHP	0.24	0.30	0.36	0.42	0.47	0.53	0.59	0.64							
2200	1588	RPM	392	454	509	557	601	641	681	718							
		BHP	0.26	0.33	0.39	0.45	0.52	0.57	0.63	0.69							
2400	1732	RPM	417	475	527	575	618	658	695	730	799						
		BHP	0.33	0.40	0.47	0.54	0.60	0.67	0.74	0.80	0.93						
2600	1876	RPM	442	497	547	593	636	675	711	746	812	874					
		BHP	0.41	0.48	0.56	0.63	0.71	0.78	0.85	0.92	1.06	1.20					
2800	2020	RPM	468	519	567	611	653	692	728	762	825	886	943				
		BHP	0.50	0.58	0.66	0.73	0.82	0.90	0.98	1.05	1.20	1.36	1.50				
3000	2165	RPM	494	542	588	631	671	710	745	779	841	898	956	1009	1059		
		BHP	0.60	0.68	0.77	0.86	0.94	1.03	1.11	1.20	1.36	1.52	1.69	1.84	1.99		
3200	2309	RPM	521	565	610	652	690	728	763	796	858	914	968	1021	1071	1119	
		BHP	0.71	0.80	0.90	0.99	1.08	1.17	1.26	1.35	1.53	1.71	1.88	2.05	2.22	2.38	
3400	2453	RPM	548	590	632	672	710	746	781	814	875	931	983	1033	1083	1131	
		BHP	0.84	0.94	1.04	1.14	1.23	1.32	1.42	1.52	1.72	1.91	2.09	2.27	2.45	2.63	
3600	2598	RPM	575	616	655	694	731	766	799	832	892	948	1000	1048	1096	1143	
		BHP	0.99	1.09	1.19	1.30	1.40	1.50	1.60	1.71	1.91	2.12	2.32	2.51	2.70	2.90	
3800	2742	RPM	603	641	678	716	751	786	818	850	910	965	1016	1065	1110	1155	
		BHP	1.15	1.26	1.36	1.48	1.59	1.70	1.80	1.90	2.13	2.34	2.56	2.77	2.97	3.17	
4000	2886	RPM	630	667	702	738	773	806	838	869	928	982	1033	1081	1127	1170	
		BHP	1.32	1.45	1.56	1.67	1.79	1.90	2.02	2.12	2.36	2.59	2.81	3.04	3.26	3.46	
4200	3031	RPM	658	693	727	761	795	827	858	889	946	1000	1050	1098	1143	1186	
		BHP	1.52	1.65	1.77	1.89	2.01	2.13	2.25	2.37	2.60	2.85	3.09	3.32	3.56	3.79	



GREENHECK

4.4.2 Cálculo del serpentín. Se conocen las temperaturas de entrada del agua y del aire. El esquema de temperaturas se muestra en la figura 37.

Figura 37. Temperaturas de diseño para el cálculo del serpentín.



- **Propiedades del aire.** Para efectuar el cálculo de las propiedades del aire asumiremos que $Ta_2 = 11^\circ C$ y $Tw_1 = 10^\circ C$ para calcular la temperatura fílmica.

Para ser más precisos, la temperatura fílmica la calcularemos utilizando las temperaturas promedio del aire, del agua y de la superficie externa de los

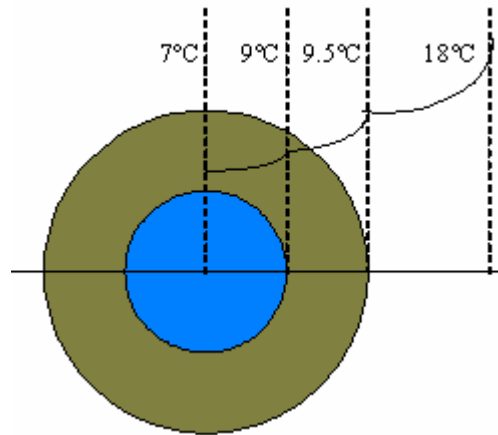
tubos $\overline{T_s}$. Por tanto como $\overline{T_a} = \frac{Ta_1 + Ta_2}{2}$ y $\overline{T_w} = \frac{Tw_1 + Tw_2}{2}$, entonces la

temperatura fílmica viene dada por $T_f = \frac{\overline{T_a} + \overline{T_s}}{2}$. Entonces,

$$\overline{T_a} = \frac{25^\circ C + 11^\circ C}{2} = 18^\circ C \quad \text{y} \quad \overline{T_w} = \frac{10^\circ C + 4^\circ C}{2} = 7^\circ C \quad \text{y consideramos la}$$

temperatura promedio de superficie $\overline{T_s} = 9.5^\circ C$ como una buena aproximación. En la figura 38 se muestra el esquema de todas las temperaturas

Figura 38. Esquema de todas las temperaturas en los tubos del serpentín.



Luego $T_f = \frac{18^\circ C + 9.5^\circ C}{2} = 13.75^\circ C$, entonces las propiedades las calculamos a

$T_f = 286.75K$. La tabla 11 muestra los datos de las propiedades del aire a las temperaturas de 250 y 300K.

Tabla 11. Propiedades del aire a las temperaturas de 250 y 300K.

$T[K]$	ρ $\left[\frac{kg}{m^3} \right]$	C_p $\left[\frac{kJ}{kg} \right]$	$\mu * 10^7$ $\left[\frac{Ns}{m^2} \right]$	$\nu * 10^6$ $\left[\frac{m^2}{s} \right]$	$k * 10^3$ $\left[\frac{W}{mK} \right]$	$\alpha * 10^6$ $\left[\frac{m^2}{s} \right]$	Pr
250	1.3947	1.006	159.6	11.44	22.3	15.9	0.720
300	1.1614	1.007	184.6	15.89	26.3	22.5	0.707

Fuente: Tabla A4 Incropera.

En la tabla 12 se muestran los valores de las propiedades del aire a la temperatura de Interpolación $T_f = 286.75K$

Tabla 12. Propiedades del aire a la temperatura de interpolación de 286.75 K

$T[K]$	ρ $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$	C_p $\left[\frac{kJ}{kg}\right]$	$\mu * 10^7$ $\left[\frac{Ns}{m^2}\right]$	$\nu * 10^6$ $\left[\frac{m^2}{s}\right]$	$k * 10^3$ $\left[\frac{W}{mK}\right]$	$\alpha * 10^6$ $\left[\frac{m^2}{s}\right]$	Pr
286.75	1.2267	1.0067	177	14.64	25.18	20.65	0.711

Fuente: Tabla A4 Incropera.

- **Conductividad térmica del cobre.** La calculamos a la temperatura $T = \frac{9^\circ C + 9.5^\circ C}{2} = 9.3^\circ C$, es decir $T = 282.3K$. La tabla 13 muestra los valores de la conductividad térmica del cobre para las temperaturas de 200 y 400K.

Tabla 13. Valores de la conductividad térmica del cobre a 200 y 400K.

$T[K]$	$k \left[\frac{W}{mK}\right]$
200	413
400	393

Fuente: Tabla A4 Incropera.

Al interpolar tenemos que para $T = 282.3K$, $k = 404.8 \frac{W}{mK}$

- **Propiedades del agua.** Las calculamos a $\overline{T_w} = 7^\circ C = 280K$ y las obtenemos directamente de la tabla 14.

Tabla 14. Propiedades del agua a la temperatura de interpolación de 286.75 K

$T[K]$	C_p $\left[\frac{kJ}{kg} \right]$	$\mu * 10^6$ $\left[\frac{Ns}{m^2} \right]$	$k * 10^3$ $\left[\frac{W}{mK} \right]$	Pr	ρ $\left[\frac{kg}{m^3} \right]$
280	4.198	1422	582	10.26	1000

Fuente: Tabla A4 Incropera.

- **Parámetros geométricos del serpentín.** Las dimensiones del serpentín son las siguientes:

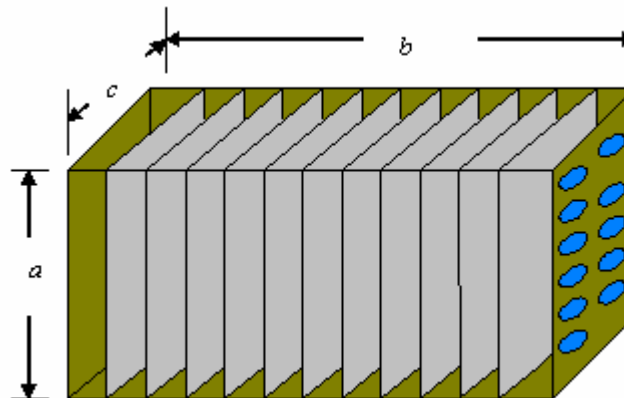
$$a = \text{Alto} = 0.694 \text{ m}$$

$$b = \text{Ancho} = 0.721 \text{ m}$$

$$c = \text{profundidad} = 0.135 \text{ m}$$

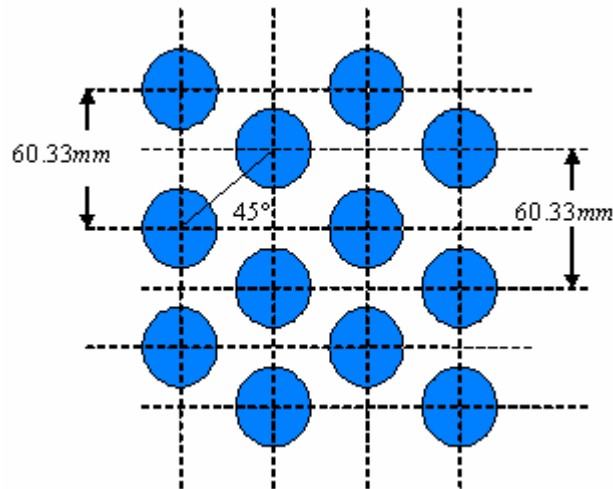
La figura 39 muestra las dimensiones externas del serpentín.

Figura 39. Dimensiones externas del serpentín.



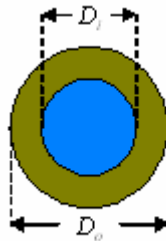
Los tubos tienen un arreglo a 45° , como se observa en la figura 40.

Figura 40. Arreglo a 45° de los tubos en el serpentín.



Los diámetros externo e interno de los tubos son, respectivamente, $D_o = 17.1\text{mm}$ y $D_i = 15.1\text{mm}$, como se indica en la figura 41.

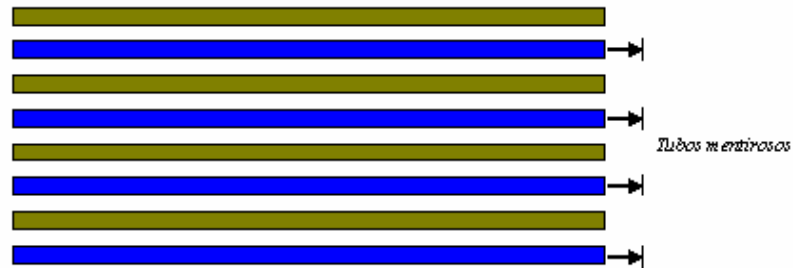
Figura 41. Diámetros interno y externo de los tubos del serpentín.



El haz consta de 4 filas y por cada fila el serpentín cuenta con 24 tubos, de los cuales sólo por 12 tubos circula el agua y los otros doce son *tubos mentirosos*, ubicados para disminuir el área libre de flujo. En total el serpentín cuenta con

96 tubos de los cuales por 48 circula el agua. La figura 42 Muestra la disposición de los tubos mentirosos y por donde circula el agua.

Figura 42. Disposición de los tubos en el serpentín.

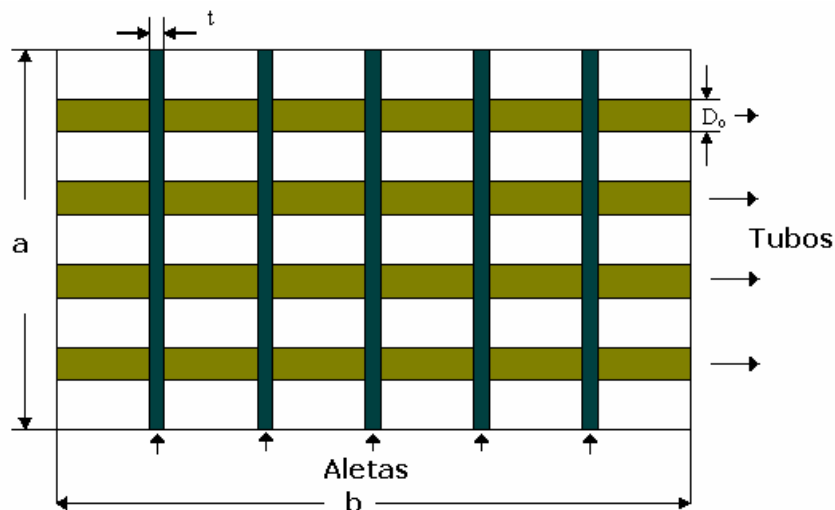


El espaciado de aletas es de 433 por metro y el espesor de cada aleta es $t = 0.397\text{ mm}$. Para el arreglo, el número de aletas N_A es

$$N_A = 433 \frac{\text{Aletas}}{\text{m}} * b = 433 * 0.721 \text{ Aletas}, \text{ entonces } N_A = 312 \text{ Aletas}.$$

El área de flujo libre S_{ff} es la sombreada en la figura 43.

Figura 43. Área de flujo libre en el serpentín.



Esta área se calcula por medio de la expresión:

$$S_{ff} = ab - N_A at - D_o(b - N_A t)N_{Tf}$$

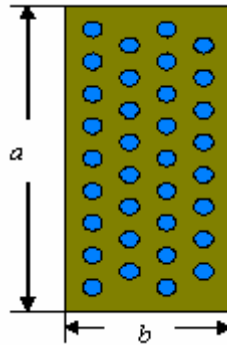
Donde N_{Tf} es el número de tubos por fila, $N_{Tf} = 24$, entonces,

$$S_{ff} = 0.694 * 0.721 - 312 * 0.694 * 0.397 * 10^{-3} - 17.1 * 10^{-3} (0.721 - 312 * 0.397 * 10^{-3}) * 24$$

entonces $S_{ff} = 0.169 \text{ m}^2$.

El área de transferencia de las aletas, A_f es dos veces el área sombreada que se muestra en la siguiente figura 44.

Figura 44. Área de transferencia de las aletas en el serpentín.



$$A_f = 2 \left(ca - \pi \frac{D_o^2}{4} * 96 \right) N_A = 2 * \left(0.135 * 0.694 - \pi \frac{(17.1 * 10^{-3})^2}{4} * 96 \right) * 312,$$

entonces

$$A_f = 122.66 \text{ m}^2$$

El área de transferencia de los tubos es $A_{Tubos} = (b - N_A t) D_o N_{TT}$, donde

$N_{TT} = 48$ es el número de tubos que transfieren calor. Entonces:

$$A_{Tubos} = (0.721 - 312 * 0.397 * 10^{-3}) * 17.1 * 10^{-3} * 48 \text{ luego } A_{Tubos} = 0.49 \text{ m}^2.$$

El área total de transferencia es $A = A_{Tubos} + A_f = (0.49 + 122.66)m^2$, entonces

$A = 123.15 m^2$. El diámetro hidráulico, D_h viene dado por $D_h = \frac{4S_{ff}c}{A}$

entonces, $D_h = \frac{4 * 0.169 * 0.135}{123.15} = 0.00074 m$ entonces $D_h = 0.74 mm$

Ahora $\sigma = \frac{S_{ff}}{S_f}$ donde el área frontal es $S_f = ab = 0.694 * 0.721 = 0.5 m^2$. Luego:

$\sigma = \frac{0.169 m^2}{0.5 m^2}$. Entonces $\sigma = 0.338$

Además $\alpha = \frac{A}{Volumen Total} = \frac{123.15 m^2}{0.694 * 0.721 * 0.135 m^3} \Rightarrow \alpha = 1823.1 \frac{m^2}{m^3}$ y

$\frac{A_f}{A} = \frac{122.66 m^2}{123.15 m^2} \Rightarrow \frac{A_f}{A} = 0.996$.

Por otro lado, el área de transferencia interna de los tubos la calculamos por:

$A_i = 48\pi b D_i$, por tanto

$A_i = 48\pi * 0.721 * 15.1 * 10^{-3}$, luego

$A_i = 1.64 m^2$

La tabla 15 muestra el resumen de todos los parámetros geométricos del serpentín.

Tabla 15. Resumen de todos los parámetros geométricos del serpentín.

Diámetro exterior de los tubos	$D_o = 17.1 \text{ mm}$
Espaciado de Aletas	$433 \frac{\text{Aletas}}{m}$
Diámetro hidráulico de paso	$D_h = 0.74 \text{ mm}$
Espesor de Aleta	$t = 0.397 \text{ mm}$
Área libre de flujo / Área frontal $\frac{S_{ff}}{S_f}$	$\sigma = 0.338$
Área total de transferencia / Volumen total	$\alpha = 1823.1 \frac{m^2}{m^3}$
Área de aletas / Área total de transferencia	$\frac{A_f}{A} = 0.996$
Área total de transferencia de calor	$A = 123.15 m^2$
Área interna de transferencia	$A_i = 1.64 m^2$

- **Cálculo del coeficiente de convección externo h_e .** La velocidad de masa

máxima G viene dada por $G = \frac{\dot{m}_a}{\sigma S_f}$ y al reemplazar valores:

$$G = \frac{\dot{m}_a}{0.338 * 0.5} = 5.92 \dot{m}_a, \text{ ahora como el número de reynolds es } Re = \frac{GD_h}{\mu},$$

entonces $Re = \frac{5.92 m_a * 0.74 * 10^{-3}}{177 * 10^{-7}} \Rightarrow Re = 247.5 \dot{m}_a$. De acuerdo al relación

entre Re y el factor de Colburn J_H , $J_H = 0.1691 Re^{-0.3984}$, tenemos que

$$J_H = 0.1691 \left(247.5 \dot{m}_a \right)^{-0.3984}, \text{ entonces } J_H = 0.01882 \left(\dot{m}_a \right)^{-0.3984}$$

Ahora como $J_H = \frac{h_e}{G C_{pa}} \text{Pr}^{\frac{2}{3}}$, entonces $h_e = \frac{G C_{pa} J_H}{\text{Pr}^{\frac{2}{3}}}$, para que

$$h_e = \frac{5.92 \dot{m}_a * 1006.7 * J_H}{0.711^{\frac{2}{3}}} = 7481.27 \dot{m}_a J_H = 7481.27 \dot{m}_a * 0.01882 \left(\dot{m}_a \right)^{-0.3984} = 140.64 \left(\dot{m}_a \right)^{0.6016}$$

Dado que el valor de $\dot{m}_a$ es conocido pues será asumido, entonces se podrá calcular h_e .

- **Cálculo del coeficiente de convección interno h_i .** Aquí el reynolds es

$\text{Re}_D = \frac{4 \dot{m}_{we}}{\pi D_i \mu_w}$, donde $\dot{m}_{we}$ es la masa de agua que entra por un solo tubo,

luego la masa que se suministra desde la bomba $\dot{m}_w$ y que entra por 6 tubos

se relaciona con $\dot{m}_{we}$ mediante la expresión $\dot{m}_{we} = \frac{\dot{m}_w}{6}$, por tanto el numero

de reynolds queda $\text{Re}_D = \frac{4 \dot{m}_{we}}{\pi D_i \mu_w} = \frac{2}{3} \frac{\dot{m}_w}{\pi * 15.1 * 10^{-3} * 1422 * 10^{-6}} = 9882.85 \dot{m}_w$.

Ahora se calcula el número de Nuselt Nu_D ; pero este número depende si el régimen es laminar o turbulento, así:

➤ Si $\text{Re}_D \geq 10000$, entonces el flujo es turbulento y $Nu_D = 0.023 \text{Re}_D^{\frac{4}{5}} \text{Pr}^{0.4}$,

entonces $Nu_D = 0.023 (9882.85 \dot{m}_w)^{\frac{4}{5}} (10.26)^{0.4}$, luego $Nu_D = 91.64 (\dot{m}_w)^{0.8}$.

➤ Si $Re_D < 10000$, entonces el flujo es laminar y

$$Nu_D = 3.66 + \frac{0.0668 \left(\frac{D_i}{L} \right) Re Pr}{1 + 0.04 \left[\left(\frac{D_i}{L} \right) Re Pr \right]^{\frac{2}{3}}} \text{ donde } L = b = 0.721m \text{ es la longitud de los}$$

tubos. Entonces $Nu_D = 3.66 + \frac{0.0668 \left(\frac{15.1 * 10^{-3}}{0.721} \right) 9882.85 \dot{m}_w * 10.26}{1 + 0.04 \left[\left(\frac{15.1 * 10^{-3}}{0.721} \right) 9882.85 \dot{m}_w * 10.26 \right]^{\frac{2}{3}}}$, luego

$$Nu_D = 3.66 + \frac{141.91 \dot{m}_w}{1 + 6.61 * (\dot{m}_w)^{\frac{2}{3}}}.$$

Ahora como $h_i = \frac{K_w}{D_i} Nu_D$, entonces $h_i = \frac{582 * 10^{-3}}{15.1 * 10^{-3}} Nu_D$, luego $h_i = 38.54 Nu_D$.

De modo que:

➤ Si $Re_D \geq 10000$, entonces $h_i = 38.54 * 91.64 (\dot{m}_w)^{0.8}$ luego

$$h_i = 3532.08 (\dot{m}_w)^{0.8}$$

➤ Si $Re_D < 10000$, entonces $h_i = 38.54 \left(3.66 + \frac{141.91 \dot{m}_w}{1 + 6.61 * (\dot{m}_w)^{\frac{2}{3}}} \right)$, luego

$$h_i = 141.1 + \frac{5469.21 \dot{m}_w}{1 + 6.61 * (\dot{m}_w)^{\frac{2}{3}}}.$$

Como la $\dot{m}_w$ es conocida entonces es posible hallar h_i .

- **Cálculo de R_w .**

$$R_w = \frac{\ln\left(\frac{D_o}{D_i}\right)}{2\pi L K_{Cu}}, \text{ entonces } R_w = \frac{\ln\left(\frac{17.1}{15.1}\right)}{2\pi * 0.721 * 404.8} = 6.78 * 10^{-6} \frac{K}{W}$$

- **Cálculo de η_s .** El valor de η_s se calcula por medio de la ecuación

$$\eta_s = 1 - \frac{A_f}{A} (1 - \eta_f) \text{ donde } \eta_f \text{ es la eficiencia de una aleta, que a su vez viene}$$

$$\text{dada por } \eta_f = \frac{\tanh(mr\phi)}{mr\phi} \text{ donde } m = \sqrt{\frac{2h}{kt}}, \text{ para esta ecuación } h = h_e, \text{ entonces}$$

$$m = \sqrt{\frac{2h_e}{404.8 * 0.397 * 10^{-3}}} = 3.53\sqrt{h_e} \text{ y } r \text{ es el radio externo de los tubos:}$$

$$r = 8.55 \text{ mm}.$$

El parámetro ϕ está dado por la ecuación $\phi = \left(\frac{R_e}{r} - 1\right) \left[1 + 0.35 \ln\left(\frac{R_e}{r}\right)\right]$ y la

relación $\frac{R_e}{r}$ se calcula por $\frac{R_e}{r} = 1.27 \frac{M}{r} \left(\frac{L}{M} - 0.3\right)^{\frac{1}{2}}$ y los valores de L y M

son las medidas que se muestran en la figura 44. Como el arreglo para el serpentín es a 45° , entonces tenemos las distancias correspondientes y que se muestran en la figura 45.

Figura 45. Valores de L y M para el arreglo del serpentín.

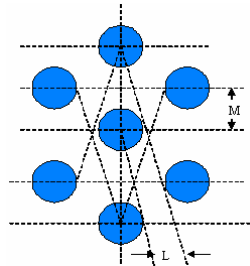
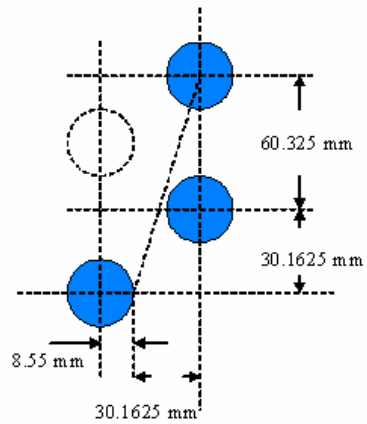
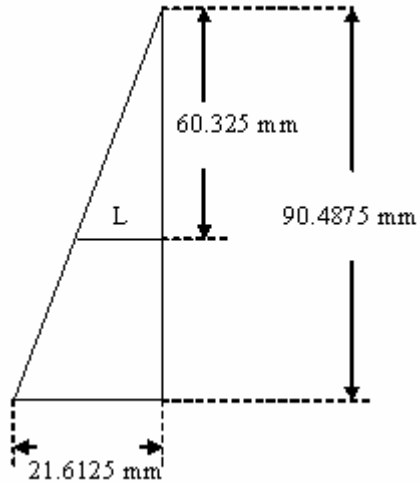


Figura 46. Distancias entre tubos en el serpentín.



Y si consideramos el triángulo de la figura 47

Figura 47. Triángulo de distancias en el serpentín



Establecemos las proporciones: $\frac{60.325}{L} = \frac{90.4875}{21.6125}$, entonces $L = 14.41 \text{ mm}$ y

$M = 30.1625 \text{ mm}$.

Luego tenemos $\frac{R_e}{r} = 1.27 \frac{30.1625}{8.55} \left(\frac{14.41}{30.1625} - 0.3 \right)^{\frac{1}{2}}$, entonces $\frac{R_e}{r} = 1.89$. Por

tanto:

$\phi = (1.89 - 1)[1 + 0.35 \ln(1.89)]$, luego $\phi = 1.09$. Reemplazando estos parámetros, obtenemos:

$$\eta_f = \frac{\tanh(3.53\sqrt{h_e} * 8.55 * 10^{-3} * 1.09)}{3.53\sqrt{h_e} * 8.55 * 10^{-3} * 1.09} \text{ entonces } \eta_f = \frac{\tanh(0.033\sqrt{h_e})}{0.033\sqrt{h_e}}, \text{ para que}$$

$$\eta_f = 30.45 \frac{\tanh(0.033\sqrt{h_e})}{\sqrt{h_e}}. \text{ Al reemplazar en la eficiencia global, tenemos:}$$

$$\eta_s = 1 - 0.996 \left(1 - 30.45 \frac{\tanh(0.033\sqrt{h_e})}{\sqrt{h_e}} \right),$$

$$\text{luego } \eta_s = 0.004 + 30.33 \frac{\tanh(0.033\sqrt{h_e})}{\sqrt{h_e}}.$$

- **Procedimiento de cálculo.** Se calculará el calor que se puede extraer del recinto, las temperaturas de salida del aire y del agua después de pasar por este intercambiador. El procedimiento a seguir es iterativo utilizando las siguientes ecuaciones:

$$1. \quad h_e = 140.64 \left(\dot{m}_a \right)^{0.6016} \left[\frac{W}{m^2 K} \right]$$

$$2. \quad Re_D = 9882.85 \dot{m}_w$$

Si $Re_D \geq 10000$ entonces

$$2.1 \quad h_i = 3532.08 (\dot{m}_w)^{0.8} \left[\frac{W}{m^2 K} \right]$$

Si $Re_D < 10000$

$$2.2 \quad h_i = 141.1 + \frac{5469.21 \dot{m}_w}{1 + 6.61 * (\dot{m}_w)^{\frac{2}{3}}} \left[\frac{W}{m^2 K} \right]$$

3.

$$U_e A_e = \frac{1}{\frac{1}{1.64 h_i} + 1.4125 * 10^{-7} + \frac{1}{\left(0.004 + 30.33 \frac{\tanh(0.033 \sqrt{h_e})}{\sqrt{h_e}} \right) 123.15 h_e}} \left[\frac{W}{K} \right]$$

$$4. \quad \dot{Q}_1 = 0.286263 \dot{m}_a (Ta_1 - Ta_2) \quad [Ton]$$

Donde $\dot{Q}$ es el calor intercambiado, $\dot{m}_a$ es la masa de aire.

$$5. \quad Tw_1 = Tw_2 + \frac{0.83776}{\dot{m}_w} \dot{Q}_1 \quad [^{\circ}C]$$

$$6. \quad LMTD = \frac{Ta_2 + Tw_1 - Ta_1 - Tw_2}{Ln \left(\frac{Ta_2 - Tw_2}{Ta_1 - Tw_1} \right)} \quad [^{\circ}C]$$

$$7. \quad R = \frac{Ta_1 - Ta_2}{Tw_1 - Tw_2}$$

$$8. \quad P = \frac{Tw_1 - Tw_2}{Ta_1 - Tw_2}$$

Con los valores de R y P se busca el valor del factor de corrección F e la $LMTD$.

$$9. \quad \dot{Q}_2 = 2.8436 * 10^{-4} F U_e A_e LMTD \quad [Ton]$$

Se dan los valores de

$\dot{m}_w$: Masa de agua.

$\dot{m}_a$: Masa de aire.

Ta_1 : Temperatura de entrada del aire.

Tw_2 : Temperatura de entrada del agua.

Los CFM y el caudal de agua Q_w se calculan mediante las expresiones:

$$CFM = 1728.28 \dot{m}_a \text{ y } Q_w = 15.85 \dot{m}_w$$

El procedimiento operativo es el siguiente:

1. Con el valor de $\dot{m}_a$ se calcula h_e de **1**.
2. Con el valor de $\dot{m}_w$ se calcula Re_D de **2**.
3. De acuerdo si $Re_D \geq 10000$ o $Re_D < 10000$ se calcula h_i de **2.1** o **2.2**.
4. Se calcula $U_e A_e$ de **3**.
5. Se asume Ta_2
 - Se calcula $\dot{Q}_1$ de **4**.
 - Se calcula Tw_1 de **5**.
 - Se calcula $LMTD$ de **6**.
 - Se calcula R de **7**.
 - Se calcula P de **8**.
 - Se halla el factor de corrección F de la $LMTD$.
 - Se calcula $\dot{Q}_2$ de **9**.

Si $\dot{Q}_1 = \dot{Q}_2$ mostrar:

T_{a1} : Temperatura de entrada del aire en °C.

T_{w2} : Temperatura de entrada del agua en °C.

T_{a2} : Temperatura de salida del aire en °C.

T_{w1} : Temperatura de salida del agua en °C.

CFM : Impulsados por el ventilador.

Q_w : El caudal de agua que envía la bomba en GPM.

$\dot{Q}$: El calor que retira el serpentín del recinto.

La interfaz gráfica del programa que efectúa el anterior cálculo es la que se muestra en la figura 48.

Figura 48. Interfaz gráfica del programa que calcula la cantidad de calor que el serpentín puede saca del recinto, así como las temperaturas de salida del aire y agua.

AIRE ACONDICIONADO

Datos de Entrada

Temperatura de Entrada del Aire [°C]

Temperatura de Entrada del Agua[°C]

CFM de aire

Caudal de Agua [gpm]

RESULTADOS

Masa de Aire [Kg/s]

Masa de Agua [Kg/s]

Temperatura de Entrada del Aire [°C]

Temperatura de Salida del Aire[°C]

Temperatura de Entrada del Agua

Temperatura de Salida del Agua[°C]

CFM impulsados

Caudal de Agua [gpm]

Calor sacado en el serpentín [Ton]

5. INFORMACIÓN Y GUIA PARA MANTENIMIENTO

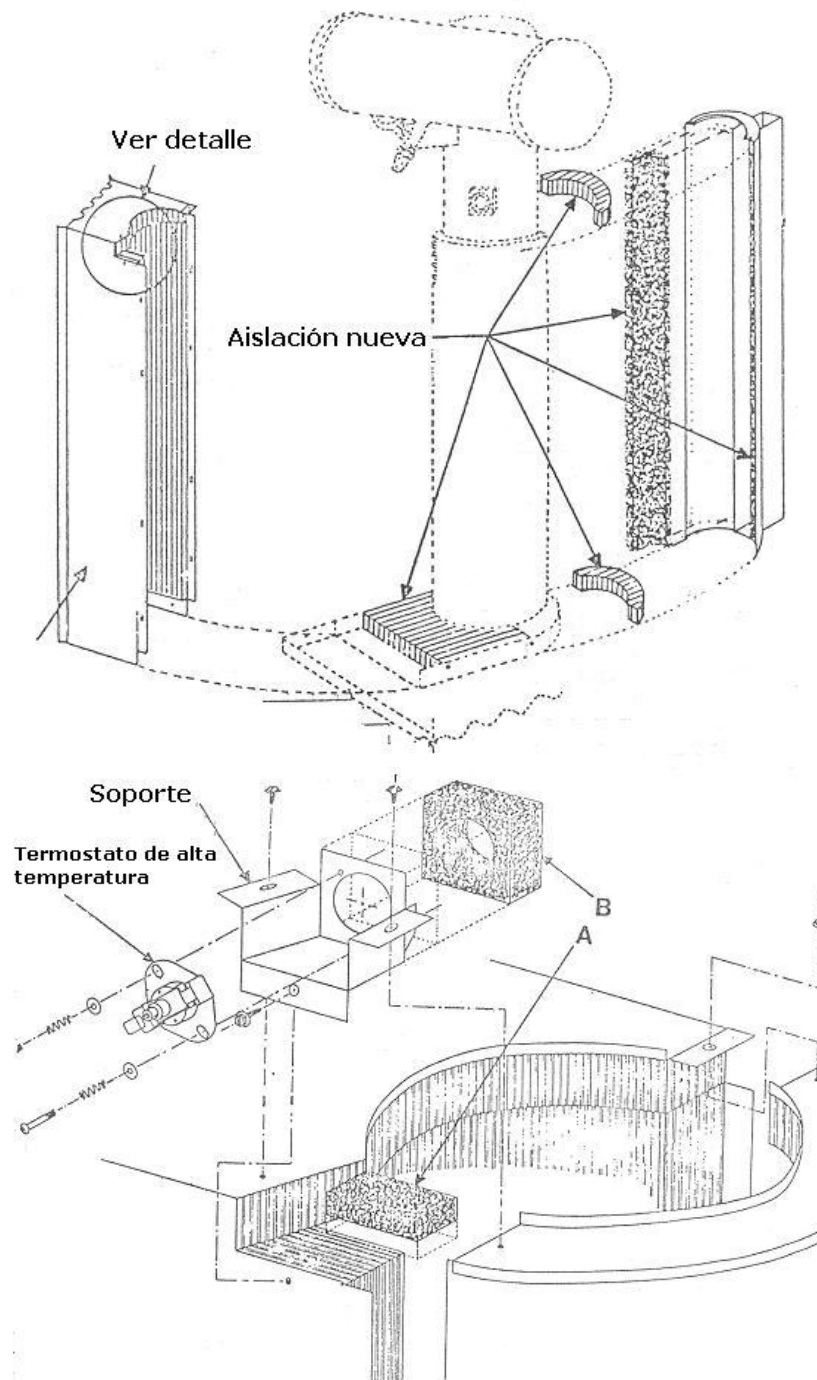
5.1. LIMPIEZA DEL GENERADOR

1. Cortar el suministro de gas y electricidad de la unidad.
2. Desmontar el panel superior y el panel frontal.
3. desmontar los soportes izquierdos del motor del ventilador.
4. Desmontar el panel lateral izquierdo.
5. Desconectar los cables del sensor de llama y de la bujía de encendido.
6. Desmontar el quemador.
7. Desmontar la chapa protectora que hay entre el generador y el tablero.
8. Desmontar el cubre correa.
9. Sacar la correa en V.
10. Desconectar los cables del motor de la bomba.
11. Vaciar la bomba hidráulica.
12. Desconectar la línea hidráulica de la bomba.
13. Desconectar la bomba de agua fría.
14. Sacar el sistema de accionamiento de las bombas.
15. Sacar la chapa que separa el generador del tanque de agua fría.
16. Sacar el termostato de alta temperatura del generador, cuidando no dañar el aislamiento.
17. Desarmar la envoltura frontal del generador.
18. Sacar hacia arriba la envoltura frontal.
19. Sacar hacia arriba la envoltura trasera del generador.
20. Con un cepillo blando limpiar el aislamiento de la envoltura del generador. No usar agua.
21. Con un cepillo de alambre limpiar las aletas del generador.

22. Instalar la envoltura trasera nuevamente.
23. Instalar la envoltura frontal nuevamente.
 - a) Colocarla en su posición correcta.
 - b) Colocar la plancha “A” de aislamiento con cuidado. Tiene que ser ubicada entre la aleta del generador y el soporte de control de alta temperatura.
 - c) Colocar el control de alta temperatura en su soporte sin ajustarlo
 - d) Colocar el aislamiento protector “B” sobre el termostato de alta temperatura. Controlar que no haya aislamiento entre el control y el generador.
24. Fijar firmemente el control de alta temperatura a su soporte.
25. Reinstalar las partes desmontadas en orden inverso.
26. Controlar todos los ajustes y operación de la unidad.

En la figura 49 se ilustra el generador desarmado listo para su limpieza.

Figura 49. Desarme del generador para su limpieza.



5.2. LIMPIEZA DE LAS SERPENTINAS DEL CONDENSADOR- ABSORBEDOR.

Las serpentinas del condensador y absorbedor enfriado por aire conforman una unidad que comparten las aletas de enfriamiento, como se ilustra en la figura 50..

La capacidad de refrigeración del equipo disminuye sensiblemente cuando las serpentinas del condensador y absorbedor se encuentran sucias. Se recomienda inspeccionarlas y limpiarlas periódicamente.

Procedimiento de limpieza.

1. Cortar el suministro de gas y electricidad de la unidad.
2. Desmontar todos los paneles.
3. Desmontar el collar superior en U de las serpentinas.
4. Quitar la suciedad, con un cepillo, de la superficie exterior de la serpentina del absorbedor y de la superficie interior del condensador.
5. Usando agua a presión, lavar las serpentinas desde adentro hacia afuera y de arriba hacia abajo.
6. Posicionando la manguera de agua hacia abajo, entre las dos serpentinas, lavarlas en toda su longitud.
7. Lavar nuevamente las serpentinas de adentro hacia afuera.
NOTA: Si se utilizan líquidos detergentes para la limpieza, tener cuidado que los solventes no dañen las aletas de aluminio o su pintura.
8. Inspeccionar las serpentinas para controlar su limpieza.
9. Armar los paneles.

Figura 50. Serpentina del condensador absorbedor



5.3. SERVICIO GENERAL

Las causas más frecuentes de requerimiento de servicio se deben a la disminución parcial o total de la capacidad de enfriamiento de los equipos.

Para detectar rápidamente la falla, el técnico de servicio debe seguir en orden exacto el siguiente procedimiento.

1. Verificar el aspecto general de la instalación, las bases y niveles de la unidad. Si hubiere una mancha amarilla (inhibidor de la solución) u olor a amoníaco, esto puede indicar una fuga en la unidad sellada.
2. Controlar que no haya obstáculos tales como arbustos, hojas que vayan a dificultar la circulación del aire a través del condensador-absorbedor.
3. Controlar el ventilador del absorbedor: sus soportes, libertad de giro, estado de las mensuras, etc.

4. desmontar el cubre poleas y verificar el estado de la correa. Reemplazarla si fuere necesario.
5. Sacar la tapa de la bomba Hidráulica y verificar el nivel de líquido. El nivel apropiado es de 30mm. Desde el borde del cabezal abierto.
Si el nivel es extremadamente bajo, no agregar aceite hasta que se determine la causa, si hay una perdida, debe ser reparada

PRECAUCIÓN: Si hay perdida aparente de líquido hidráulico y la bomba está con muy bajo nivel, y se percibe un extraño olor a amoníaco en al bomba hidráulica, significa que el diafragma de la bomba esta roto. Debe ser reparado.

6. Cerrar la válvula de gas
7. Controlar el nivel de agua en el tanque del enfriador, y la cañería de agua fría.
8. Controlar la unidad de tratamiento de aire
 - a) Estado de los filtros.
 - b) Estado de las correas del ventilador.
 - c) Limpieza de las serpentinas.
 - d) Limpieza del desagüe del condensado
9. Suministrar fuerza motriz nuevamente a la instalación y ponerla en marcha mediante su sistema de comando.
10. Si el enfriador no arranca en 45 segundos, controlar el suministro de fuerza motriz (llaves Fusibles). Si el suministro de electricidad es normal, continuar con los trabajos de verificación en el tablero de la unidad como se indica a continuación
11. Con un voltímetro; controlar la tensión de fuerza motriz (220V).

12. Con un voltímetro controlar que la tensión entre los bornes R y O del tablero sea de 24V. Si no hay lectura cambiar el transformador.
13. Controlar el voltaje entre R y el borne sin número. Si hay lectura de voltaje entre estos dos puntos, indica que el control del límite de alta temperatura esta abierto, hay que reponerlo mediante su botón de reposición.
14. Controlar el voltaje entre R e Y. Esta lectura debe ser cero. La presencia de voltaje indica que hay un cable del termostato roto, o un problema en el termostato, o su sub-base, o en el relay de control del enfriador.
15. Si las verificaciones eléctricas realizadas indican que el sistema de comando esta en orden y la unidad no opera eléctricamente, esto indica que el relay de tiempo está defectuoso. Controlar la tensión a través de la bobina del relay R1. Si es de 24V la bobina está defectuosa, si no hay tensión el defecto está en el relay de tiempo. Si el ventilador no arranca, controlar el capacitor y el motor.
16. Detener la unidad. Verificar la limpieza de las serpentinas del condensador y absorbedor, inspeccionar la totalidad de las superficies y el espacio entre ellas, pues pueden estar limpias de un lado y sucias del otro. Limpiar de acuerdo a las instrucciones.
17. Controlar el sistema de agua fría, su limpieza, nivel de agua, y caudal de agua. Realizar los ajustes que fuesen necesarios de acuerdo a **2.2.1 inciso 2**
18. Controlar la altura del ventilador del condensador. Ajustar si es necesario de acuerdo a **2.2.1 inciso 6**
19. Controlar el estado del generador, quemador, sistema de encendido y orificios.
20. Con la unidad operando eléctricamente, abrir la válvula de gas (posición "ON"). El quemador tiene que encender, si esto no ocurre controlar el sistema de encendido (**2.2.2**)

21. Conectar el voltímetro entre los terminales de la válvula de gas, si no hay tensión, el control de flujo de aire esta abierto.
 - a) Si hubiese 24V y la válvula de gas no abre, remplazar el operador de la válvula de gas.
22. Con la unidad operando eléctricamente y el quemador encendido, girar el termostato a la posición "OFF" o desconectar el cable Y del tablero. La válvula de gas debe cerrarse.
 - a) NOTA: teniendo el equipo operando con su quemador encendido nunca debe ser detenido cortando el suministro de fuerza motriz (220V).
23. Los motores del ventilador y de accionamiento de las bombas, continúan funcionando durante un periodo mínimo de tres minutos y un máximo de cuatro después de detener la unidad por circuito de comando. Si funcionan menos de tres o más de cuatro minutos, remplazar el relay de tiempo.
24. Energizar nuevamente el circuito de 24V. Con un voltímetro controlar los terminales de la válvula de gas. Si hay voltaje antes de que arranque el ventilador, indica que el contacto de control de flujo de aire está pegado y por lo tanto debe ser remplazado.
25. Controlar el suministro de 220V de la unidad.
26. Verificar el nivel del líquido de la bomba hidráulica según (2.2.1)
27. Energizar nuevamente la unidad (circuito de 220V y 24V).
28. Ajustar el consumo de gas de acuerdo con las instrucciones (2.2.1 inciso 3).
29. Apoyando firmemente la palma de la mano sobre la boca de llenado de la bomba hidráulica, se sentirán las pulsaciones de la misma. El número de pulsaciones por minuto es de 104. Si no se sienten las pulsaciones proceder según (5.6)

30. Dejar operar la unidad por un tiempo mínimo de 15 minutos, con su equipo de aire en marcha para asegurar la carga térmica. La circulación de aire a través de todas las rejillas de alimentación y retorno debe ser correcta.
31. Efectuar un control completo del acondicionador de aire, serpentina, ventilador, como así también los caudales de aire y de agua fría.
32. Ajustar la velocidad del aire para obtener una diferencia de temperaturas de 10°C a 12°C. Entre retorno y alimentación.
33. La diferencia de temperatura entre alimentación y retorno de agua debe ser 4°C-5.5°C.
34. Si la diferencia de temperatura de agua fría a través de la unidad es menor de 4.5°C con el caudal de agua nominal, significa que el equipo no enfría lo suficiente. Purgarlo según instrucciones (5.5.8).
35. Controlar la calibración del control de agua fría con un voltímetro en los terminales del control. Si hay lectura de voltaje el control está abierto.
 - a) El control de temperatura de agua fría debe abrir a 4.4°C y cerrar a 6°C -7°C.
 - b) NOTA: Si la carga térmica es grande, puede ser necesario disminuir el caudal de aire del acondicionador a efectos de alcanzar una temperatura de salida de agua fría de 4°C.

5.4. VERIFICACIÓN DEL CIRCUITO INTERNO.

La verificación del circuito interno de la unidad resultará sencillo si se realiza de acuerdo al siguiente procedimiento.

El no cumplimiento del orden establecido puede ocasionar análisis incorrecto.

NOTA: Durante la realización de los pasos 1. al 5:

Se debe desconectar el cable rojo del termostato de agua fría en los Equipos de encendido eléctrico.

1. Circulación de aire a través del condensador.
2. Nivel de la unidad.
3. Caudal de aire a través del acondicionador (carga térmica)
4. Caudal de agua.
5. Calibración y operación de los controles
6. Suministro de gas
7. Pulsación de la bomba de solución
8. Cortar el termostato o desconectar el cable del borne "Y".
9. Dejar que el equipo se detenga con su ciclo normal de retardo. Dejarlo parado durante 10 minutos como mínimo.
10. Durante este período conectar los manómetros.
 - a.) Usar manómetros con mangueras para cargar. Conectar los manómetros de baja al absorbedor y a la succión de la bomba de solución y el de alta al generador.
 - b.) Cerrar las válvulas de los manómetros.
 - c.) Abrir $\frac{1}{4}$ de vuelta las tres válvulas de servicio de la unidad.

5.5. ANÁLISIS DE LA UNIDAD.

En el paso A se analiza el funcionamiento de la bomba de solución. Si el manómetro en la válvula de purga oscila más de 5 minutos, la bomba debe ser remplazada antes de proseguir con la verificación.

PASO A.

1. Poner la válvula de gas en la posición "OFF"
 2. Poner en marcha la unidad.
 3. Observar el manómetro de la válvula de purga (bomba de solución).
 - ❖ Si la oscilación termina en cinco minutos, la bomba de solución tiene capacidad de vaciar el absorbedor. Continuar con los siguientes pasos.
- Si la oscilación continúa indefinidamente La bomba de solución no funciona, deberá ser remplazada
- ❖ Si no se produce oscilación, probablemente las cargas del equipo están fuera de su lugar (store out). Continuar con el paso B

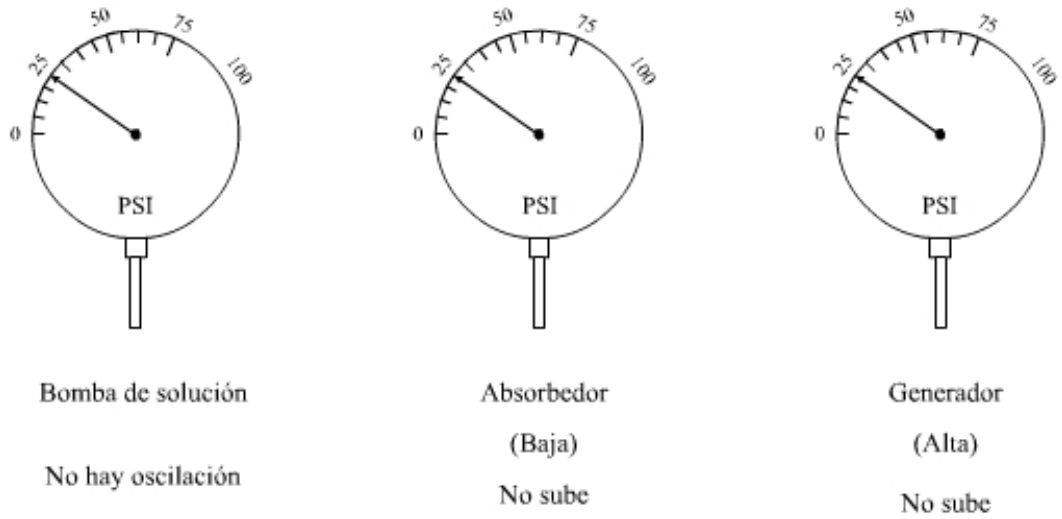
PASO B. Antes de continuar con el análisis debe mantenerse desconectado el cable rojo del termostato de agua fría.

- Abrir la válvula de gas
- Inmediatamente tocar el restrictor de solución. En pocos minutos debe calentarse. Esto indica que hay circulación de solución débil.

NOTA: Esta es solamente una verificación preliminar.

- Después de realizada esta verificación se deben observar los manómetros conectados a la unidad analizando el comportamiento de cada uno de ellos. Establecidas las presiones, se determina a cual de los casos corresponden.

Figura 51 Comportamiento de los manómetros cuando se presenta Store out del refrigerante



NOTA: Las líneas punteadas indican las presiones al arrancar la unidad

Figura 52. Comportamiento de los manómetros cuando se presenta el Store out de solución

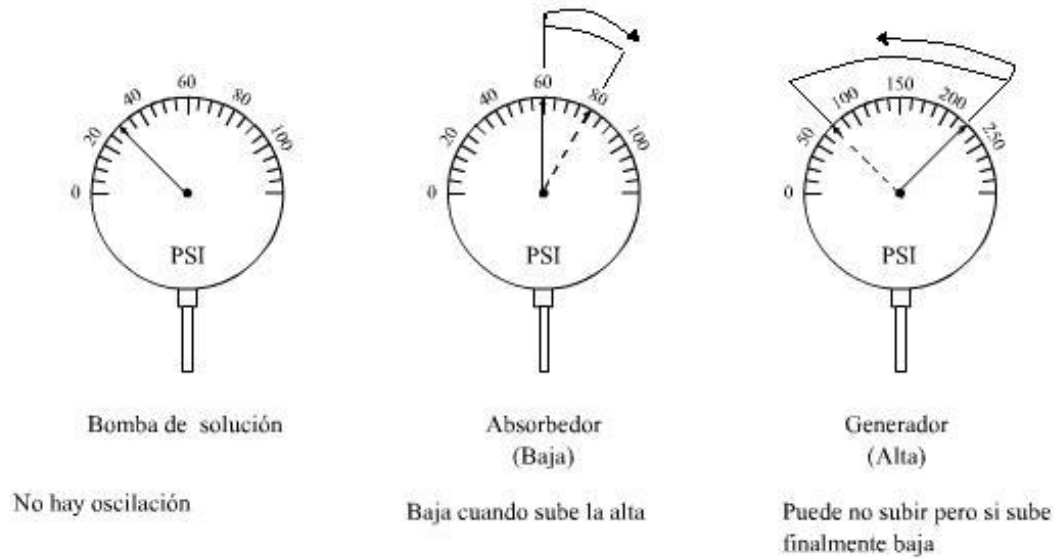


Figura 53. Comportamiento de los manómetros cuando el restrictor de solución parcialmente tapado

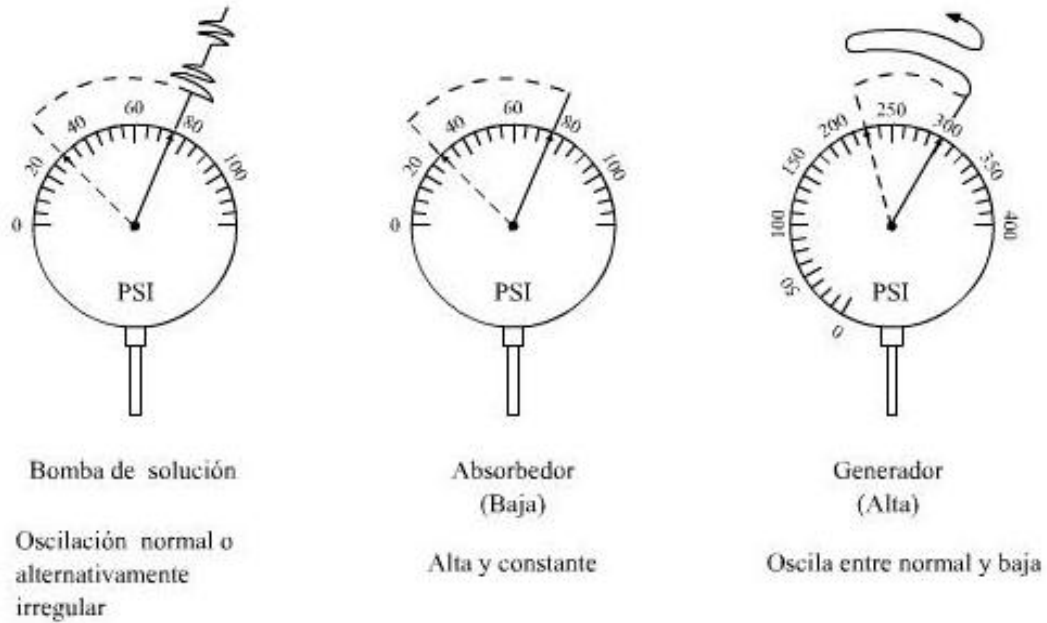
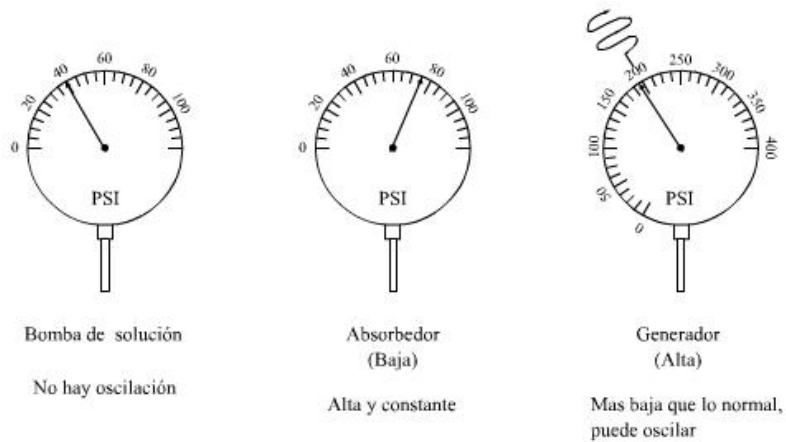
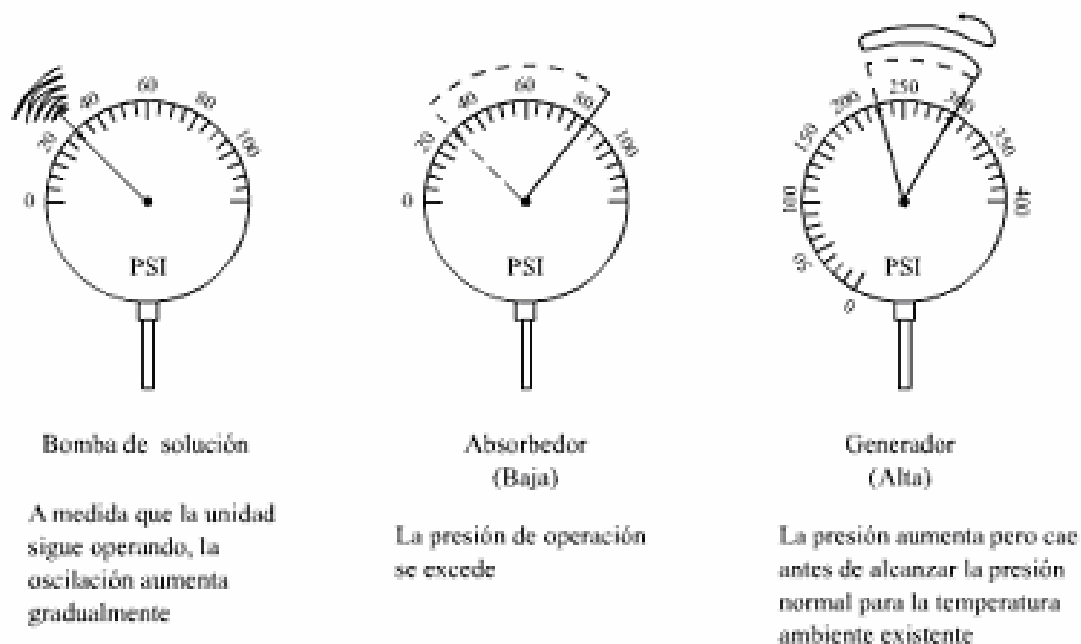


Figura 54. Comportamiento de los manómetros cuando el restrictor de la solución está tapado



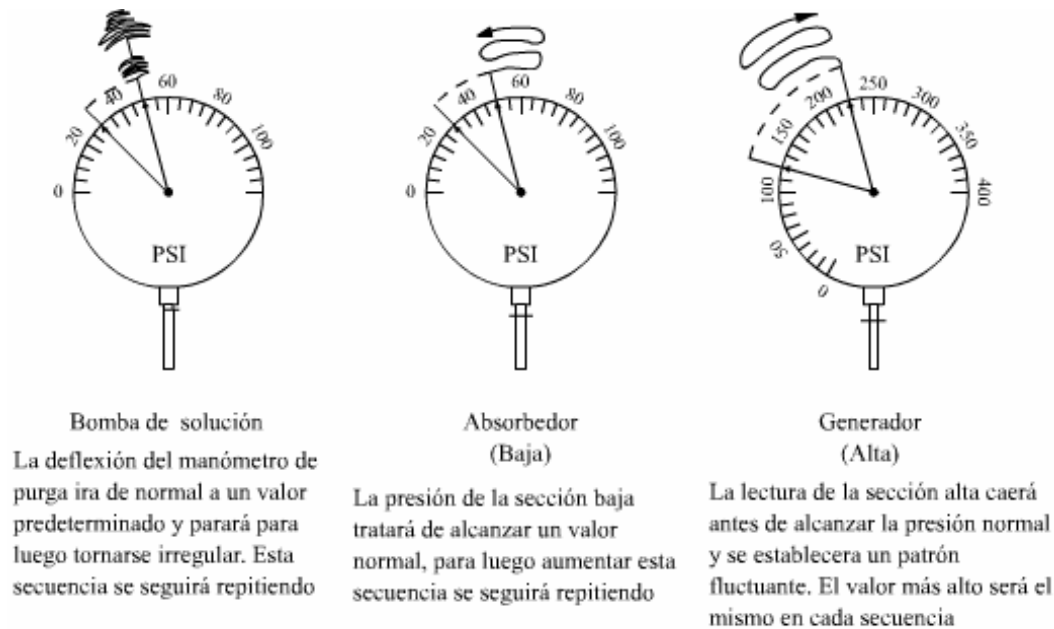
En los dos casos anteriores el restrictor de la solución debe ser remplazado.

Figura 55 Comportamiento de los manómetros cuando hay acomodo incorrecto de la válvula de control de flujo o la válvula check de la bomba de solución



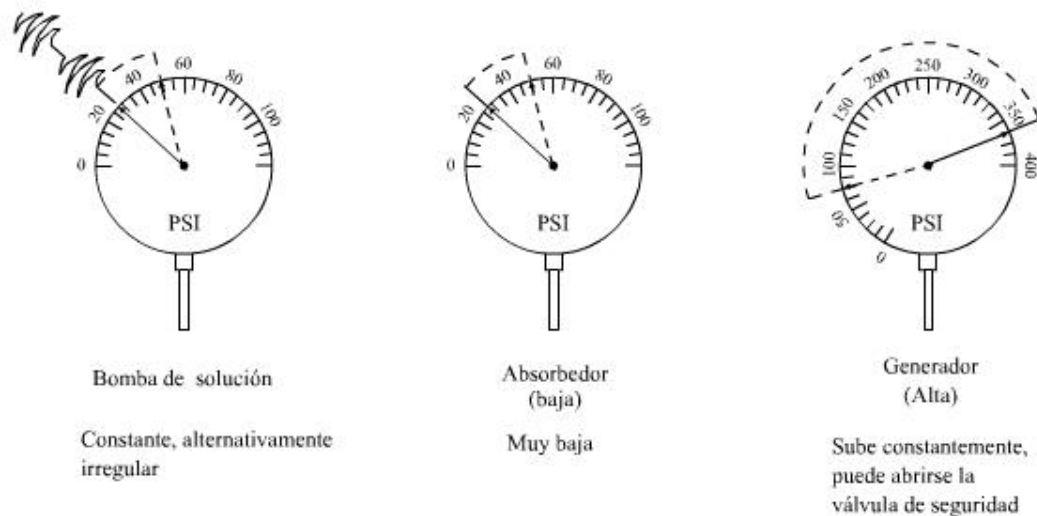
Si se presenta el caso de la figura 55 primero se debe revisar la válvula de control de flujo, si el patrón de presiones continua, cambie la bomba de solución.

Figura 56 Comportamiento de los manómetros cuando la válvula de control de flujo de la bomba hidráulica está defectuosa



Si se presenta el caso de la figura 56 la válvula de control de flujo debe ser cambiada.

Figura 57 Comportamiento de los manómetros cuando el restrictor del refrigerante está tapado

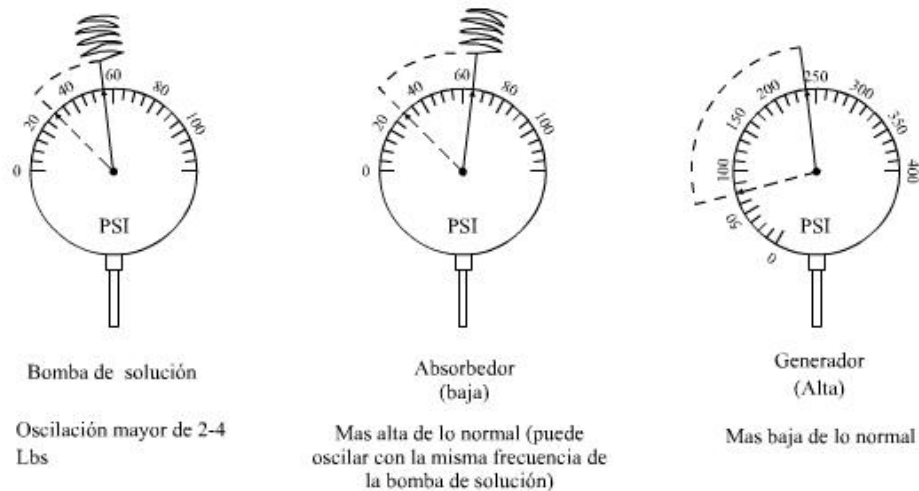


Si se presenta el caso de la figura 57, quiere decir que el restrictor del refrigerante está tapado. Y debe ser cambiado

Otro síntoma de que el restrictor del refrigerante está tapado es la congelación del caño de líquido en la restricción. En este caso el restrictor debe ser cambiado.

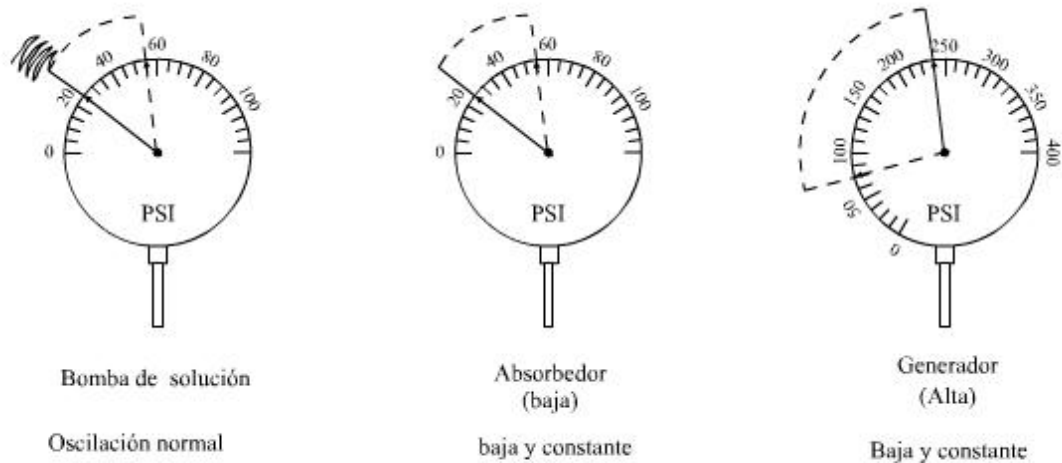
NOTA: Cortar el gas si la presión de alta se acerca a 400 psi.

Figura 58 Comportamiento de los manómetros cuando hay fugas en el absorbedor enfriado por solución



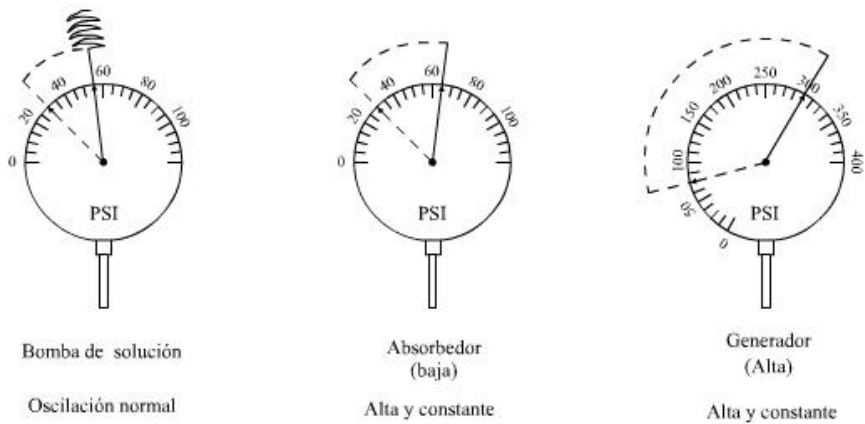
Si se presenta el caso presentado en la figura 58 el absorbedor debe ser remplazado

Figura 59. Comportamiento de los manómetros cuando hace falta refrigerante



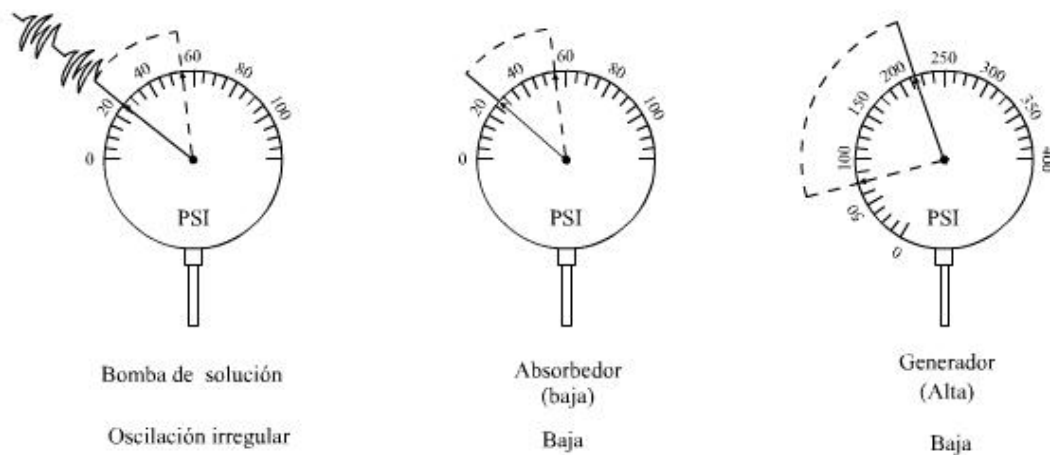
En este caso se debe agregar refrigerante a la unidad según 5.5.1

Figura 60. Comportamiento de los manómetros cuando hay exceso de refrigerante



En este caso el exceso de refrigerante debe ser extraído según 5.5.2

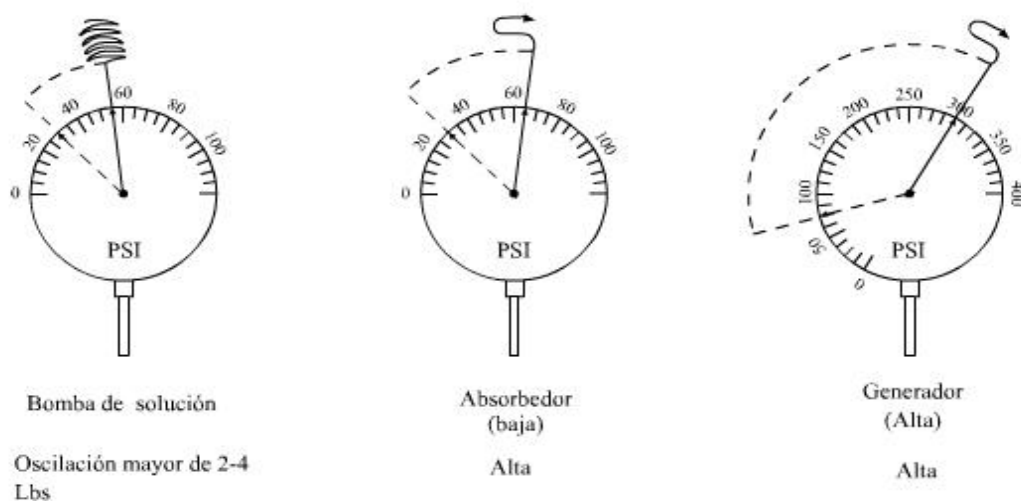
Figura 61. Comportamiento de los manómetros cuando la solución esta baja



En este caso cargue solución de acuerdo a 5.5.5

NOTA: Si falta mucha solución las presiones de baja y alta oscilaran desde valores inferiores hasta superiores a los normales.

Figura 62. Comportamiento de los manómetros cuando hay exceso de solución



En este caso el exceso de solución debe ser sacado de acuerdo a 5.5.6

NOTA: La sobrecarga excesiva ocasionará que las presiones de alta y baja oscilen entre valores inferiores hasta valores superiores a los normales.

En la tabla 16 se presentan las presiones normales de alta y de baja para diferentes temperaturas del ambiente

Tabla 16. Presiones normales de alta y de baja en la unidad ROBUR

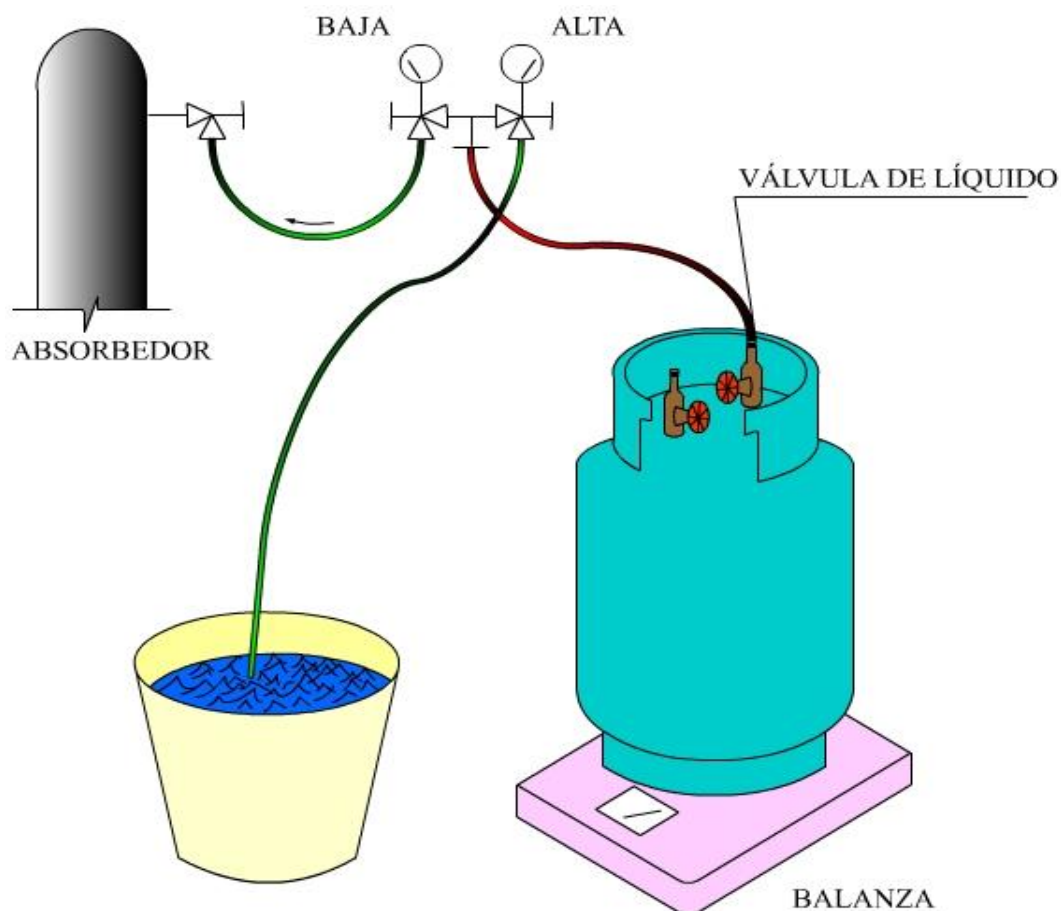
AIRE		BAJA ± 5 psi		ALTA ± 10 psi		PURGA (BOMBA)
$^{\circ}$ F	$^{\circ}$ C	PSI	Kg/cm ²	PSI	Kg/cm ²	FLUCTUACIÓN
60	15	20	1.35	180	11.5	10-15 Psi 0.6-1 Kg/cm ²
65	18	25	1.7	195	13.3	
70	21	29	2.0	210	14.3	
75	24	33	2.3	225	15.5	
80	26	38	2.6	240	16.5	
85	29	43	2.9	255	17.55	
90	32	48	3.3	270	18.5	
95	35	53	3.6	285	19.5	
100	38	57	3.9	305	21.0	
105	41	61	4.2	320	22.0	
110	44	65	4.4	340	23.3	Menor que la baja
115	46	68	4.6	355	24.3	

5.5.1 Carga de refrigerante. El agregado de refrigerante debe realizarse con la unidad operando.

1. conectar las mangueras como se indica en la figura 63.
2. Cierre ambas válvulas del cabezal con manómetros.
3. Purgar el aire de las mangueras. **NOTA:** El agregar 1 lb de refrigerante incrementará la presión de baja en 10 psi

4. Abra la válvula del líquido en el cilindro del refrigerante. Abra la válvula de la sección baja de la unidad $\frac{1}{4}$ de vuelta aproximadamente.
5. Ponga a operar la unidad.
6. Agregar el amoníaco en cantidades de medio kilogramo hasta que las presiones se normalicen. Dejar estabilizar las presiones antes de realizar una nueva carga.
7. Con las presiones estabilizadas, compare las presiones y las temperaturas con las de la tabla 16

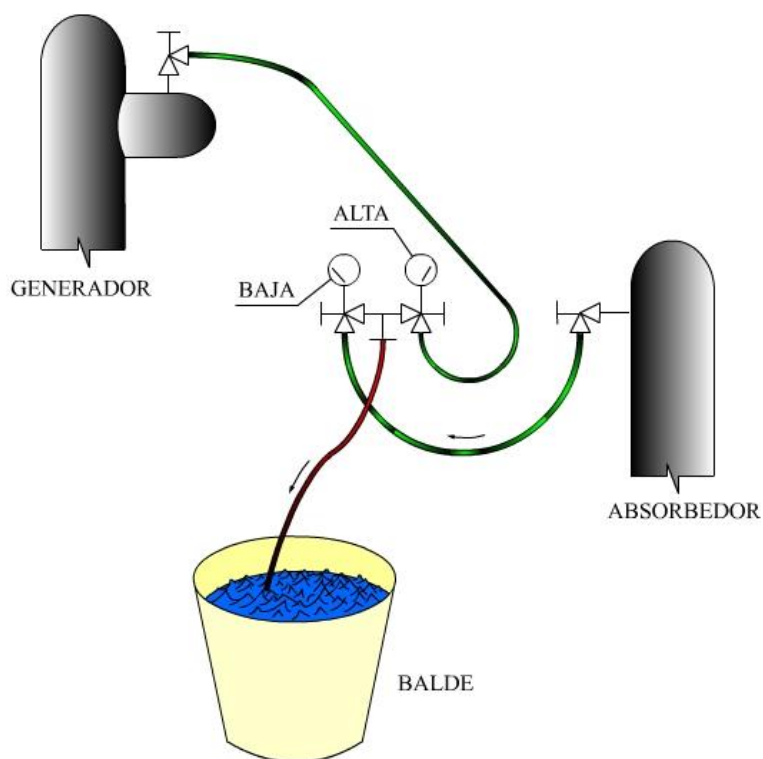
Figura 63. Disposición de las mangueras para cargar el refrigerante.



5.5.2 Extracción del exceso de refrigerante.

1. Conectar las mangueras como se indica en la figura 64.
2. Operar la unidad hasta que las presiones se estabilicen.
3. Purgar lentamente por el absorbedor hasta que la presión de baja se normalice (comparar con las presiones de la tabla 16). Esperar y controlar.

Figura 64. Disposición de mangueras para la extracción del exceso de refrigerante.

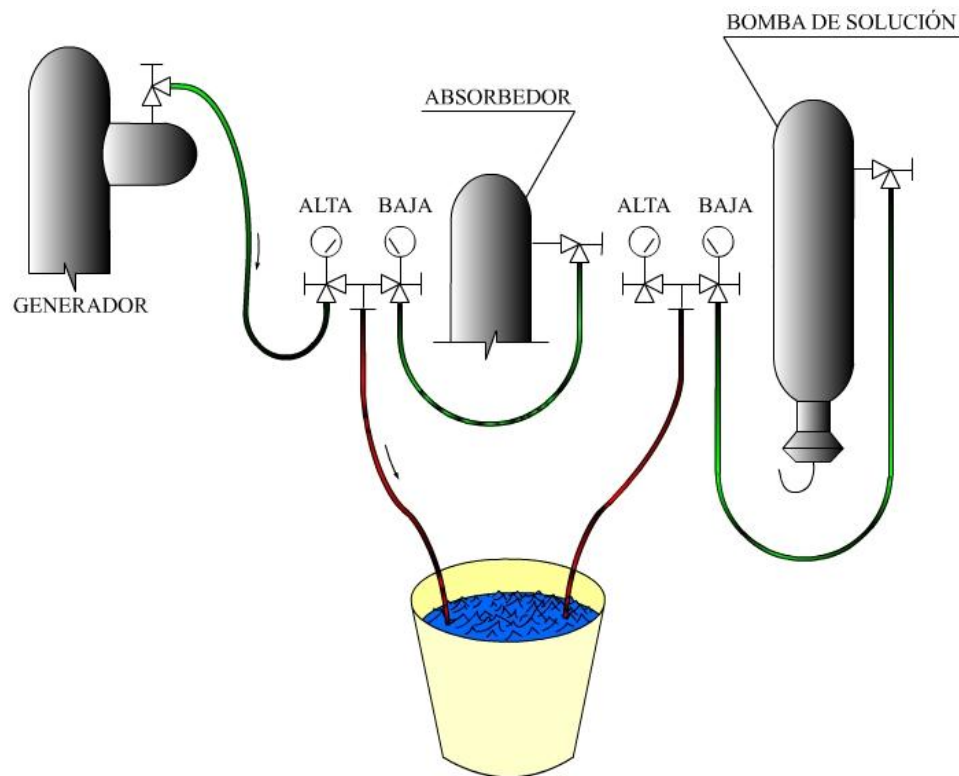


5.5.3 Control del nivel de solución.

- ❖ Conectar Las mangueras como se indica en la figura 65.
- ❖ Dejar operar el equipo hasta que la presión de alta llegue aproximadamente a 280 psi y la presión de baja a 45-60 psi.

- ❖ Mantener estas presiones por lo menos cinco minutos.
- ❖ Purgar muy suavemente el generador.
- ❖ Observar:
 - a) Si el nivel es correcto o bajo primero saldrá un poco de solución y después vapor. Si otros síntomas indican carga baja agregar solución.
 - b) Si la solución sale continuamente, el equipo está sobrecargado. Quitar el exceso de solución.

Figura 65. Disposición de mangueras para el control del nivel de solución.



La solución tiene que ser cargada y extraída en partidas de 1 Kg (la tolerancia de la carga de solución del equipo es aproximadamente 1 Kg).

- a) Agregar solución por la válvula del absorbedor.
- b) Sacar la solución por la válvula de la bomba.

5.5.4 Preparación de solución.

- ❖ Disolver en un balde media bolsita de inhibidor (250 Kg) en 10 litros de agua destilada.
- ❖ Sacar la válvula de vapor del cilindro y echar el preparado (Agua-Inhibidor).
- ❖ Reinstalar la válvula.
- ❖ Conectar y purgar las mangueras.
- ❖ Agregar 5 Kg de amoníaco líquido por cada 10 litros de preparado como se indica en la figura, purgando continuamente el cilindro de solución por su válvula de vapor.

Relación: 1 Kg NH_3 2Kg H_2O Inhibidor

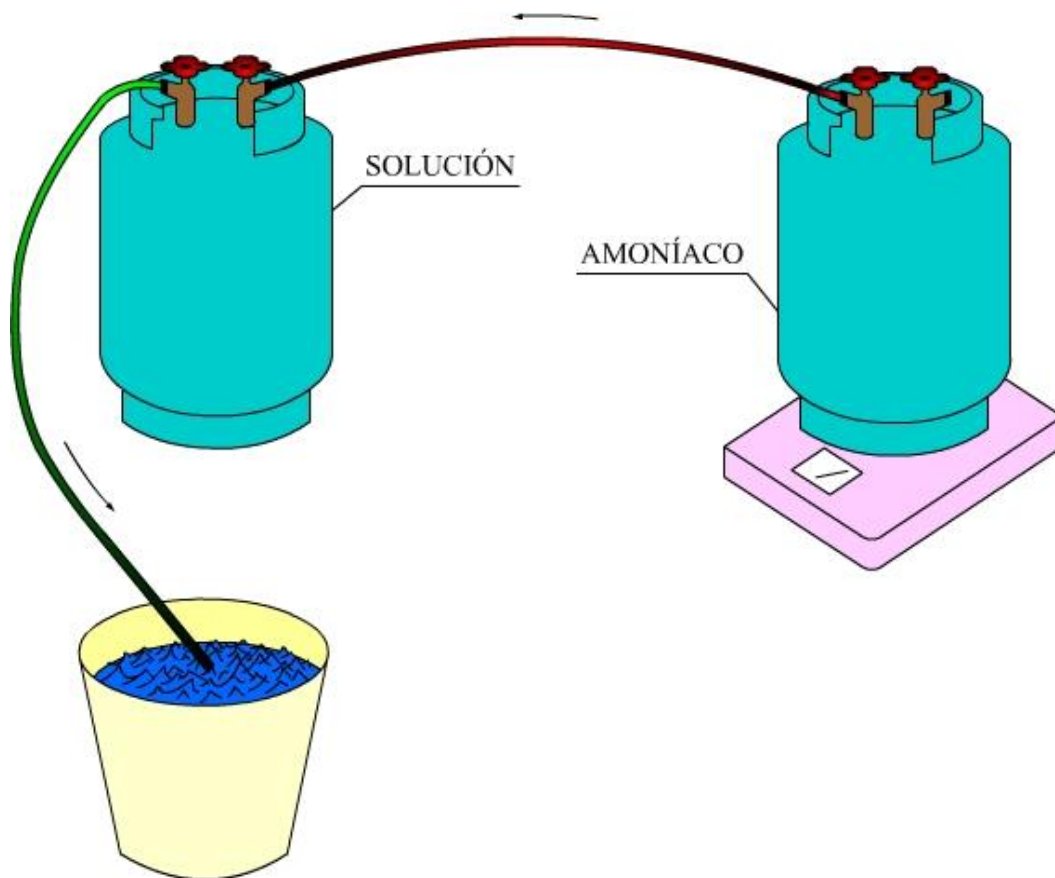
Concentración: 33%

- ❖ Terminado el proceso de carga de refrigerante, cerrar las válvulas, purgar y retirar las mangueras.

Nota: El inhibidor es venenoso, manipúlese con cuidado.

La figura 66 muestra la disposición de los tanques para efectuar la preparación de la solución.

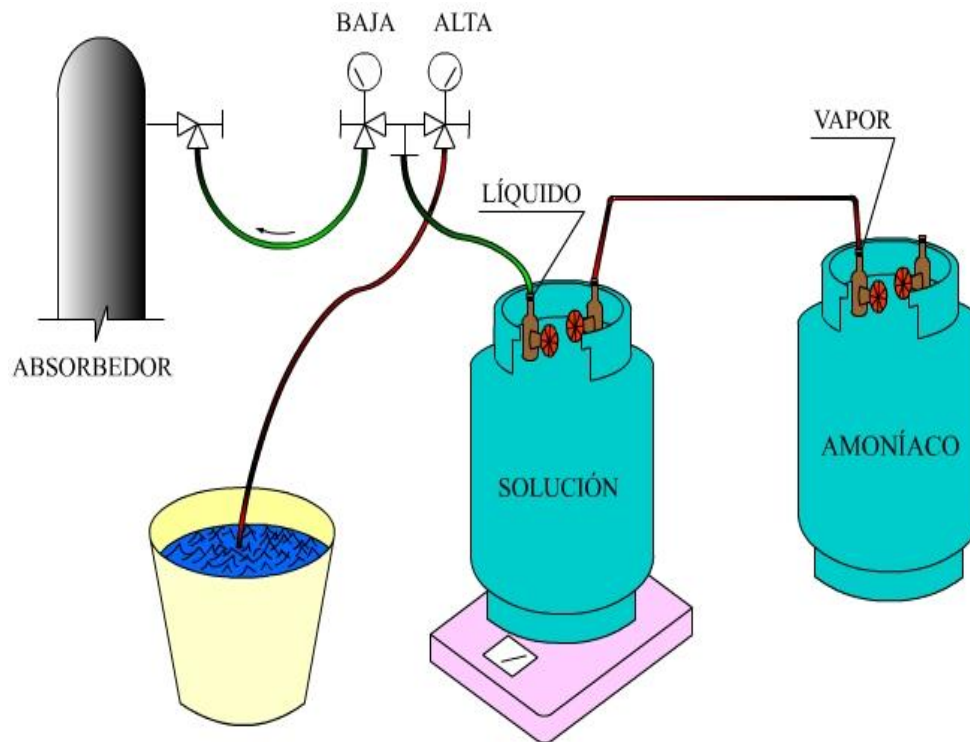
Figura 66. Disposición de tanques para la preparación de la solución



5.5.5 Carga de solución.

1. Conectar Las mangueras como se indica en la figura67.
2. Cerrar las válvulas del manifold.
3. Purgar la línea del absorbedor.
 - a.) Abrir la válvula del absorbedor
 - b.) Abrir la válvula de alta del manifold.
 - c.) Abrir un poco la válvula de baja del manifold hasta que salga amoníaco. Cerrar las válvulas.

Figura 67. Disposición de tanques para la carga de la solución.



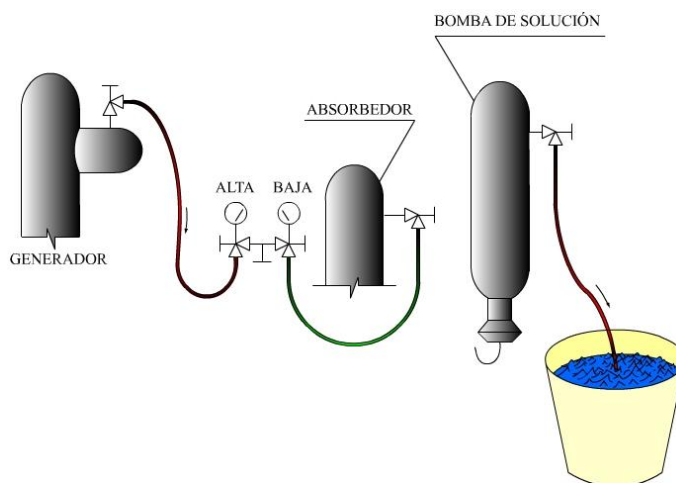
4. Purgar la línea del cilindro de solución.
 - a.) Abrir la válvula de alta del manifold.
 - b.) Abrir la válvula de líquido del cilindro.
 - c.) Cerrar la válvula de alta del manifold.
5. Ubicar el cilindro de solución sobre la balanza. Controlar su peso.
6. Abrir la válvula de baja en el manifold para cargar solución.

NOTA: para ajustar la carga se deben agregar lotes de 1 Kg.
7. Cerrar válvulas.
8. Operar la unidad por lo menos 30 minutos.
9. Controlar el nivel de solución. Si es bajo agregar 1Kg más de solución.
10. Cerrar la válvula del absorbedor. Sacar las mangueras. Tener cuidado con el amoníaco.
11. Cuando las presiones se estabilicen comparar con la tabla 16.

5.5.6 Ajuste de la carga de solución.

- ❖ Detener el equipo mediante su sistema de comando. Dejar pasar 10 minutos como mínimo antes de iniciar la operación de extracción.
- ❖ Conectar el manifold y las mangueras como se indica en la figura.
- ❖ Pesar un balde con agua.
- ❖ Abrir la válvula de purga y descargar 1 Kg de solución.
- ❖ Cerrar la válvula de purga.

Figura 68. Disposición de elementos para el ajuste de la carga de la solución.



- ❖ Poner en marcha el equipo, después de un tiempo controlar sus presiones.
- ❖ Controlar el nivel de la solución según (5.5.3). Si es todavía alto, repetir los pasos anteriores.

La figura 68 muestra la disposición de los elementos para el ajuste de la carga de la solución.

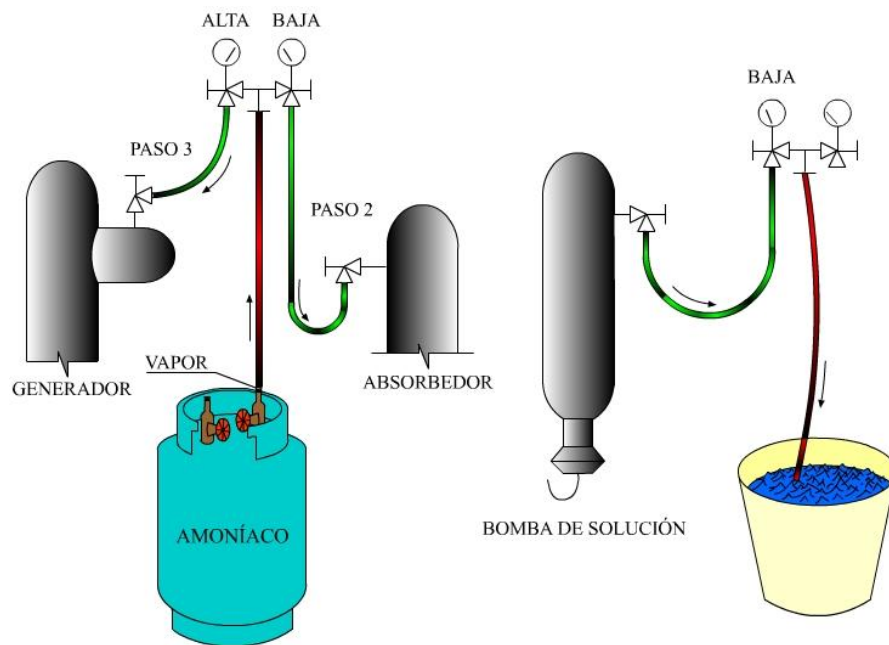
5.5.7 Corrección del defecto de la solución o refrigerante fuera de su lugar (STORE OUT).

Cuando el análisis de la unidad indica que la carga de refrigerante o de solución está fuera de su lugar, se debe proceder de la siguiente manera.

PASO "1"

1. Conectar un manifold a las válvulas de alta y baja, y un segundo manifold a la válvula de purga.
2. Abrir las válvulas, si la presión del equipo es menor que 5 Lb/pulg² hay que proceder según el paso "2".
3. Estando la válvula de gas cerrada, poner en marcha el equipo y dejarlo operar durante cinco minutos.
4. Abrir fuertemente la válvula de la bomba de solución, purgar fuertemente. Si aparece solución amarilla en el balde y el manómetro de la bomba, y el manómetro de la bomba fluctúa, esto indica que la solución entra en la bomba. Dejar de purgar.
5. Cuando el manómetro no fluctúa mas se debe abrir el gas. Si las presiones se mueven normalmente, dejar operar el equipo durante 20 minutos, después se deben controlar las presiones.
Si la presión de alta no sube, cerrar el gas y seguir con el paso "2".

Figura 69 Corrección del store-out



PASO "2"

El equipo debe operar eléctricamente (Gas cerrado).

Conectar el cilindro de refrigerante del absorbedor. Su presión debe ser 100 psi como mínimo. Si es menor, calentar el cilindro sumergiéndolo en un balde con agua caliente.

1. Abrir la válvula de baja y dejar entrar vapor al absorbedor hasta que las presiones del cilindro y absorbedor se igualen.
2. Purgar fuertemente por la bomba de solución hasta que la salida de la solución o la fluctuación del manómetro indiquen la presencia de solución en la bomba. Dejar de purgar.

Si después de 5 minutos de purgado, la solución no entra en la bomba, cerrar la válvula de purga y continuar con el paso "2".

3. Cuando el manómetro deje de fluctuar, cerrar la válvula del cilindro y abrir la válvula de gas del equipo.

4. Dejar estabilizar las presiones y si es necesario ajustar la carga del refrigerante.

PASO "3"

Controlar que la presión del cilindro sea de 100 psi, como mínimo.

1. Conectar el cilindro al generador. Dejar igualar las presiones del cilindro con las del equipo.
2. Repetir los pasos 2-2-4 del paso "2".

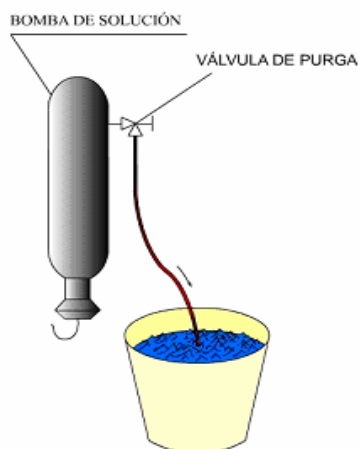
5.5.8 Purgado de gases no condensables.

NOTA: la unidad deberá purgarse únicamente después de que todos los exteriores se hayan revisado y corregido y que la unidad no esté aun enfriando apropiadamente, o cada vez que la unidad se haya apagado en el interruptor límite de temperatura alta. El purgado deberá hacerse con la unidad operando (el quemador encendido) y con al menos una presión en el manómetro de la válvula de purga de 5 psi. La disposición de mangueras y tanque debe hacerse como se muestra en la figura 70.

- a) Proceda como sigue: Quitar la cubierta de la válvula de purga en la parte superior de la cámara de purga. Revise que la válvula este bien cerrada. Quite el tapón de tubo de la válvula.
- b) Conecte un accesorio adaptador de acero de 1/4" rosca de 1/4" a rosca campana de 1/4" para purgar la válvula de la bomba de solución.
- c) Conecte la manguera para purgar el adaptador e introduzca el extremo suelto al menos 6". Si no se dispone de una manguera para purga, puede usarse una tuerca campana de acero de 1/4" de tubo de aluminio.

- d) Abra la válvula hasta que comiencen a salir burbujas en el extremo de la manguera que esta dentro del agua. Si se presentan gases no condensables, habrá burbujas en la superficie del agua. El vapor del amoniaco será absorbido por el agua y esto se nota si hay un sonido crepitoso. Cierre el manómetro de purga inmediatamente si aparece una solución amarilla en la cubeta.
- e) Cierre la válvula de purga cuando no haya burbujas en el agua.
- f) Quite la manguera para purga y el adaptador. Vuelva a poner los tapones.

Figura 70. Purgado de gases no condensables



5.6. BOMBA HIDRÁULICA.

En el equipo ACC 60 00 se deben tener 104 pulsaciones por minuto. En cada pulsación la presión de descarga de la bomba fluctúa entre 0 y 400lb/pulg² aproximadamente. Esta pulsación es transmitida, a través de una línea hidráulica a la cara inferior del diafragma de teflón de la bomba de solución.

El nivel de líquido hidráulico deberá mantenerse aproximadamente 30mm debajo del borde superior de la tapa de la bomba abierta. Este nivel deberá controlarse cuando el fluido este caliente y al bomba detenida.

El circuito hidráulico utiliza fluido hidráulico ARKLA N° Z 2169. Como alternativa se pueden utilizar los siguientes fluidos, General motors G.M. N° 1050017, texaco 1833 P.S. fluido 4634.

NOTA: Nuca operar la bomba sin aceite.

Si es necesario el cambio de la bomba verifique que la bomba de repuesto sea la correcta. Vea la lista de partes para seleccionar el número de parte correspondiente a la bomba hidráulica. La bomba hidráulica puede desajustarse de tal forma que esta no podrá desplazar la solución contra la sección de alta presión existente. Esta condición puede ocurrir en cualquier punto dentro del rango normal de operación, más que en una presión específica.

La bomba pierde su capacidad de bombeo cuando la presión de descarga es menor que la presión de alta del sistema. Por ejemplo para una temperatura del aire ambiente (de condensación) es de 95 F, la presión normal alta en un enfriador de 5 toneladas deberá ser de 285 psi. Si la bomba hidráulica no funciona correctamente, la unidad respondería en una forma normal hasta que la presión alta alcance 200 psi. En este punto la bomba habrá alcanzado su valor máximo y no será posible que bombee suficiente solución al generador. Como el amoniaco se separa de la solución en el generador, la presión alta comenzara a caer. Cuando la presión alta haya bajado lo suficiente, la bomba hidráulica comenzara a mover más solución al generador, permitiendo que la unidad trate de operar nuevamente.

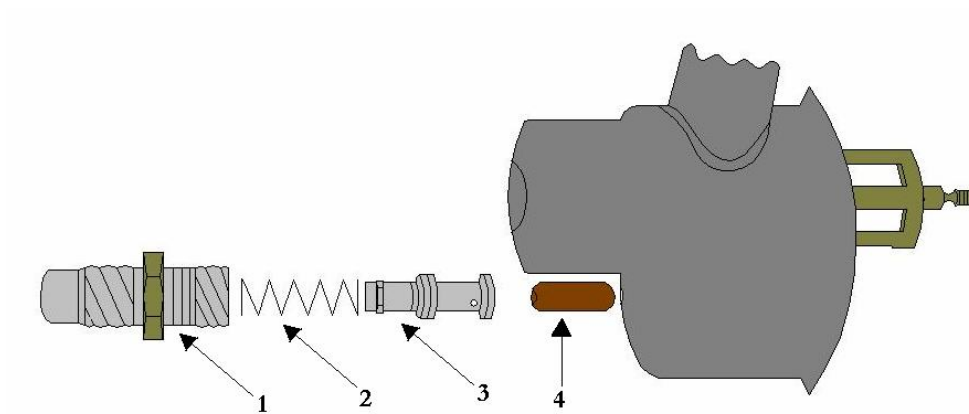
Esta fluctuación puede continuar por un periodo de tiempo, sin el corte de alta temperatura, dependiendo de la presión a la que esta ocurre y la velocidad a la que la solución sea almacenada en la sección de baja. El generador no necesariamente se pondrá rojo. Si existe una condición como la citada, quite el tapón del aceite y ponga la palma de la mano firmemente sobre la abertura, sentirá un empujón sobre la mano pero prácticamente no habrá succión en el punto pico de la presión de la sección alta.

La bomba hidráulica no necesariamente generara ruido. La válvula de control de flujo de la bomba puede estar evitando que genere suficiente presión para sobrepasar la presión del lado de alta de la unidad. Si la condición de arriba existe, revise la válvula de control de flujo como sigue:

1. Quite el protector de la banda.
2. Quite la banda, después de la tuerca y la arandela de seguridad para quitar la polea.
3. Drene y guarde el fluido de la bomba.
4. Desconecte la línea hidráulica de la conexión de la parte trasera de la bomba.
5. Quite la bomba del bloque de montaje.
6. Quite el adaptador de la bomba.
7. Después de que el adaptador y el resorte se quiten, deben usarse unas pinzas de punta para quitar la válvula.
8. Al montaje de la válvula de control de flujo deberá dársele una prueba de soplado. Elimine el fluido de la válvula y sople a través de la abertura de la tuerca hexagonal. Si sale aire por las puertas laterales desarme el montaje y límpielo.

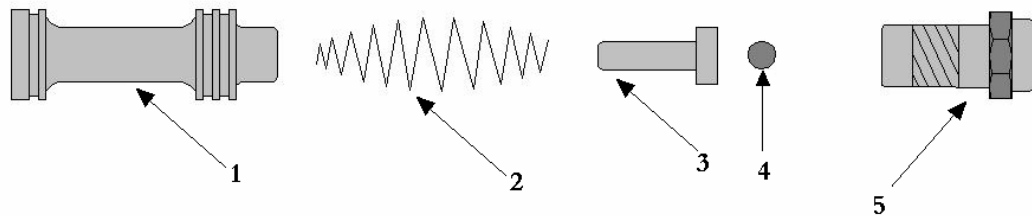
9. Tome el bastidor de la válvula con unas pinzas de presión, entre las superficies maquinadas (no dañe las superficies maquinadas) y quite las partes 5, 4, 3 y 2 de la figura 72 y limpie cuidadosamente las partes 3,4 y 5. No cambie la tensión de la parte 2 figura 72
NOTA: si en el paso 8 el aire no pasa de un lado a otro, cambie la válvula de control de flujo Num 16009-198.
10. Re-ensamble, apriete la tuerca hexagonal y repita la prueba de soplado.
11. Reinstale la válvula de control de flujo de la bomba.
12. instale la bomba en el bloque de montaje.
13. Apriete la polea y coloque la arandela de seguridad y la tuerca de sellado.
14. Conecte la línea hidráulica a la conexión trasera de la bomba.
15. Llene el depósito de la bomba con fluido hidráulico.
16. Coloque la banda (cuide que no tenga aceite)
17. Arranque la unidad y revise la operación. PRECAUCIÓN: no opera la bomba sin revisar el nivel del fluido en el depósito de la bomba.

Figura 71. Bomba hidráulica



1. Adaptador cónico.
2. Resorte retenedor.
3. Válvula de control de flujo.
4. espaciador.

Figura 72 Válvula de control de flujo



1. Cuerpo de la válvula de control.
2. Resorte de tensión.
3. Embolo.
4. Bola check.
5. Tuerca hexagonal-asiento de la bola check.

6. SEGUIMIENTO DEL SISTEMA ROBUR INSTALADO.

De acuerdo a los objetivos trazados se hizo el seguimiento de la operación del sistema con el fin de conocer parámetros económicos, parámetros técnicos y de operación.

6.1. PARÁMETROS ECONÓMICOS.

Con el fin de realizar una evaluación económica se hizo una comparación de la unidad ROBUR con una unidad de compresión de vapor de la misma capacidad marca YORK instalada en el laboratorio de control numérico computarizado (CNC).

6.1.1 Consumo energético de la unidad ROBUR. El costo de operación de esta unidad está dado por el consumo energético, el cual consta de consumo eléctrico y consumo térmico.

❖ **Consumo térmico.** Con el medidor ubicado en el laboratorio de máquinas térmicas alternativas, se pudo comprobar que la unidad enfriadora

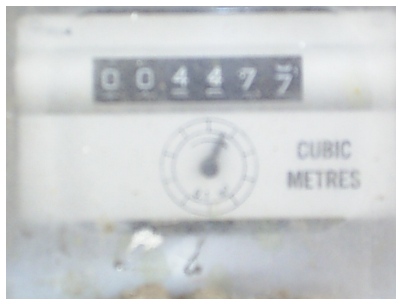
consume $0.85 \frac{m^3}{h}$ de gas natural. El poder calorífico del gas natural es de

$40.5 \frac{MJ}{m^3}$, con lo cual se obtiene el calor entregado por el combustible

$$\dot{Q}_g = 40.5 \frac{MJ}{m^3} * 0.85 \frac{m^3}{h} = 34.425 \frac{MJ}{h} = 9562.5 W = 9.6 KW . \quad \text{La figura 73}$$

muestra el medidor de gas de la escuela de Ingeniería Mecánica ubicado en el laboratorio de máquinas térmicas alternativas térmicas.

Figura 73. Medidor de gas



❖ **Consumo eléctrico.** El sistema cuenta con los siguientes componentes eléctricos se muestran en al tabla 17.

Tabla 17. Componentes instalados en el sistema.

MOTOR	TIPO	$\cos \phi$	POTENCIA NOMINAL	VOLTAJE	AMPERIOS CONSUMIDOS	CICLO	RPM
Ventilador condensador	Monofásico	0.60	$\frac{1}{2}HP$	220V	2.8 A	60 hz	820
Bomba solución	Monofásico	0.68	$\frac{3}{4}HP$	220 V	3.7 A	60 hz	3450
Bomba agua fría	Monofásico	0.41	1HP	220 V	4 A	60 hz	3450
ventilador UMA	Monofásico	0.40	1.5 HP	230 V	7 A	60 hz	3530

Los consumos reales de cada componente se listan en la tabla 18.

Tabla 18. Potencias realmente consumidas de la red por los componentes eléctricos del sistema.

Componente	Potencia consumida en la instalación	
	<i>HP</i>	<i>W</i>
Motor ventilador condensador	0.5	372.85
Motor bomba de solución	0.75	559.27
Motor bomba de agua fría	0.5	372.85
Motor del ventilador de la UMA	0.86	641.30
TOTAL	2.61	1946.27

El consumo total en kilovatios es de:

Térmico: 9.6 KW

Eléctrico: 1.94 KW

Para un total de 11.5 KW.

Estos consumos son constantes en el tiempo, pues no dependen de las condiciones de carga del local.

6.1.2. Consumo energético de la unidad YORK. Las especificaciones de esta unidad se muestran en la tabla 19.

Tabla 19. Especificaciones técnicas de la unidad por compresión de vapor marca YORK.

MODELO		PAC 060H1031A			
REFRIGERANTE		22			
DATOS ELÉCTRICOS					
COMPONENTES	VOLTAJE	AMPERIOS	FASES	$\cos \phi$	HP
COMPRESOR	230 <i>V</i>	16 <i>A</i>	3	0.85	7.3
MOTOR DEL VENTILADOR	230 <i>V</i>	-	1	-	$\frac{1}{3}$
MOTOR DE IMPULSIÓN	230 <i>V</i>	-	1	-	$\frac{3}{4}$

El consumo total de potencia eléctrica en esta unidad es de 8.4 HP=6,25 KW de los cuales el compresor consume 5.42 KW y lo ventiladores 0.83 KW..

6.1.3 Comparación energética

❖ **COP de la unidad YORK.** El COP de la unidad por compresión de vapor

se calcula por medio de la expresión $COP = \frac{\dot{Q}_e}{\dot{W}_{Compresor}}$, entonces

$$COP = \frac{17584.26}{5417.85} = 3.24, \text{ es decir que esta unidad remueve 3.24 unidades}$$

de energía por cada unidad de energía que se consume.

❖ **COP de la unidad ROBUR.** Para el cálculo del COP de la unidad ROBUR

se considera la siguiente ecuación: $COP = \frac{\dot{Q}_e}{\dot{Q}_g + \dot{W}_B}$. Donde

$Q_e = 17584.26 W$ es el calor retirado, por la unidad, del recinto;

$\dot{Q}_g = 9562.5 \text{ W}$ que es el calor entregado en el generador y $\dot{W}_B = 372.84 \text{ W}$,

entonces $COP = \frac{17584.26}{9935.34} = 1.76$, esto significa que la unidad remueve 1.76 unidades de energía por cada unidad de energía que se consume.

Al comparar los COP de cada unidad se obtiene $\frac{COP_{YORK}}{COP_{ROBUR}} = \frac{1.76}{3.24}$, entonces

$COP_{ROBUR} = 0.54 COP_{YORK}$. Luego si se remueven k unidades de energía, la ecuación anterior se convierte en

$$\frac{k}{ENERGÍA REQUERIDA ROBUR} = 0.54 \frac{k}{ENERGÍA REQUERIDA YORK},$$

entonces $ENERGÍA REQUERIDA ROBUR = 1.84 ENERGÍA REQUERIDA YORK$, es decir, la energía requerida por la unidad ROBUR es 1.84 mayor que la que requeriría la unidad YORK, lo cual muestra la ineficiencia de la unidad de absorción frente a la unidad por compresión de vapor.

6.1.4 Comparación económica. Esta comparación se hace desde el punto de vista de los costos de energía en Colombia. Tales precios se muestran en la tabla 20.

Tabla 20. Costos de energía eléctrica y de gas en Colombia.

TIPO DE ENERGÍA	PRECIO POR KILOVATIO HORA
ELÉCTRICA	\$ 250.25
GAS	\$ 69.97

Fuente: Electrificadota de Santander S.A.E.S.P y Gasoriente S.A.E.S.P.

❖ **Costo de energía para las unidades.** La tabla 21 muestra los costos específicos de energía por hora para las unidades ROBUR y YORK.

Tabla 21. Costos específicos de consumo de energía por hora para las unidades ROBUR y YORK.

UNIDAD	CONSUMO GAS [KW h]	CONSUMO ELÉCTRICO [KW h]	COSTO DE GAS [\$]	COSTO ELÉCTRICO [\$]	COSTO TOTAL [\$]
ROBUR	9.6	1.94	671.7	485.5	1157.2
YORK	-	6.25	-	1564.1	1564.1

Si las unidades trabajasen 8 horas al día durante 26 días al mes los costos de funcionamiento serían de:

❖ **UNIDAD ROBUR: \$240697.00**

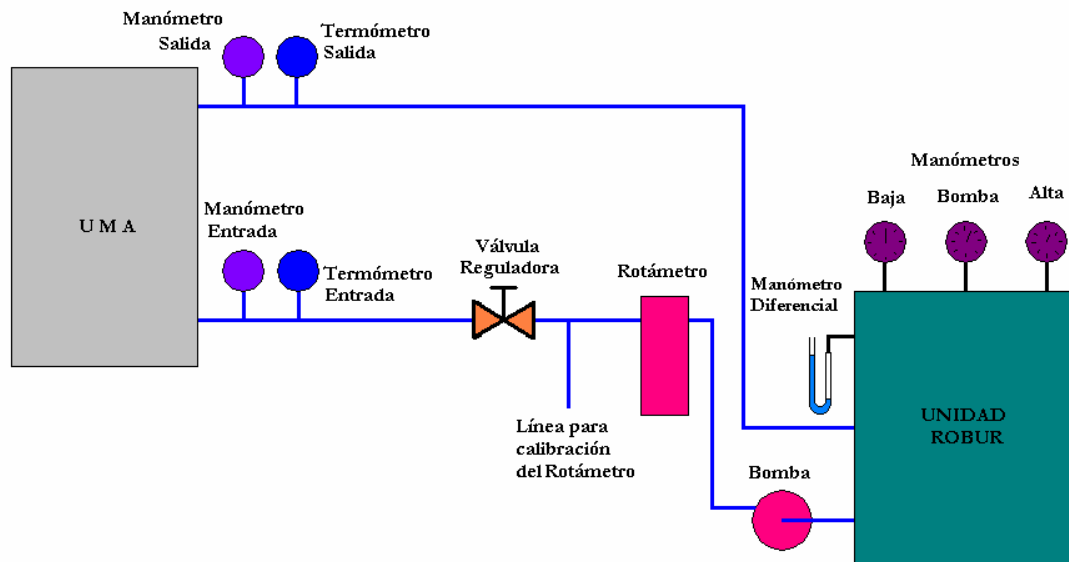
❖ **UNIDAD YORK: \$325332.00**

El ahorro es de \$84635.00, es decir del 26% sobre el costo de energía de la unidad de compresión de vapor.

6.2. PARÁMETROS DE OPERACIÓN.

Además de la operación descrita en el capítulo 2, se hizo el seguimiento de la unidad instalada con el fin de comprobar los parámetros de operación y técnicos dados por el fabricante. Para tal efecto se hizo necesario instalar medidores en el sistema de la forma como se muestra en el esquema de la figura 74. Los parámetros se discriminaron en control y comportamiento bajo carga diversa.

Figura 74. Diagrama esquemático de la instalación con los elementos de medición instalados



Los medidores son:

❖ **Rotámetro.** Instalado en la línea con el fin de medir el flujo de agua fría que entra a la serpentina de la manejadora. La figura 75 muestra este elemento instalado.

Figura 75. Rotámetro.



❖ **Válvula reguladora de caudal.** Su función es regular el flujo de agua que maneja la unidad enfriadora ROBUR. Esta válvula se muestra en La figura 76.

Figura 76. Reguladora de caudal.



❖ **Termómetros.** Se instalaron dos termómetros: uno a la entrada y otro a la salida de la serpentina de la manejadora con el fin de registrar el comportamiento de las temperaturas en el transcurso del tiempo. La figura 77 muestra estos termómetros además de dos manómetros que miden la caída de presión en la serpentina.

Figura 77. Termómetro y manómetros a la entrada y salida de la serpentina de la manejadora.



❖ **Manómetros.** Instalados en la unidad de ROBUR con el objeto de monitorear las presiones de alta, baja y bomba de solución. La figura 78 muestra estos manómetros.

Figura 78. Manómetros de alta, bomba de solución y baja instalados en la unidad ROBUR.



❖ **Manómetro diferencial.** Ubicado en la unidad ROBUR con el objetivo de medir la presión del gas en la entrada. La figura 79 muestra este manómetro.

Figura 79. Manómetro diferencial



6.2.1. Puesta en marcha. Al inicio de la puesta en marcha de la unidad, esta no extraía el calor del recinto debido a que no estaba cargada correctamente. La diferencia de temperatura entre la entrada y salida del agua en la serpentina de la manejadora en ese momento era de 2.8°C al caudal nominal de 12 GPM. Se siguió el procedimiento descrito en el capítulo 5 para ajustar el contenido de refrigerante, nuevamente se puso en marcha la unidad, y luego de entrar en régimen, se observó las temperaturas del agua. La diferencia de temperaturas fue entonces de 4.2°C , valor que se considera satisfactoria pues está dentro de las especificaciones del refrigerante.

A pesar de que la unidad estaba trabajando en la zona óptima, todavía no se conseguía retirar el calor del laboratorio, debido a que los CFM del aire no se habían ajustado a los cálculos previamente hechos. Se hizo necesario calcular una nueva relación de poleas en la manejadora para obtener los 2800 cfm necesarios para el confort del laboratorio.

6.2.2 Respuesta bajo carga diversa. Para examinar esta respuesta fue necesario encender la unidad durante 10 horas continuas en un período de 5 días. Se observó que las presiones en la unidad no cambiaban con la carga sino con la temperatura ambiente.

La temperatura mínima del agua a régimen fue de 4.3 °C para una temperatura de ambiente de 20°C y las presiones registradas fueron:

- ❖ **Presión de baja : 33 psi**
- ❖ **Presión de alta: 205 psi.**

La máxima temperatura del agua a régimen fue 9°C para una temperatura ambiente de 26°C y las presiones registradas fueron:

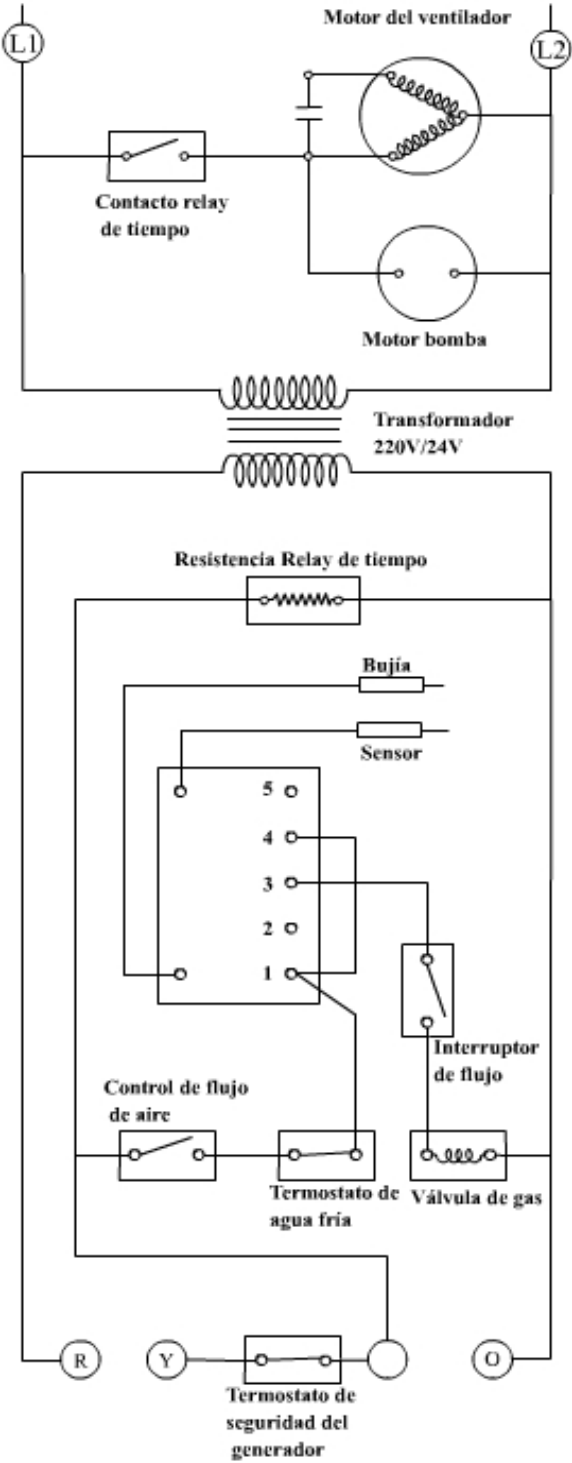
- ❖ **Presión de baja : 45 psi**
- ❖ **Presión de alta: 230 psi.**

Estas lecturas son aproximadas a las dadas en la tabla 16.

También se comprobó el óptimo funcionamiento de los controles eléctricos de la unidad que se describen en la siguiente sección.

6.2.3 Controles. En la figura 80 se muestra el esquema eléctrico de la unidad ROBUR ACC 60-00

Figura 80. Esquema eléctrico de la unidad ROBUR ACC 60-00



❖ **Control de alta temperatura del generador.** Este control de límite esta instalado sobre el frente del generador. Su interruptor esta conectado en el circuito de 24V. El propósito de este control es interrumpir el suministro de gas cuando el generador se sobrecalienta.

Es del tipo bimetálico de reposición manual, su contacto abre cuando la temperatura del generador sube a $165 \pm 5^\circ \text{ C}$. Para reponerlo se debe esperar que el generador se enfríe.

Si este control es encontrado abierto, es necesario investigar, localizar y corregir la causa de sobrecalentamiento del generador.

La unidad no debe operar bajo ninguna circunstancia con este control puenteado eléctricamente, fuera de su posición de montaje o defectuoso.

❖ **Termostato de agua fría.** El cuerpo del termostato de agua fría esta montado en el panel de control del enfriador. Su bulbo esta instalado en la cañería de salida de agua fría, entre el tanque enfriador y la succión de la bomba. El propósito de este control es interrumpir la operación del quemador cuando la temperatura del agua fría desciende aproximadamente a $4.5^\circ \pm 1^\circ \text{ C}$. Cierra automáticamente cuando la temperatura del agua se eleva a $6.5^\circ \pm 1^\circ \text{ C}$, aproximadamente. La figura 81 ilustra el termostato de agua fría.

Bajo ninguna circunstancia la unidad debe operar con este control puenteado eléctricamente, abierto o con el bulbo fuera de su lugar.

Figura 81. Termostato de agua fría



Para controlar la calibración de este control, se debe seguir las siguientes instrucciones:

1. Cortar la carga térmica de la unidad parando el equipo de aire.
2. Colocar un termómetro de precisión en la cañería de salida de agua fría.
3. Observar la operación del quemador. La llama debe apagarse cuando la temperatura del agua fría llega a $4.5^{\circ}\pm 1^{\circ}$ C.
4. Poner en marcha el equipo de aire.
5. La llama debe encenderse cuando la temperatura de agua fría suba a $6.5^{\circ}\pm 1^{\circ}$ C.

Si el control no actúa dentro de los rangos de temperatura mencionados debe ser remplazado.

NOTA: El tubo capilar debe estar insertado a una profundidad de 200mm dentro de la cañería de agua fría.

❖ **Control de flujo de aire.** Este control esta montado debajo del ventilador del condensador. Su propósito es controlar el flujo de aire a través del condensador. Cuando el caudal de aire es insuficiente corta la válvula de gas.

Esta compuesto por un micro-switch, conectado en el circuito de 24V, accionado por una bandeja impulsada por la corriente de aire. Este control se muestra en la figura 82.

Bajo ninguna circunstancia debe operar la unidad estando este control eléctricamente puenteado, trabado o defectuoso.

Figura 82. Control de flujo de aire



❖ **Relay de tiempo.** El relay de tiempo esta montado en el panel de control del enfriador. El propósito de este relay es mantener en funcionamiento el enfriador aproximadamente 3 minutos y 15 segundos después que el termostato corta el quemador.

NOTA: Cuando los controles de la unida piden nuevamente refrigeración, hay un retardo de 45 segundos (El tiempo necesario para calentar el bimetalo del relay) hasta que el equipo arranque nuevamente. Es necesario cambiar el control si los motores se detienen con un retardo menor de tres minutos o mayor de 4 minutos. En la figura 83 se ilustra este control.

Bajo ninguna circunstancia la unidad debe operar con este relay saltado, defectuoso o eléctricamente puenteado.

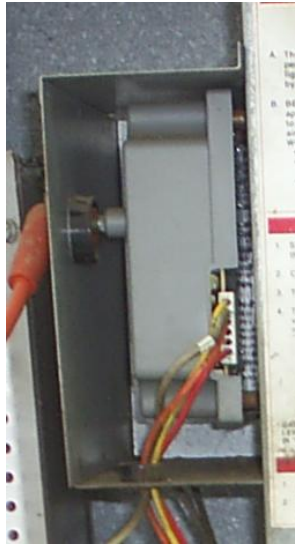
Figura 83. Relay de tiempo



❖ **Sistema de encendido eléctrico.** El sistema de encendido eléctrico está compuesto por un Control de sistema (programador electrónico), una bujía de encendido y un sensor de llama. El sistema esta destinado a encender y apagar la llama y ofrece protección al equipo contra la falta de llama. Al energizar el control de sistema, este abre la válvula de gas y suministra durante 10-11 segundos corriente eléctrica alterna de alta tensión a la bujía de encendido. Si en este lapso no se enciende la llama, el control del sistema se detendrá (cierra la válvula de gas). Para volver a poner en marcha el sistema se deberá desenergizar eléctricamente y luego volver a energizarlo. En la figura 84 se muestra el sistema de encendido eléctrico.

Bajo ninguna circunstancia el equipo deberá ser operado estando este control defectuoso o eléctricamente puenteado.

Figura 84. Control de encendido eléctrico



❖ **Válvula de gas.** La válvula de gas es un control combinado, compuesto por:

- Una llave de paso tipo disco
- Una válvula solenoide.
- Un regulador de presión.

La válvula solenoide esta conectada al circuito de 24V del sistema de comando, abre y cierra la válvula eléctricamente. El regulador de presión esta diseñado para operar en un rango de presiones de suministro de 120 a 280mm c.a. con gas natural, y de 280 a 360mm de c.a. con gas propano. En caso de funcionamiento defectuoso del operador (tapa) de la válvula, este puede ser remplazado. Si el defecto se debe a algún otro componente, se deberá remplazar la válvula completa. La válvula de gas se muestra en la figura 85.

Bajo ninguna circunstancia deberá ser operado el equipo estando este control defectuoso.

Figura 85. Válvula de gas



❖ **Capacitor.** El capacitor esta ubicado en el panel de control del enfriador, su objeto es asegurar la rápida aceleración del motor del ventilador.

Figura 86. Capacitor



❖ **Interruptor de flujo.** El interruptor de flujo esta montado a la salida del tanque de agua fría. El propósito de este interruptor es el apagar los quemadores en caso de que haya una perdida de flujo de agua fría. El interruptor de flujo está calibrado para desconectarse en una caída de flujo y

conectarse en un aumento. Bajo ninguna circunstancia se debe operar la unidad si el interruptor de flujo está puenteado eléctricamente.

Figura 87. Interruptor de flujo



7. DESARROLLO DE LA MULTIMEDIA SOBRE REFRIGERACIÓN POR ABSORCIÓN.

Esta multimedia ofrece la posibilidad de profundizar en el estudio de la absorción aplicada a aire acondicionado y refrigeración, a la vez que muestra en detalle una unidad comercial marca ROBUR que trabaja con esta tecnología.

7.1. DESCRIPCIÓN DE LA MULTIMEDIA.

La multimedia educativa sobre la tecnología de la refrigeración por absorción, montaje y mantenimiento de la unidad comercial ROBUR ACC 60 00, consta de cuatro módulos enmarcados en una interfaz gráfica amena y accesible para que el usuario utilice las diferentes herramientas que ofrece. La estructura consta de tres niveles.

7.1.1 Pantalla de presentación. En esta se presenta una animación alusiva a la necesidad del conocimiento sobre la absorción. Al término muestra el nombre de los autores.

7.1.2. Pantalla de home. Corresponde al primer nivel de la estructura y esta aparece automáticamente al término de la pantalla de presentación. Esta

contiene los nombres de los cuatro módulos, enlazados con hipervínculos, y que la componen. Estos módulos son:

- ❖ Generalidades.
- ❖ Refrigeración por absorción.
- ❖ Operación de la unidad ROBUR.
- ❖ Información y guía para el mantenimiento.

Figura 88. Pantalla de presentación.



7.1.3 Pantalla de los módulos. Corresponde al segundo nivel de la estructura donde aparece el título correspondiente al módulo y los temas que lo componen, como se muestra en la figura.

Los módulos constan de los siguientes temas:

❖ **GENERALIDADES**

- **Concepto.**
- **Historia.**
- **Definiciones básicas.**
- **Otros tipos.**
- **Refrigerantes.**

❖ **REFRIGERACIÓN POR ABSORCIÓN**

- **Propiedades.**
- **Tipos de diagramas.**
- **Procesos.**
- **Tipos de sistemas.**
- **Componentes.**

❖ **OPERACIÓN DE LA UNIDAD ROBUR**

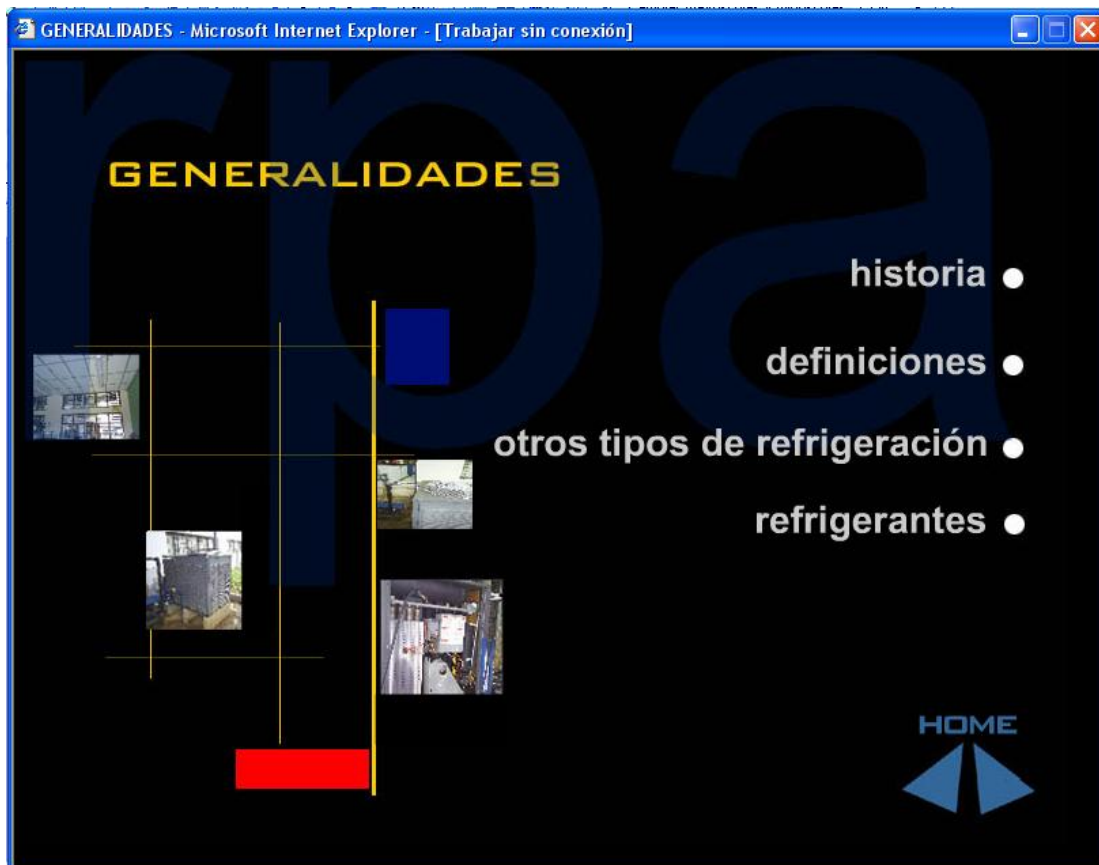
- **Operación de la unidad.**
- **Instrucciones de puesta en marcha.**
- **Nivelación.**
- **Llenado y prueba del circuito de agua.**
- **Ajuste del suministro de gas.**
- **Tensión y alineación de la correa.**
- **Ventilador del condensador.**
- **Controles.**

❖ **INFORMACIÓN Y GUÍA PARA EL MANTENIMIENTO.**

- **Información general.**
- **Limpieza del generador.**
- **Limpieza de las serpentinas.**
- **Servicio general.**

- Verificación del sistema de encendido.
- Análisis de la unidad.
- Llenado y ajuste.
- Bomba hidráulica.

Figura 89. Pantalla de módulos.



7.1.4 Pantalla de contenido. Corresponde al tercer nivel de la estructura y en esta se tiene acceso a los textos, gráficos y animaciones.

Figura 90. Pantalla de contenidos.



CONCLUSIONES

Se logró instalar satisfactoriamente la unidad de absorción ROBUR en el laboratorio de mecánica de fluidos de la Escuela de Ingeniería Mecánica

Se desarrolló la herramienta multimedia como respuesta a las necesidades de conocimiento sobre la tecnología en estudio

Se hizo el seguimiento de la unidad instalada y se pudo comprobar que con la unidad de enfriamiento ROBUR se tiene un ahorro del 26% sobre el costo de funcionamiento de la unidad por compresión de vapor.

La unidad ROBUR requiere más energía para retirar 5 toneladas que lo que requiere la unidad por compresión de vapor YORK, por tanto el sistema por absorción es más económico pero es más costoso en términos energéticos.

.

RECOMENDACIONES

Se hacen recomendaciones desde dos puntos de vista:

❖ Académico.

Que futuros proyectos de grado hagan énfasis en la mejora en el monitoreo de la unidad para así dar un diagnóstico más acertado sobre los posibles problemas que presente.

Estudiar la posibilidad implementar una bomba de solución diferente a la de diafragma con el fin de que el mantenimiento no se limite al cambio frecuente del teflón.

❖ Técnico.

Al momento de cargar la unidad se deben seguir los pasos mencionados en este informe.

La bomba de agua fría utilizada está sobredimensionada para el sistema, por tanto es recomendable utilizar una de menor potencia.

Para un efecto mayor de acondicionamiento de aire en el laboratorio de mecánica de fluidos, se debe disminuir las ganancias de calor, por tanto se recomienda instalar cortinas tipo persiana.

BIBLIOGRAFÍA

APPLICATION MANUAL SERVEL. Unitary gas fired air conditioners solution pump models. USA: ROBUR. 1997. 168p.

ASHRAE. CD Handbook HVAC systems and equipment. 1996 y refrigeration 1998.

CRANE. Flujo de fluidos en válvulas, accesorios y tuberías. México D.F. 1992. 218p.

INCROPERA, Frank P. y DE WITT, David P. Fundamentos de Transferencia de Calor. México: Prentice Hall. 1.999. 912 p.

Mc QUISTON, Faye C; PARKER, Jerald D y SPITLER, Jeffrey. Calefacción, ventilación y aire acondicionado análisis y diseño. México D.F. Limusa Wiley, 2003. 622 p.

MANUAL VALYCONTROL. Valycontrol S.A. Guadalajara. 1996.104p.

MARADEY, Juan F. Termodinámica aplicada. Bucaramanga. Ediciones Universidad Industrial de Santander. 2002. 665 p.

PITA. Edward G. Principios y sistemas de refrigeración. México D.F. Limusa. 1998. 496 p.

POTTER, Merle C y WIGGERT, David c. Mecánica de fluidos. México D.F. Prentice Hall. 1998. 776p.

SERVEL. Manual de servicio de mantenimiento. USA: ROBUR. 1992. 152p.

ANEXOS

ANEXO A. ENFRIAMIENTO POR ABSORCIÓN.

A.1 GENERALIDADES

Entre los distintos tipos de solución aplicadas en refrigeración mecánica, dos concentran la mayoría de los casos: los sistemas de compresión mecánica y los sistemas termoquímicos de absorción.

Ambos tipos incluyen procesos continuos o intermitentes presentando como característica general el empleo de un fluido que, mediante cambio de estado líquido a vapor , absorbe calor de una fuente de menor temperatura que es el medio a enfriar, transfiriéndolo posteriormente a una fuente de mayor temperatura. Esta transferencia energética desde una fuente de menor nivel térmico en el evaporador a una de mayor nivel térmico en el condensador requiere de un aporte de trabajo externo o en algunos casos de calor externo. En los ciclos frigoríficos la extracción de calor de la fuente de menor temperatura se consigue con la evaporación de un fluido denominado refrigerante. En el condensador el refrigerante recupera su estado líquido para reiniciar el proceso de evaporación.

Los sistemas de compresión mecánica requieren trabajo para la compresión de vapor del refrigerante utilizándose equipos alternativos como un pistón o rotativos como tornillos, centrífugos, a paletas, espiral, entre otros; de acuerdo con las particularidades de la aplicación, las condiciones de diseño y las capacidades solicitadas.

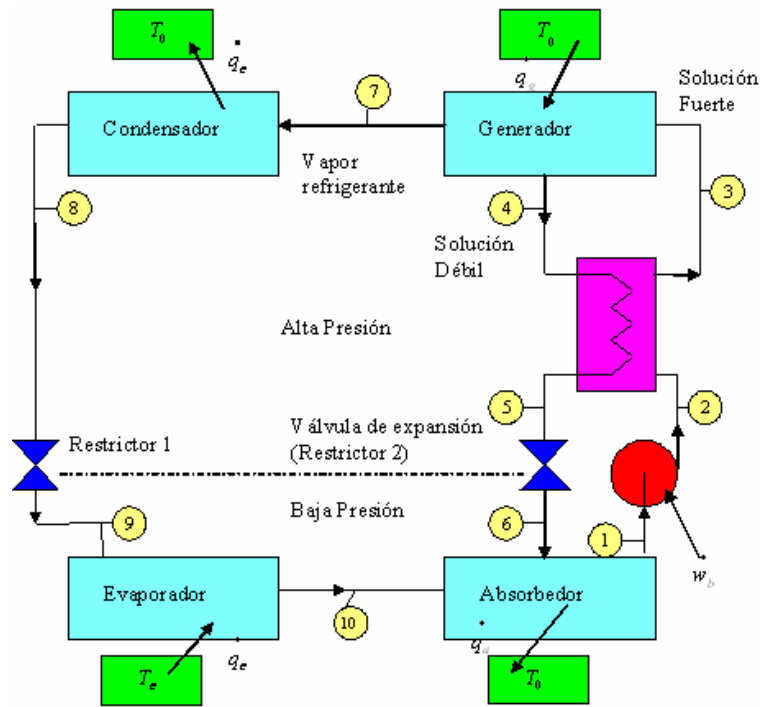
En los sistemas de absorción, interviene un segundo elemento: el absorbente, utilizado como portador del refrigerante para el transporte entre los distintos niveles de presión. La mayor parte de energía externa es calor necesario para la separación dada en el generador de ambos componentes dando lugar a dos circuitos: el de refrigerante, similar al de los ciclos de compresión, y el de absorbente.

A.2 SISTEMA TEÓRICO DE REFRIGERACIÓN POR ABSORCIÓN

En la figura 1 se muestra un esquema general de los componentes de un ciclo de refrigeración por absorción teórico. Por razones de simplicidad se supone que el absorbente no se evapora en el generador. Por lo tanto sólo fluye refrigerante a través del condensador, la válvula de expansión y el evaporador. El vapor que sale del evaporador es absorbido por el líquido débil en el absorbedor a medida que se transfiere calor desde la mezcla. A continuación la solución enriquecida con refrigerante se bombea hasta el nivel de presión en el generador, donde el vapor de refrigerante es expulsado hacia el condensador, mientras que la solución débil retorna al absorbedor a través del intercambiador de calor y la válvula de expansión (Restricción 2).

Se hace necesaria una pequeña parte de energía externa, en forma de trabajo de circulación, para transportar la solución de absorbente rica en refrigerante a la etapa de separación indicada anteriormente. Este trabajo de circulación es llevado a cabo, en general, por una bomba rotativa o alternativa. Por tratarse del bombeo de una solución líquida este trabajo es muy inferior comparado con el de compresión mecánica.

Figura A.1. Esquema de un sistema de refrigeración por absorción estándar con sus componentes básicos.



Una variante de los sistemas de absorción, utilizado en pequeñas aplicaciones, emplea un tercer componente (hidrógeno o helio) que permite, además de realizar otras funciones, eliminar el aporte externo de trabajo para circulación. Estos sistemas son los del tipo **absorción por difusión**, sin bomba.

A.3 COMPONENTES

De acuerdo a la figura A1 el refrigerante pasa a través del condensador, la válvula de expansión y el evaporador en la misma secuencia que en un

sistema por compresión de vapor. En los ciclos de absorción, la compresión mecánica es reemplazada por los procesos termoquímicos de absorción y separación; el compresor se reemplaza por el absorbedor, el generador-separador y el dispositivo de bombeo de solución y el aporte de energía externa para trabajo de compresión mecánica por calor en el generador y un aporte muy pequeño para trabajo de circulación.

A.3.1 Absorbedor. El vapor de refrigerante llega a esta parte donde es absorbido mediante una reacción exotérmica con la solución pobre que había en el generador y que pasa hasta aquí a través de una válvula de estrangulamiento (Restrictor 2. El líquido resultante con alto contenido de refrigerante, es impulsado por una bomba que lo lleva nuevamente al generador donde de nuevo comienza el ciclo. El absorbedor es un dispositivo en el que el vapor del fluido refrigerante, es absorbido por un líquido absorbente, resultando una solución líquida. En este componente, el líquido que actúa como absorbente, absorbe el refrigerante vaporizado procedente del evaporador, produciendo calor, es decir, la formación de esta solución líquida es exotérmica. Como la cantidad de refrigerante que puede disolverse en agua aumenta cuando la temperatura de la solución disminuye, alrededor del absorbedor circula agua de refrigeración para retirar la energía liberada Q_1^{**} al entrar el refrigerante en la solución y mantener la temperatura del absorbedor lo más baja posible. La solución rica deja el absorbedor y entra en la bomba, donde aumenta su presión hasta el generador.

A.3.2 Generador. La mezcla rica que proviene del absorbedor es calentada mediante una fuente térmica que suministra un calor Q_3 , el cual hace evaporar el refrigerante y pasa al condensador donde se licua; a continuación

pasa por una válvula de estrangulamiento (Restrictor 1, disminuyendo su presión, y llega al evaporador donde se vaporiza al extraer el calor Q_2 del espacio a enfriar. En el generador se produce un aumento de la temperatura de la solución con lo que se desprende vapor de refrigerante quedando la solución débil por falta de este compuesto. La solución débil, caliente, va al absorbedor y el vapor pasa al condensador donde se licua al liberar calor Q_1^* al medio exterior.

A.3.3 Condensador. Un condensador es un intercambiador de calor. Existe poca diferencia técnica entre un condensador de un sistema de compresión de vapor y uno de absorción. La diferencia radica en que en el primer caso este componente recibe vapor caliente de refrigerante a alta presión del compresor, mientras que en el sistema por absorción es recibido del generador y rectificador. En ambos casos, en el condensador el vapor se enfría por aire o agua hasta llevarlo al estado líquido. Existen varios tipos de condensadores, entre los cuales están: condensador de casco y tubos, condensador de casco y serpentín, condensador enfriado por agua, condensador enfriado por aire y condensador evaporativo, siendo este último una combinación de un condensador atmosférico y una torre de enfriamiento de tiro forzado, donde el haz de tubos se encuentra dentro de la torre.

A.3.4 Evaporador. Este componente es también un intercambiador de calor. En él, el refrigerante se evapora al absorber calor del medio a enfriar. Se podría pensar que en el evaporador siempre hay vapor, lo cual no es cierto, pues está lleno de líquido que evapora al recibir calor del recinto que se enfría. El evaporador es alimentado por el líquido refrigerante que viene desde el condensador y pasa por la válvula de expansión. En el sistema por

absorción, el vapor de refrigerante, producido en el evaporador, pasa al absorbedor. Los tipos de evaporadores más conocidos son: evaporador de caso y tubos, evaporador de expansión directa, evaporador inundado y evaporador seco, en donde el refrigerante está en forma de gotas.

A.3.5 Restrictores. Dado que en los sistemas de refrigeración por absorción se manejan dos presiones: presión de alta, en generador, rectificador y condensador; y presión de baja, en el evaporador y condensador; es necesario utilizar dispositivos que produzcan una caída de presión o resistencia deliberada en una línea al reducir la sección transversal del flujo. Estos dispositivos se llaman *restrictores* y se pueden considerar como separadores de presiones de alta y baja.

A.3.6 Rectificador. Es un dispositivo colocado entre el generador y el condensador, su función es retirar los restos de líquido absorbente que aún están mezclado con el vapor de refrigerante, antes de entrar en el condensador, lo que elimina la posibilidad de la formación de hielo, en el caso de que el absorbente fuera agua, en la válvula de expansión y en el evaporador lo que conllevaría, muy seguramente, a la obstrucción de tuberías.

En la tabla A1 se muestra un resumen de los componentes del sistema por absorción y sus funciones, las temperaturas que se manejan en cada uno de ellos y las presiones que mantienen.

Tabla A.1. Resumen de los componentes de un sistema de refrigeración por absorción, sus funciones, temperaturas que manejan y presiones que mantienen

Componente	Función	Temperatura	Presión
Absorbedor	Donde el absorbente absorbe el refrigerante produciéndose una reacción exotérmica. La solución que aquí se consigue es fuerte y va hasta el generador.	Baja	Baja
Generador	Donde se produce la separación del refrigerante y el líquido absorbente. El vapor de refrigerante va al condensador y el líquido con poco refrigerante va de nuevo al absorbedor (solución pobre).	Alta	Alta
Restrictor 2	Se estrangula la solución pobre que proviene del generador y va hacia el absorbedor. Separa las presiones baja y alta.	Baja a alta	Baja a alta
Rectificador	Donde se separa los restos de líquido absorbente que todavía estaban mezclados con el vapor refrigerante haciéndose este más puro.	Alta	Alta
Condensador	Donde el vapor caliente se licua y enfría al expulsar calor al medio exterior.	Baja	Alta
Restrictor 1	Por la estrangulación que aquí se produce el líquido refrigerante se enfría aun más. Se da una separación entre presiones alta y baja.	Baja a más baja	Alta a baja
Evaporador	Donde el refrigerante líquido y frío, después de pasar por el restrictor 1, se evapora al extraer calor del medio a enfriar. Este vapor pasa al absorbedor.	Baja	Baja

A.4 CÁLCULO DEL COEFICIENTE DE OPERACIÓN (COP)

El rendimiento de refrigeradores se expresa en términos del COP , el cuál se define como $COP = \frac{\text{Salida deseada}}{\text{Entrada requerida}}$ la salida deseada es el efecto de

enfriamiento o *efecto refrigerante* y la entrada requerida es la energía necesaria para producir tal efecto, por tanto, como en el sistema por absorción esa energía es entregada como calor en el generador y como trabajo en la bomba de solución, tenemos que el

$$COP = \frac{\text{Efecto refrigerante}}{\text{Calor entregado en el generador} + \text{Trabajo de bomba}}.$$
 La energía en

forma de trabajo suministrada a la bomba es pequeña comparada con la energía que en forma de calor se suministra en el generador, luego podemos despreciar al *Trabajo de bomba* y obtener:

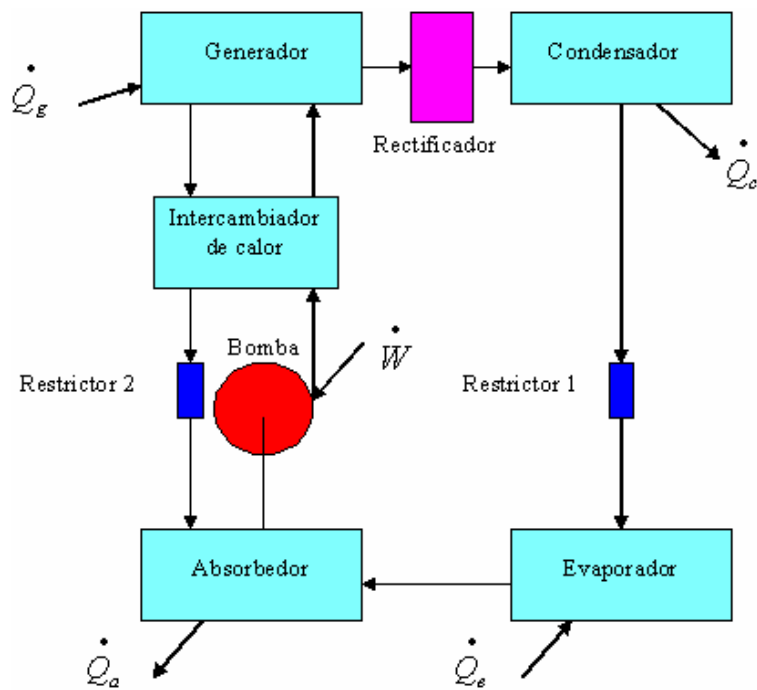
$$COP = \frac{\text{Efecto refrigerante}}{\text{Calor entregado en el generador}}$$

Para obtener el calor entregado en el generador aplicaremos la primera y segunda ley de la termodinámica, por cual consideraremos todas las transferencias energéticas presentes en esta clase de sistemas. En el esquema de la figura 3, se muestra todas las interacciones de energía en un sistema de refrigeración por absorción. Donde:

- $\dot{Q}_g$ es el calor entregado al generador.
- $\dot{Q}_c$ es el calor vertido al ambiente desde el condensador.

- $\dot{Q}_e$ es el calor extraído del espacio refrigerado, mediante el evaporador.
- $\dot{Q}_a$ es el calor generado por la reacción térmica de la absorción (reacción exotérmica)
- $\dot{W}$ es el trabajo entregado por la bomba.

Figura A.3. Interacciones de energía en un sistema de refrigeración por absorción.



De acuerdo al esquema podemos notar que el efecto refrigerante consiste en

sacar calor del espacio a refrigerar, por lo que $COP = \frac{\dot{Q}_e}{\dot{Q}_g}$.

Al aplicar la primera ley de la termodinámica, tenemos:

$\dot{Q}_a + \dot{Q}_c = \dot{Q}_e + \dot{Q}_g + \dot{W} \dots 1$. Si consideramos a T_0 como la temperatura del medio

ambiente y $\dot{Q}_a + \dot{Q}_c = \dot{Q}_0 \dots 2$. Donde $\dot{Q}_0$ es el calor total expulsado al ambiente a T_0 . De acuerdo a la segunda ley de la termodinámica, la entropía del

universo es positiva pues es un proceso irreversible, es decir $\Delta S > 0$; pero

$\Delta S = \Delta S_o + \Delta S_g + \Delta S_e$ de donde $\Delta S = \frac{\dot{Q}_0}{T_o} - \frac{\dot{Q}_g}{T_g} - \frac{\dot{Q}_e}{T_e}$, donde T_g y T_e son las

temperaturas del generador y recinto a enfriar, respectivamente. Luego

$\frac{\dot{Q}_0}{T_o} - \frac{\dot{Q}_g}{T_g} - \frac{\dot{Q}_e}{T_e} > 0 \dots 3$. Al reemplazar **2** en **1** obtenemos

$\frac{\dot{Q}_a + \dot{Q}_c}{T_o} - \frac{\dot{Q}_g}{T_g} - \frac{\dot{Q}_e}{T_e} > 0 \dots 4$. Si reemplazamos **1** en **4** tenemos:

$\frac{\dot{Q}_e + \dot{Q}_g + \dot{W}}{T_o} - \frac{\dot{Q}_g}{T_g} - \frac{\dot{Q}_e}{T_e} > 0$ entonces $\frac{\dot{Q}_e}{T_o} + \frac{\dot{Q}_g}{T_o} + \frac{\dot{W}}{T_o} - \frac{\dot{Q}_g}{T_g} - \frac{\dot{Q}_e}{T_e} > 0$ y si

reordenamos los términos $\frac{\dot{Q}_e}{T_o} - \frac{\dot{Q}_e}{T_e} + \frac{\dot{Q}_g}{T_o} - \frac{\dot{Q}_g}{T_g} > -\frac{\dot{W}}{T_o}$ entonces

$\frac{\dot{Q}_g}{T_o} - \frac{\dot{Q}_g}{T_g} > -\frac{\dot{W}}{T_o} - \frac{\dot{Q}_e}{T_o} + \frac{\dot{Q}_e}{T_e} \Rightarrow \dot{Q}_g \left(\frac{1}{T_o} - \frac{1}{T_g} \right) > -\frac{\dot{W}}{T_o} + \dot{Q}_e \left(\frac{1}{T_e} - \frac{1}{T_o} \right)$ al multiplicar por

T_0 , tenemos $\dot{Q}_g \left(1 - \frac{T_o}{T_g} \right) > \dot{Q}_e \left(\frac{T_o}{T_e} - 1 \right) - \dot{W}$ Si despreciamos el trabajo de bomba,

obtenemos $\dot{Q}_g \left(1 - \frac{T_o}{T_g} \right) > \dot{Q}_e \left(\frac{T_o}{T_e} - 1 \right)$ y al dividir por $\dot{Q}_g$ tenemos

$$\left(1 - \frac{T_o}{T_g}\right) > \frac{\dot{Q}_e}{\dot{Q}_g} \left(\frac{T_o}{T_e} - 1\right) \Rightarrow \left(1 - \frac{T_o}{T_g}\right) > \frac{\dot{Q}_e}{\dot{Q}_g} \left(\frac{T_o - T_e}{T_e}\right) \quad \text{al despejar } \frac{\dot{Q}_e}{\dot{Q}_g} \quad \text{tenemos}$$

$$\frac{\dot{Q}_e}{\dot{Q}_g} < \left(1 - \frac{T_o}{T_g}\right) \left(\frac{T_e}{T_o - T_e}\right) \text{ y como } COP = \frac{\dot{Q}_e}{\dot{Q}_g} \text{ entonces } COP < \left(1 - \frac{T_o}{T_g}\right) \left(\frac{T_e}{T_o - T_e}\right). \text{ Si}$$

no existen irreversibilidades internas y externas $\Delta S_{UNIVERSO} = 0$ y se obtiene en

consecuencia que el máximo valor del COP es $COP_{MAX} = \left(1 - \frac{T_o}{T_g}\right) \left(\frac{T_e}{T_o - T_e}\right)$. De

acuerdo a esta última ecuación notamos que el COP_{MAX} aumentará cuando T_g aumente.

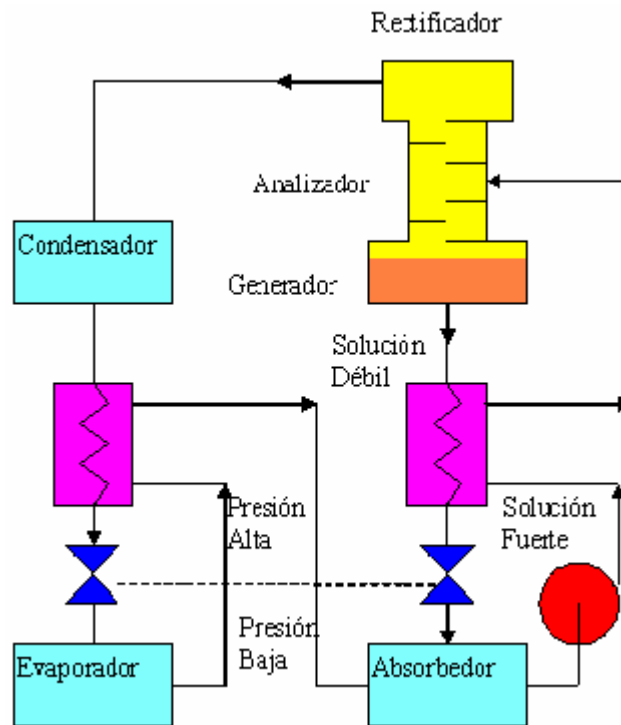
A.5 TIPOS DE SISTEMAS DE ABSORCIÓN

A.5.1 Sistemas de amoníaco - agua. Este sistema es uno de los más antiguos. En este caso el amoníaco es el refrigerante y el agua es el absorbente. Debido a que tanto el agua como el amoníaco son volátiles, el generador del ciclo simple debe ser reemplazado por la combinación de un generador, un rectificador y un analizador, como se muestra en la figura 3. Esto es necesario para separar casi todo el vapor de agua del vapor de amoníaco. Se puede observar que se ha agregado un intercambiador de calor adicional.

El analizador es un intercambiador de calor de contacto directo, que consiste en una serie de bandejas montadas encima del generador. La solución fuerte procedente del absorbedor fluye hacia abajo por las bandejas, para enfriar el vapor que sube procedente del generador. La reducción final del porcentaje

de vapor tiene lugar en el rectificador, que es un intercambiador de calor el cual condensa vapor de agua y algo de amoníaco y lo devuelve al generador.

Figura A.3. Sistema industrial de absorción amoníaco - agua



La ubicación del intercambiador de calor entre el generador y absorbedor es ideal. La solución fuerte bombeada desde el absorbedor al generador debe calentarse, y por el contrario, la solución débil que va del generador al absorbedor debe enfriarse. Por tanto, un intercambiador de calor entre las dos corrientes reduce el costo, tanto del calentamiento del generador como del enfriamiento del absorbedor.

Los sistemas amoníaco – agua son muy usados en refrigeradores domésticos y en sistemas comerciales e industriales donde la temperatura en el evaporador se mantiene cerca o debajo de 0°C .

A.5.2 Sistemas bromuro de litio – agua. Cuando el agua helada va a permanecer a una temperatura por encima del punto de congelación, como ocurre en la mayoría de los sistemas de aire acondicionado, se utiliza el sistema de enfriamiento por absorción de bromuro de litio – agua. En este, el agua es el refrigerante y el bromuro de litio el absorbente. El bromuro de litio es una sustancia sólida, higroscópica, que cuando absorbe una concentración de agua de alrededor del 30% pasa al estado líquido. Ningún vapor de bromuro de litio sale del generador acompañando al vapor de agua, lo que evita añadir al sistema un analizador y rectificador. Esta es una diferencia respecto al sistema agua amoníaco.

Las presiones en todas las partes del sistema son menores que la atmosférica. Por ejemplo, para conseguir una temperatura de evaporación de 7.2°C , la presión absoluta debe ser de 7.5 mm de Hg , por tanto hay que prever purgas para el caso de que el sistema tenga fugas.

Los sistemas de bromuro de litio – agua de calentamiento directo fueron muy populares durante muchos años, cuando el gas combustible era barato y los sistemas de compresión de vapor tenían un costo de mantenimiento más alto. El interés en estos sistemas se fue desvaneciendo cuando cambiaron las condiciones económicas y continuaron las mejoras en los sistemas de compresión. Sin embargo, la actual preocupación por el medio ambiente y las consecuentes restricciones a los refrigerantes de halocarburos han producido

un renovado interés en el sistema de bromuro de litio – agua, el cual no libera gases dañinos a la atmósfera.

El sistema de bromuro de litio – agua es más sencillo y funciona con un *COP* más elevado que el sistema amoníaco – agua. Su desventaja principal es la temperatura de evaporación relativamente alta y la presión baja dentro del sistema.

Se han adaptado sistemas de absorción a unidades de refrigeración de tamaños que van desde el frigorífico doméstico hasta 3000 toneladas. En la actualidad, la mayoría de los sistemas de acondicionamiento de aire usan la solución e bromuro de litio – agua, mientras que las unidades industriales para refinerías, plantas químicas e industrias usan preferentemente la solución agua – amoníaco. Cualquier aplicación de la absorción que requiera temperatura por debajo de los 2°C debe usar amoníaco – agua.

En la figura 4 se muestra un esquema de un sistema comercial que corresponde a una unidad fabricada por *Carrier Corporation*. En este sistema hay ciertas variaciones respecto al sistema básico. Hay un intercambiador de calor entre las soluciones débil y fuerte para conseguir mejor rendimiento, y unas bombas para hacer circular el líquido del evaporador y la solución del absorbedor.

A.5.3 Sistemas electrolux. Una versión del sistema de absorción, desarrollada por *Carl Munters* y *Baltzer von Platen* en Suecia, funciona sin bomba de líquido. La circulación se realiza en virtud de las diferencias de densidades de los fluidos. La evaporación del refrigerante tiene lugar en

presencia de un tercer componente del sistema. La figura 5 muestra un diagrama esquemático de un sistema Electrolux simple.

Figura A.4. Esquema de un sistema enfriador de agua comercial que funciona según un ciclo de absorción de agua en bromuro de litio.

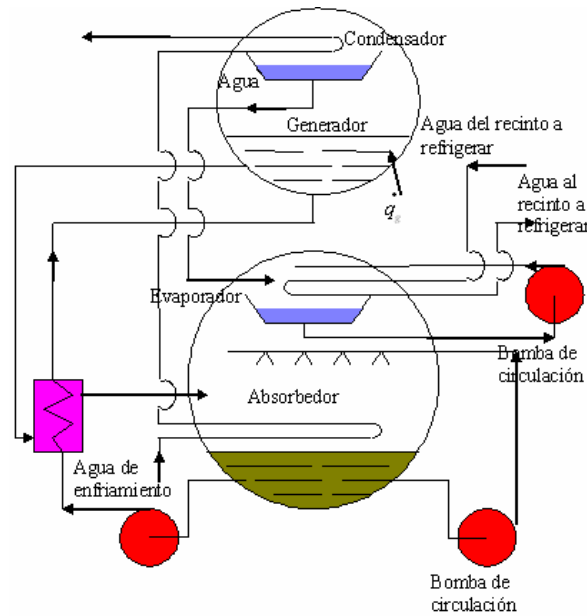
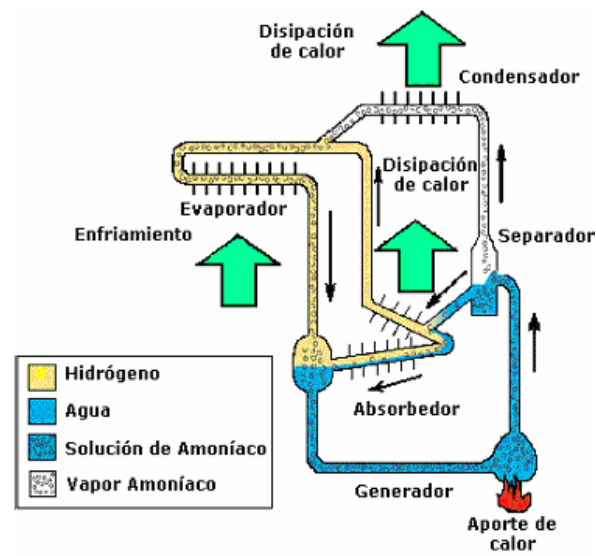


Figura A.5. Diagrama esquemático de un sistema por absorción Electrolux.



El refrigerante es amoníaco y el absorbente agua. El generador recibe calor de una llama, por lo que se desprende calor de amoníaco. En vez de tratar de conseguir la separación del líquido y el vapor en el generador, la salida del generador está proyectada para que el vapor procedente del generador arrastre una lluvia de burbujas líquidas hasta el separador. Desde el separador el vapor va al condensador y el líquido desagua en el absorbedor. El amoníaco líquido procedente del condensador cae al evaporador, donde recibe calor y se vaporiza. En el absorbedor la solución débil procedente del separador absorbe el vapor procedente del evaporador. La mezcla vuelve después al generador, y allí comienza de nuevo el ciclo.

El ciclo frigorífico se basa en la ley de Dalton: "La presión total de una mezcla de gases confinados en un espacio es igual a la suma de las presiones parciales de cada uno de los gases de la mezcla". Además de amoníaco y agua en el evaporador y en el absorbedor hay hidrógeno o helio presente. En todas partes del sistema la presión es la misma correspondiendo a la suma de la presión de vapor de amoníaco y la de hidrógeno (o helio).

El hidrógeno se eleva a través del absorbedor y retorna al evaporador. De esta forma se asegura una secuencia de procesos de intercambio de calor y masa en forma continua en tanto se mantenga el aporte de calor en el generador.

El sistema no requiere energía mecánica externa para circulación de los distintos fluidos. Los gases y vapores circulan en forma termoconvectiva y de acuerdo con las diferencias de densidades determinadas por las temperaturas y las correspondientes presiones.

Las soluciones rica y pobre circulan en forma gravitatoria a partir de las diferencias de niveles dentro del equipo. La altura máxima de la solución pobre que alimenta el absorbedor queda determinada por el efecto ascensional de las burbujas de vapor de amoníaco empujando a la solución pobre remanente que se forman al calentar la solución rica en el generador.

El aporte de calor en el generador puede ser obtenido de una llama por combustión directa de gas natural, envasado, biogás o kerosén; circulación de un fluido con alta temperatura (agua caliente, sobrecalentada o fluido térmico) generado en un calentador externo o paneles solares.

Se utiliza principalmente este sistema en refrigeradores domésticos. Aunque el refrigerante amoníaco es tóxico, las posibilidades de fugas son remotas y, por otra parte, la cantidad de amoníaco en el sistema es tan pequeña que el peligro es mínimo.

A.6 PROPIEDADES Y PROCESOS DE LAS MEZCLA BINARIAS

Una mezcla homogénea tiene una composición uniforme, y no puede ser separada en sus componentes constituyentes utilizando sólo medios mecánicos. Propiedades tales como presión, densidad y temperatura son uniformes a través de toda la mezcla.

El estado termodinámico de una mezcla no puede especificarse enunciando dos propiedades independientes como podría hacerse en el caso de una sustancia pura. Se requiere indicar la composición de la mezcla tal como la describe la concentración x (la razón entre la masa de un constituyente y la

masa de la mezcla), además de otras dos propiedades independientes (presión y temperatura).

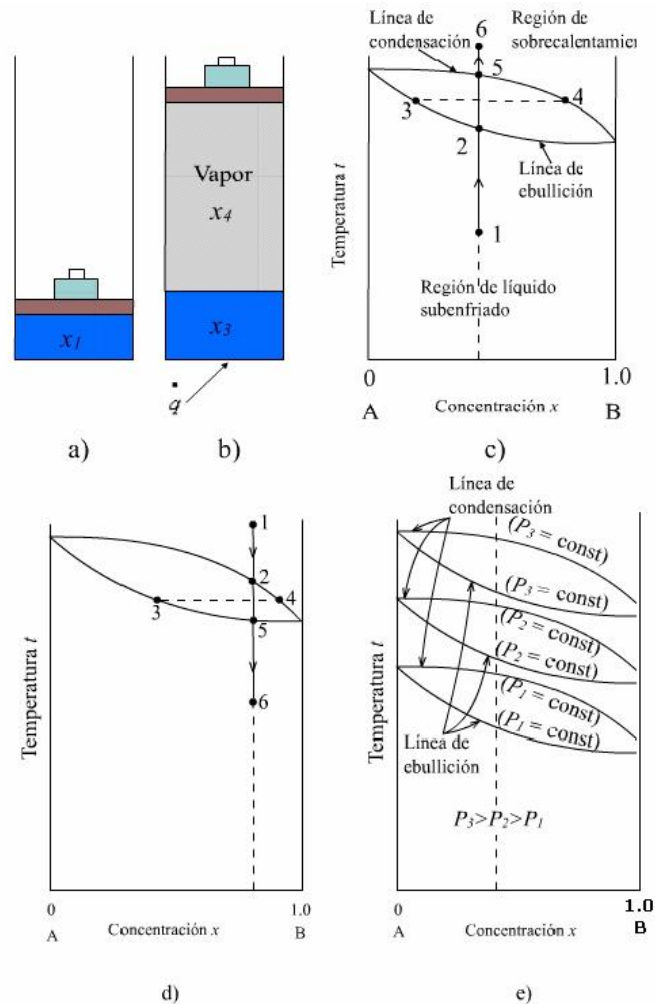
La miscibilidad de una mezcla es una característica particularmente importante para un sistema de absorción. Una mezcla es miscible si sus componentes no se separan después de mezclarlos. Una mezcla miscible es homogénea. Algunas mezclas miscibles pueden dejar de serlo bajo ciertas condiciones, especialmente cuando cambia su temperatura. La mezcla de aceite y refrigerante 22 es miscible a altas temperaturas, pero a bajas temperaturas es inmiscible. Las mezclas binarias para un ciclo de refrigeración por absorción deben ser completamente miscibles tanto en su fase líquida como en su fase gaseosa, y esta miscibilidad debe ser continua, sin interrupciones.

En la refrigeración por absorción es importante el comportamiento de una mezcla binaria en la vecindad de la región de saturación. Para comprender este comportamiento, resulta útil el uso de experimentos imaginarios, así como de un diagrama de temperatura versus concentración. En la figura A6a se muestra un arreglo pistón cilindro que contiene una mezcla binaria en la fase líquida, con una concentración x_1 de material B. El pistón tiene una masa fija y opera sin fricción, de manera que la presión de la mezcla siempre es constante. La figura A6c es el diagrama $T - x$ para la mezcla, en el punto 1 es el estado inicial. A medida que el calor es transferido a la mezcla, aumenta la temperatura; en el punto 2 comienza a formarse vapor, el cual se acumula bajo el pistón, como se muestra en la figura A6b. Si para el experimento en algún punto por encima de esta temperatura y se determinan las concentraciones de vapor y líquido, se observará un resultado un poco sorprendente. Por ejemplo, el estado del líquido está en el punto 3, mientras

que el estado del vapor está en el punto 4, y la concentración de material B en el vapor (x_4) es mayor que en el líquido (x_3).

El calentamiento continuo de la mezcla vaporizará de manera gradual todo el líquido (estado del punto 5) con una concentración de $x_5 = x_1$. El calentamiento adicional sobrecalentará el vapor hasta el punto 6. Cuando el vapor sobrecalentado se enfríe a presión constante, todo el proceso se revertirá, como se muestra en la figura A6d. Experimentos adicionales realizados a diferentes concentraciones pero a la misma presión establecen líneas de ebullición y líneas de condensación como las que se muestran en la figura A6e. A diferencia de las sustancias puras, las mezclas binarias no tienen una sola temperatura de saturación para cada nivel de presión, debido a que las temperaturas de saturación dependen de la concentración.

Figura A.6.



La carta 2 es una diagrama entalpía concentración para una mezcla de agua y amoníaco. La carta 2 cubre las regiones de subenfriamiento y de saturación, pero no tiene línea de temperatura de la región del vapor. Las líneas de temperatura constante en la región de saturación se ubican utilizando líneas de construcción de equilibrio. Se traza una línea vertical, hacia arriba, desde el estado de líquido saturado a la línea de construcción de equilibrio para la misma presión. Desde este punto se traza una línea horizontal hasta la línea del vapor saturado para la misma presión. Esta intersección nos da el punto

del estado de vapor saturado. La isoterma para la temperatura dada es la línea recta que conecta los estados de líquido saturado y vapor.

A.6.1 Tipos de diagramas. Los diagramas de entalpía – concentración se pueden resumir en dos tipos:

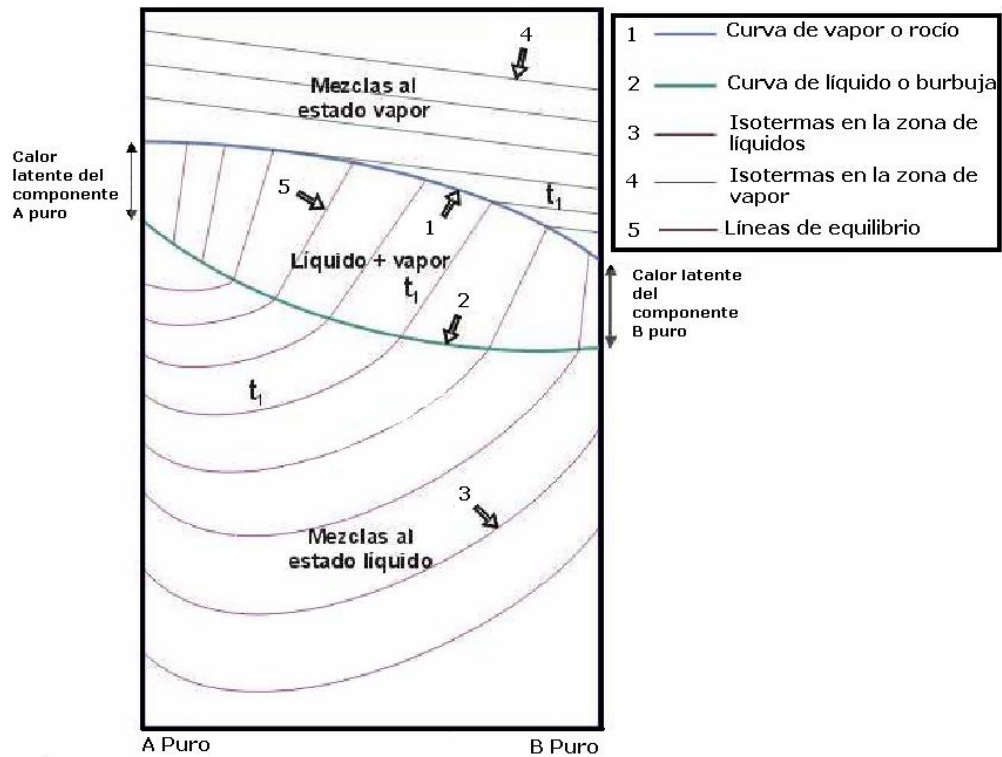
- ❖ Diagramas donde los componentes son volátiles
- ❖ Diagramas donde un componente es volátil y el otro no.

Un diagrama típico donde los dos componentes son volátiles se muestra en la figura A7.

La curva de vapor (o rocío) representa las entalpías de los vapores saturados (a su temperatura de condensación) de todas las mezclas. Por encima de la curva de vapor todas las mezclas están en estado de vapor.

La curva de líquido (o burbuja) representa las entalpías de todos los líquidos saturados (a su temperatura de ebullición) de todas las mezclas. Por debajo de la curva de líquido todas las mezclas están al estado líquido. Entre la curva de vapor y la del líquido existen dos fases en equilibrio (una al estado vapor y otra al estado líquido).

Figura A.7. Diagrama entalpía concentración típico cuando los dos componentes son volátiles.



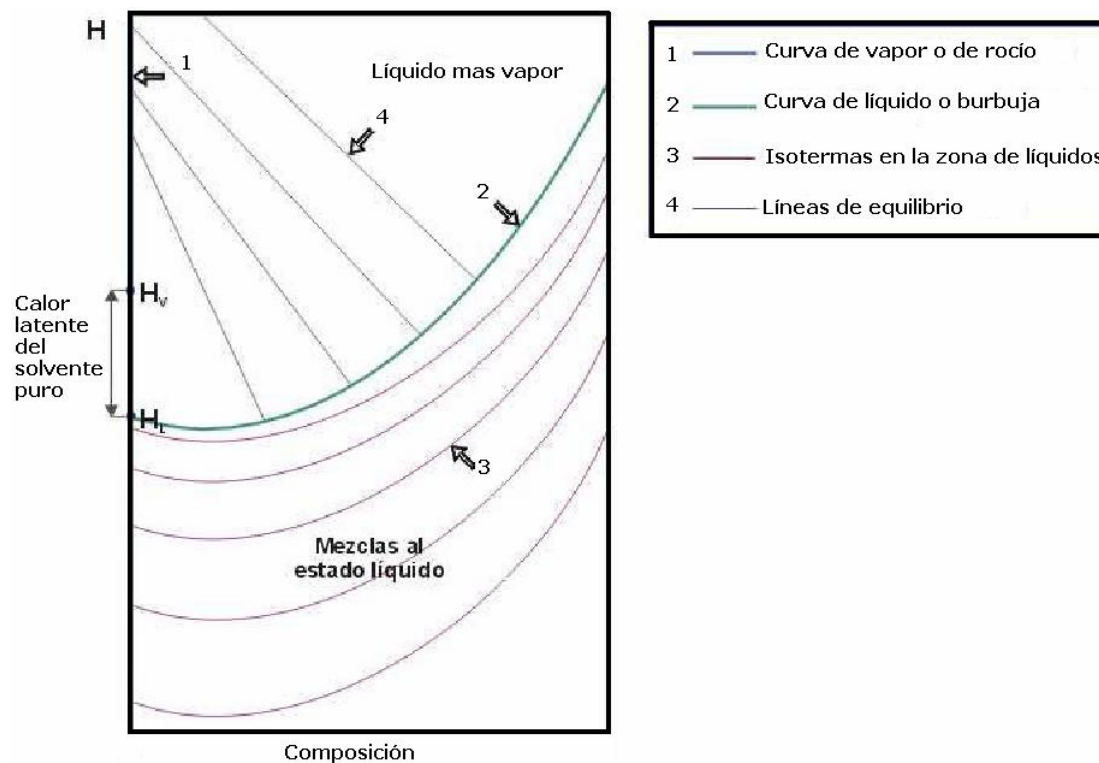
Las isotermas en la zona de vapor son las entalpías de cualquier mezcla al estado vapor a una temperatura determinada (normalmente son rectas ya que los vapores no tienen calor de mezcla). La composición de un líquido y un vapor en equilibrio son distintos, por eso se les une por medio de una línea de equilibrio. Estas líneas son verticales para los componentes puros (ya que para ellos la composición del líquido es igual a la del vapor) y tienen una cierta inclinación dentro del diagrama (ya que las composiciones del líquido y vapor son distintas).

Una isoterma, a una temperatura t_1 , cuando toca la curva de líquido intercepta a una línea de equilibrio (que une las composiciones de un vapor y

un líquido en equilibrio a la misma temperatura). Cuando la curva de equilibrio toca a la curva de vapor intercepta a otra isoterma (correspondiente a la zona de vapor) que tiene la misma temperatura t_1 , por lo que una isoterma de la zona de líquidos, la línea de equilibrio y la isoterma de la zona de vapor, constituyen una sola isoterma.

En la figura A8 se muestra el otro tipo de diagrama de entalpía concentración, que correspondiente a dos componentes donde uno es volátil y el otro no (puede ser una sal, una base, etc.).

Figura A.8. Diagrama entalpía concentración típico cuando uno de los componentes es volátil y el otro no.



La diferencia que presenta con el primer tipo de diagrama es que el vapor en equilibrio con una mezcla (a la misma temperatura) está constituido solamente por solvente puro (ya que el otro componente es no volátil), es por ello que la curva de vapor es una línea recta que coincide con el componente volátil puro y todas las líneas de equilibrio se dirigen hacia ella.

Normalmente en este tipo de diagramas las composiciones de la mezcla varían desde el componente volátil puro hasta una solución concentrada (ya que la curva de líquido, a medida que aumenta la concentración del componente no volátil, se hace muy empinada, pues la temperatura de ebullición aumenta considerablemente).