



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE  
CHIMBORAZO**

**FACULTAD DE MECÁNICA  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**“DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y PRUEBAS DE UN  
INTERCAMBIADOR DE CALOR TIPO BAUDELLOT  
PARA EL LABORATORIO”**

**AUCANCELA GUACHO JOSÉ LUIS  
VARGAS ACOSTA JUAN GABRIEL**

**TESIS DE GRADO**

Previa a la obtención del Título de:

**INGENIERO MECÁNICO**

**RIOBAMBA – ECUADOR**

**2014**

**ESPOCH**

Facultad de Mecánica

---

**CERTIFICADO DE APROBACIÓN DE TESIS**

---

2011-12-20

Yo recomiendo que la Tesis preparada por:

---

**JOSÉ LUIS AUCANCELA GUACHO**

---

Titulada:

**“DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y PRUEBAS DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR TIPO BAUDELLOT PARA EL LABORATORIO”**

Sea aceptada como parcial complementación de los requerimientos para el Título de:

**INGENIERO MECÁNICO**

---

Ing. Marco Santillán Gallegos  
DECANO DE LA FAC. DE MECÁNICA

Nosotros coincidimos con esta recomendación:

---

Ing. Ramiro Valenzuela Suárez  
DIRECTOR DE TESIS

---

Ing. Pablo Montalvo Jaramillo  
ASESOR DE TESIS

# ESPOCH

Facultad de Mecánica

---

## CERTIFICADO DE EXAMINACIÓN DE TESIS

---

**NOMBRE DEL ESTUDIANTE: JOSÉ LUIS AUCANCELA GUACHO**

**TÍTULO DE LA TESIS: “DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y PRUEBAS DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR TIPO BAUDELLOT PARA EL LABORATORIO”**

**Fecha de Examinación: 2013-04-30**

**RESULTADO DE LA EXAMINACIÓN:**

| COMITÉ DE EXAMINACIÓN                                     | APRUEBA | NO APRUEBA | FIRMA |
|---|---------|------------|-------|
| Ing. Marco Santillán Gallegos<br>PRESIDENTE TRIB. DEFENSA |         |            |       |
| Ing. Ramiro Valenzuela S.<br>DIRECTOR DE TESIS            |         |            |       |
| Ing. Pablo Montalvo J.<br>ASESOR                          |         |            |       |

\* Más que un voto de no aprobación es razón suficiente para la falla total.

**RECOMENDACIONES:** \_\_\_\_\_

---

El Presidente del Tribunal certifica que las condiciones de la defensa se han cumplido.

---

Ing. Marco Santillán Gallegos  
PRESIDENTE DEL TRIBUNAL

**ESPOCH**

Facultad de Mecánica

---

**CERTIFICADO DE APROBACIÓN DE TESIS**

---

2011-12-20

Yo recomiendo que la Tesis preparada por:

**JUAN GABRIEL VARGAS ACOSTA**

---

Titulada:

**“DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y PRUEBAS DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR TIPO BAUDELLOT PARA EL LABORATORIO”**

Sea aceptada como parcial complementación de los requerimientos para el Título de:

**INGENIERO MECÁNICO**

---

Ing. Marco Santillán Gallegos  
DECANO DE LA FAC. DE MECÁNICA

Nosotros coincidimos con esta recomendación:

---

Ing. Ramiro Valenzuela Suárez  
DIRECTOR DE TESIS

---

Ing. Pablo Montalvo Jaramillo  
ASESOR DE TESIS

# ESPOCH

Facultad de Mecánica

---

## CERTIFICADO DE EXAMINACIÓN DE TESIS

---

**NOMBRE DEL ESTUDIANTE: JUAN GABRIEL VARGAS ACOSTA**

**TÍTULO DE LA TESIS: “DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y PRUEBAS DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR TIPO BAUDELLOT PARA EL LABORATORIO”**

**Fecha de Examinación: 2013-04-30**

**RESULTADO DE LA EXAMINACIÓN:**

| COMITÉ DE EXAMINACIÓN                                     | APRUEBA | NO APRUEBA | FIRMA |
|---|---------|------------|-------|
| Ing. Marco Santillán Gallegos<br>PRESIDENTE TRIB. DEFENSA |         |            |       |
| Ing. Ramiro Valenzuela S.<br>DIRECTOR DE TESIS            |         |            |       |
| Ing. Pablo Montalvo J.<br>ASESOR                          |         |            |       |

\* Más que un voto de no aprobación es razón suficiente para la falla total.

**RECOMENDACIONES:** \_\_\_\_\_

---

El Presidente del Tribunal certifica que las condiciones de la defensa se han cumplido.

---

Ing. Marco Santillán Gallegos  
PRESIDENTE DEL TRIBUNAL

## **DERECHOS DE AUTORÍA**

El trabajo de grado que presentamos, es original y basado en el proceso de investigación y/o adaptación tecnológica establecido en la Facultad de Mecánica de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. En tal virtud, los fundamentos teóricos - científicos y los resultados son de exclusiva responsabilidad de los autores. El patrimonio intelectual le pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

---

José Luis Aucancela Guacho

---

Juan Gabriel Vargas Acosta

## **DEDICATORIA**

Dedico este trabajo a dios por darme la sabiduría y regalarme esta maravillosa familia. Con mucho cariño principalmente a mis padres José y Francisca que me dieron la vida ya que por su amor y sacrificio he logrado conseguir uno de mis objetivos. Gracias papá y mamá por darme una carrera para mi futuro, por su infinita paciencia, aunque hemos pasado momentos difíciles siempre han estado apoyándome y brindándome todo su amor. A mis hermanos Paúl, Danny, Carlos gracias de todo corazón por su comprensión y ayuda, los quiero mucho.

**José Luis Aucancela Guacho**

Dedico este trabajo a mi padre y a mi madre que sin su paciencia, comprensión y amor nunca de esto hubiese sido posible, a mis hermanos que siempre estuvieron conmigo en todo momento de mi vida ustedes fueron mis guías, mis consejeros, mis amigos y mis ejemplos de vida.

**Juan Gabriel Vargas Acosta**

## **AGRADECIMIENTO**

El más sincero agradecimiento a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, en especial a la Escuela de Ingeniería Mecánica, por brindarnos la oportunidad de obtener una profesión y ser personas útiles a la sociedad.

Y en especial para todos los amigos, compañeros y personas que nos apoyaron de una u otra manera para culminar con éxito una etapa de nuestras vidas.

**José Luis Aucancela Guacho**

El más sincero agradecimiento a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, en especial a la Escuela de Ingeniería Mecánica, por brindarnos la oportunidad de obtener una profesión y ser personas útiles a la sociedad.

Y en especial para todos los amigos, compañeros y personas que nos apoyaron de una u otra manera para culminar con éxito una etapa de nuestras vidas.

**Juan Gabriel Vargas Acosta**

# CONTENIDO

|  | Pág. |
|--|------|
| <b>1. INTRODUCCIÓN</b>   |      |
| 1.1 Antecedentes.....  | 1    |
| 1.2 Justificación.....   | 2    |
| 1.3 Objetivos.....   | 2    |
| 1.3.1 <i>Objetivo general</i> .....  | 2    |
| 1.3.2 <i>Objetivos específicos</i> .....   | 2    |
| <b>2. FUNDAMENTO TEÓRICO</b>   |      |
| 2.1 Transferencia de calor.....  | 3    |
| 2.1.1 <i>Calor sensible</i> .....  | 4    |
| 2.1.1.1 <i>Transferencia de calor por conducción</i> .....                                       | 4    |
| 2.1.1.2 <i>Segundo principio de la termodinámica</i> .....                                       | 5    |
| 2.1.1.3 <i>Placa plana</i> .....   | 6    |
| 2.1.2 <i>Transferencia de calor por convección</i> .....   | 7    |
| 2.1.2.1 <i>Coficiente de transferencia de calor por convección</i> .....                         | 8    |
| 2.1.2.2 <i>Correlaciones de la convección</i> .....  | 10   |
| 2.1.3 <i>Relaciones empíricas para la transferencia de calor</i> .....                           | 14   |
| 2.1.3.1 <i>Flujo a través de un banco de tubos</i> .....   | 14   |
| 2.1.3.2 <i>Convección natural</i> .....  | 18   |
| 2.1.3.3 <i>Convección forzada</i> .....  | 19   |
| 2.1.3.4 <i>Correlaciones empíricas para flujos externos de convección forzada</i> .....          | 19   |
| 2.1.3.5 <i>Coficiente de transferencia de calor para flujo bifásico interno en evaporación..</i> | 20   |
| 2.2 Intercambiador de calor.....   | 24   |
| 2.2.1 <i>Clasificación de los intercambiadores de calor</i> .....                                | 25   |
| 2.2.2 <i>Aplicaciones de los intercambiadores de calor</i> .....                                 | 27   |
| 2.2.3 <i>Evaporadores</i> .....  | 28   |
| 2.2.3.1 <i>Clasificación de los evaporadores</i> .....   | 29   |
| 2.2.3.2 <i>Principio</i> .....   | 29   |
| 2.3 Intercambiador de calor tipo Baudelot.....   | 30   |
| 2.3.1 <i>Funcionamiento de un intercambiador de calor tipo Baudelot</i> .....                    | 31   |
| 2.3.2 <i>Tipos de paneles del intercambiador de calor tipo Baudelot</i> .....                    | 31   |
| 2.3.2.1 <i>Paneles PLATECOIL</i> .....   | 31   |
| 2.3.2.2 <i>Paneles ECONOCOIL</i> .....   | 32   |
| 2.4 Diseño de un intercambiador de calor.....  | 33   |
| 2.4.1 <i>Diseño térmico</i> .....  | 34   |
| 2.4.1.1 <i>Coficiente global de transferencia de calor</i> .....                                 | 34   |
| 2.4.1.2 <i>Método de la diferencia de temperaturas media logarítmica, LMTD</i> .....             | 36   |
| <b>3. DISEÑO DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR</b>   |      |
| 3.1 Generalidades.....   | 38   |
| 3.2 Principios de funcionamiento.....  | 38   |
| 3.3 Selección de materiales.....   | 40   |
| 3.3.1 <i>Placa</i> .....   | 40   |
| 3.3.2 <i>Tanques de distribución y recirculación</i> .....                                       | 41   |

|           |  |    |
|-----------|--|----|
| 3.4       | Diseño térmico del intercambiador de calor tipo Baudelot.....  | 42 |
| 3.4.1     | <i>Cálculo de la carga térmica.....</i>  | 42 |
| 3.4.2     | <i>Cálculo del coeficiente de transferencia de calor en el exterior de la placa.....</i>                                   | 44 |
| 3.4.2.1   | <i>Cálculo del coeficiente convectivo del agua.....</i>  | 45 |
| 3.4.3     | <i>Análisis termodinámico.....</i>   | 48 |
| 3.4.3.1   | <i>Refrigerante R-22.....</i>  | 48 |
| 3.4.4     | <i>Cálculo del coeficiente de transferencia de calor en el interior de la placa.....</i>                                   | 53 |
| 3.4.5     | <i>Cálculo térmico del evaporador.....</i>   | 59 |
| 3.4.5.1   | <i>Cálculo del coeficiente global de transferencia de calor.....</i>   | 59 |
| 3.4.5.2   | <i>Determinación del área de la placa o superficie de transferencia.....</i>   | 60 |
| 3.4.5.3   | <i>Cálculo de LMTD.....</i>  | 61 |
| 3.5       | Selección de equipos y accesorios.....   | 62 |
| 3.5.1     | <i>Selección de la unidad condensadora.....</i>  | 62 |
| 3.5.2     | <i>Selección del evaporador.....</i>   | 63 |
| 3.5.3     | <i>Selección de las láminas de acrílico.....</i>   | 64 |
| 3.5.4     | <i>Selección de bombas de agua.....</i>  | 65 |
| 3.5.5     | <i>Selección de las tuberías de agua.....</i>  | 66 |
| 3.5.6     | <i>Selección de válvula de expansión.....</i>  | 67 |
| 3.5.7     | <i>Selección de la válvula solenoide.....</i>  | 68 |
| 3.5.8     | <i>Selección de manómetros.....</i>  | 70 |
| 3.5.9     | <i>Selección de termostato de refrigeración.....</i>   | 70 |
| 3.5.10    | <i>Selección de filtro secador.....</i>  | 71 |
| 3.5.11    | <i>Selección de la tubería para refrigerante.....</i>  | 72 |
| 3.5.12    | <i>Selección de los elementos y componentes del sistema eléctrico.....</i>   | 73 |
| <b>4.</b> | <b>CONSTRUCCIÓN, MONTAJE Y AUTOMATIZACIÓN DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR</b>  |    |
| 4.1       | Generalidades.....   | 76 |
| 4.2       | Construcción del intercambiador de calor.....  | 76 |
| 4.2.1     | <i>Construcción del evaporador.....</i>  | 76 |
| 4.2.2     | <i>Construcción de la estructura principal.....</i>  | 77 |
| 4.2.3     | <i>Construcción del bastidor – soporte.....</i>  | 78 |
| 4.2.4     | <i>Construcción del tanque de almacenamiento.....</i>  | 78 |
| 4.2.5     | <i>Construcción del tanque de recirculación.....</i>   | 79 |
| 4.2.6     | <i>Cosntrucción del distribuidor.....</i>  | 80 |
| 4.2.7     | <i>Construcción de la tapa.....</i>  | 80 |
| 4.2.8     | <i>Construcción del panel de control.....</i>  | 81 |
| 4.3       | Montaje e instalación de los elementos del equipo.....   | 81 |
| 4.3.1     | <i>Montaje del evaporador en el bastidor – soporte.....</i>  | 82 |
| 4.3.2     | <i>Montaje del bastidor – soporte en la estructura principal.....</i>  | 82 |
| 4.3.3     | <i>Montaje del distribuidor en el tanque de recirculación.....</i>   | 83 |
| 4.3.4     | <i>Montaje de los tanques de almacenamiento y recirculación.....</i>   | 83 |
| 4.3.5     | <i>Montaje de tuberías de agua.....</i>  | 84 |
| 4.3.6     | <i>Montaje de bombas.....</i>  | 84 |
| 4.3.7     | <i>Montaje del sistema de refrigeración.....</i>   | 85 |
| 4.3.7.1   | <i>Planificación y ensamble de los elementos y componentes del sistema de refrigeración e instalación de tuberías.....</i> | 86 |
| 4.3.7.2   | <i>Instalación de los equipos y accesorios.....</i>  | 86 |
| 4.3.7.3   | <i>Prueba de fugas.....</i>  | 92 |

|           |  |     |
|-----------|--|-----|
| 4.3.7.4   | <i>Proceso de vacío</i> .....  | 92  |
| 4.3.7.5   | <i>Carga del refrigerante en el sistema</i> .....                                | 93  |
| 4.4       | Control automático.....  | 94  |
| 4.4.1     | <i>Introducción</i> .....  | 94  |
| 4.4.2     | <i>Control automático</i> .....  | 95  |
| 4.4.2.1   | <i>Ventajas del control automático industrial</i> .....                          | 96  |
| 4.4.2.2   | <i>Desventajas del control automático industrial</i> .....                       | 96  |
| 4.4.2.3   | <i>Factores de control</i> .....   | 96  |
| 4.4.2.4   | <i>Conocimientos básicos para la automatización</i> .....                        | 97  |
| 4.5       | Controladores lógicos programables.....  | 98  |
| 4.5.1     | <i>Relé inteligente Zelio</i> .....  | 98  |
| 4.5.2     | <i>Aplicaciones de los relés inteligentes Zelio</i> .....                        | 99  |
| 4.5.3     | <i>Dimensiones físicas del relé Zelio</i> .....                                  | 99  |
| 4.5.4     | <i>Presentación del panel frontal del módulo lógico</i> .....                    | 100 |
| 4.5.5     | <i>Consideraciones de funcionamiento del Zelio</i> .....                         | 102 |
| 4.5.6     | <i>Lenguajes de programación</i> .....   | 103 |
| 4.5.7     | <i>Características que tiene el software Zelio Soft 2</i> .....                  | 103 |
| 4.6       | Diseño del circuito eléctrico CPN conexiones del Zelio.....                      | 103 |
| 4.6.1     | <i>Elementos principales utilizados del software Zelio</i> .....                 | 107 |
| 4.6.2     | <i>Determinación de variables</i> .....  | 107 |
| 4.6.3     | <i>Simulación del programa</i> .....   | 110 |
| 4.6.4     | <i>Transferencia del programa</i> .....  | 110 |
| 4.7       | Construcción de un intercambiador de calor tipo Baudelot de placa sumergida..... | 111 |
| <b>5.</b> | <b>PRUEBAS EXPERIMENTALES, SEGURIDAD, OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO</b>              |     |
| 5.1.      | Pruebas.....   | 114 |
| 5.1.1     | <i>Objetivos de la prueba</i> .....  | 114 |
| 5.1.2     | <i>Equipos e instrumentación</i> .....   | 114 |
| 5.2       | Tabulación de resultados.....  | 116 |
| 5.2.1     | <i>Coefficiente global de transferencia de calor experimental</i> .....          | 118 |
| 5.3       | Seguridad.....   | 121 |
| 5.3.1     | <i>Manual de reglas de seguridad</i> .....                                       | 121 |
| 5.3.2     | <i>Puntos de seguridad</i> .....   | 122 |
| 5.3.2.1   | <i>Capacidad suficiente</i> .....  | 122 |
| 5.3.2.2   | <i>Suministro de energía eléctrica de emergencia</i> .....                       | 122 |
| 5.3.2.3   | <i>Protección contra sucesos externos y contra riesgos internos</i> .....        | 122 |
| 5.3.3     | <i>Precauciones</i> .....  | 122 |
| 5.3.3.1   | <i>Acciones necesarias</i> .....   | 122 |
| 5.3.3.2   | <i>Acciones no permitidas</i> .....  | 123 |
| 5.3.4     | <i>Usuarios u operarios del intercambiador de calor tipo Baudelot</i> .....      | 123 |
| 5.3.4.1   | <i>Condiciones de servicio no autorizadas</i> .....                              | 124 |
| 5.3.4.2   | <i>Usuarios autorizados</i> .....  | 124 |
| 5.3.4.3   | <i>Restos de peligros</i> .....  | 124 |
| 5.4       | Operación del equipo.....  | 125 |
| 5.4.1     | <i>Pasos para la puesta en marcha del equipo</i> .....                           | 126 |
| 5.4.1.1   | <i>Importante saber</i> .....  | 131 |
| 5.5       | Plan de mantenimiento.....   | 131 |
| 5.5.1     | <i>Generalidades</i> .....   | 132 |

|           |  |     |
|-----------|--|-----|
| 5.5.2     | <i>Mantenimiento preventivo</i> .....  | 132 |
| 5.5.2.1   | <i>Bitácora de mantenimiento</i> .....   | 133 |
| 5.5.3     | <i>Procedimientos operativos estándar del mantenimiento del intercambiador</i> ..... | 135 |
| 5.5.3.1   | <i>Parte mecánica</i> .....  | 135 |
| 5.5.3.2   | <i>Parte eléctrica</i> .....   | 147 |
| 5.5.4     | <i>Ventajas del programa de mantenimiento</i> .....                                  | 154 |
| <b>6.</b> | <b>COSTOS</b>  |     |
| 6.1       | Generalidades.....   | 156 |
| 6.1.1     | <i>Costos directos</i> .....   | 156 |
| 6.1.2     | <i>Costos indirectos de fabricación</i> .....  | 160 |
| 6.1.3     | <i>Costo total de fabricación</i> .....  | 161 |
| <b>7.</b> | <b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>  |     |
| 7.1       | Conclusiones.....  | 162 |
| 7.2       | Recomendaciones.....   | 163 |

## **BIBLIOGRAFÍA**

## **ANEXOS**

## **PLANO**

## LISTA DE TABLAS

|    | Pág.  |
|----|---|
| 1  | Constantes C y m para el banco de tubos en flujo cruzado.....16                             |
| 2  | Factor de corrección C2 para $NL < 20(Re > 10^3)$ .....17                                   |
| 3  | Parámetro de Kandlikar.....21   |
| 4  | Datos materiales de Econocoil.....41  |
| 5  | Propiedades del agua a temperatura promedio: $T_{pa} = 11^{\circ}C$ .....43                 |
| 6  | Propiedades del agua a temperatura de película $T_f$ .....45                                |
| 7  | Propiedades – Refrigerante R-22 .....53   |
| 8  | Dimensiones de la placa Econocoil como banco de tubos.....56                                |
| 9  | Datos para determinar el coeficiente global de transferencia de calor del evaporador.....59 |
| 10 | Detalles Zelio Logic.....100  |
| 11 | Características de la pantalla LCD del relé.....101   |
| 12 | Condiciones de funcionamiento del Zelio.....102   |
| 13 | Elementos del software Zelio.....107  |
| 14 | VARIABLES DE ENTRADA Y SALIDA DEL PLC.....107   |
| 15 | Datos iniciales para la prueba.....116  |
| 16 | Presiones antes de encender el equipo.....116   |
| 17 | Presiones en pleno trabajo.....117  |
| 18 | Resultado de temperaturas en función del tiempo.....117                                     |
| 19 | Bitácora de la estructura del equipo.....136  |
| 20 | Bitácora bomba eléctrica sumergible.....138   |
| 21 | Bitácora de unidad condensadora.....141   |
| 22 | Bitácora de tuberías y soldadura.....143  |
| 23 | Bitácora de los acoples.....144   |
| 24 | Bitácora de placa tipo Baudelot.....145   |
| 25 | Bitácora de manómetros.....146  |
| 26 | Bitácora del panel de control.....148   |
| 27 | Bitácora del presostato.....149   |
| 28 | Bitácora del PLC.....151  |
| 29 | Bitácora del sensor de temperatura.....152  |
| 30 | Bitácora de dispositivos eléctricos.....154   |
| 31 | Costos de la estructura metálica del banco de pruebas.....156                               |
| 32 | Costos de tanques de agua.....157   |
| 33 | Costos de la instalación de las cañerías.....157  |
| 34 | Costos del sistema de refrigeración.....158   |

|    |   |     |
|----|---|-----|
| 35 | Costos del sistema eléctrico y control..... | 158 |
| 36 | Costo total de materiales y equipos.....    | 159 |
| 37 | Costos de máquinas – herramientas.....      | 159 |
| 38 | Costo de mano de obra.....                  | 159 |
| 39 | Costo de transporte.....                    | 159 |
| 40 | Costos directos.....                        | 160 |
| 41 | Costos de ingeniería.....                   | 160 |
| 42 | Costos por utilidad.....                    | 160 |
| 43 | Costos indirectos.....                      | 160 |
| 44 | Costo total de fabricación.....             | 161 |

## LISTA DE FIGURAS

|   | Pág. |
|---|------|
| 1 Diagrama que muestra la dirección de flujo .....                        | 6    |
| 2 Transferencia de calor a través de una pared plana.....                 | 6    |
| 3 Transferencia de calor por convección.....                              | 7    |
| 4 Convección forzada sobre una placa plana.....                           | 9    |
| 5 Esquema de un banco de tubos en flujo cruzado.....                      | 14   |
| 6 Arreglos de tubos en un banco.....                                      | 15   |
| 7 Condiciones de flujo para tubos alineados y escalonados.....            | 17   |
| 8 Chiller tipo Baudelot.....  | 24   |
| 9 Banco de hielo-chiller Baudelot.....                                    | 30   |
| 10 Paneles PLATECOIL.....   | 32   |
| 11 Paneles ECONOCOIL.....   | 33   |
| 12 Red de resistencias térmicas.....                                      | 35   |
| 13 Variación de las temperaturas de los fluidos en un intercambiador..... | 37   |
| 14 Partes del banco de pruebas.....                                       | 39   |
| 15 Diagrama esquemático del intercambiador de calor tipo Baudelot.....    | 40   |
| 16 Película líquida descendente en una placa vertical plana.....          | 46   |
| 17 Diagrama esquemático de una sola etapa.....                            | 50   |
| 18 Diagrama p- h del R-22.....  | 52   |
| 19 Placa Econocoil- corte en SolidWorks.....                              | 55   |
| 20 Resistencias térmicas en el evaporador.....                            | 59   |
| 21 Distribución de temperaturas.....                                      | 61   |
| 22 Unidad condensadora - Modelo CAE9460TMHR.....                          | 63   |
| 23 Panel Econocoil - Style 50D.....                                       | 64   |
| 24 Láminas de acrílico 2mm.....   | 65   |
| 25 Bomba de pileta, marca SUNTERRA.....                                   | 66   |
| 26 Bomba de pileta, marca FILTER JAD.....                                 | 66   |
| 27 Tuberías de cobre flexible.....  | 67   |
| 28 Válvula de expansión TEX2 - Marca Danfoss.....                         | 68   |
| 29 Válvula solenoide - Marca Danfoss. Tipo EVR2.....                      | 69   |
| 30 Bobina clip-on para solenoide - Marca Danfoss.....                     | 69   |
| 31 Manómetros - Marca Quality - Modelo QM-336.....                        | 70   |
| 32 Termostatos de refrigeración - Marca Quality.....                      | 71   |
| 33 Filtro secador Marca Danfoss - Marca DML032.....                       | 72   |
| 34 Tuberías de cobre flexible para refrigerante.....                      | 72   |

|    |   |     |
|----|---|-----|
| 35 | Relé - Marca Camsco. Tipo MK3P-I.....                           | 73  |
| 36 | PLC - Marca Schneider electric- Zelio logic.....                | 74  |
| 37 | Termómetro digital - Quality. QTR- 47D.....                     | 74  |
| 38 | Indicadores luminosos - Sassin. Tipo AD22-22D-B.....            | 75  |
| 39 | Pulsadores. Marca Sassin. 3SA5-BW3462.....                      | 75  |
| 40 | Evaporador Econocoil.....                                       | 76  |
| 41 | Estructura principal.....                                       | 77  |
| 42 | Tanque de acrílico.....   | 79  |
| 43 | Tanque central o de recirculación.....                          | 79  |
| 44 | Distribuidor o tolva.....                                       | 80  |
| 45 | Tapa del intercambiador de calor.....                           | 81  |
| 46 | Panel de control y botoneras.....                               | 81  |
| 47 | Bastidor – soporte con cubierta de acrílico.....                | 83  |
| 48 | Montaje del distribuidor de acrílico.....                       | 83  |
| 49 | Montaje de bombas en el tanque de recirculación.....            | 84  |
| 50 | Elementos del sistema de refrigeración.....                     | 85  |
| 51 | Hermeticidad de los accesorios.....                             | 86  |
| 52 | Montaje de la unidad condensadora.....                          | 87  |
| 53 | Método adecuado de apriete en la válvula de expansión.....      | 89  |
| 54 | Líneas de aspiración y descarga del compresor.....              | 90  |
| 55 | Conexiones abocardadas.....                                     | 91  |
| 56 | Proceso de vacío.....   | 93  |
| 57 | Módulo lógico programable Zelio.....                            | 98  |
| 58 | Dimensiones del módulo lógico programable Zelio.....            | 99  |
| 59 | Panel frontal del módulo lógico.....                            | 100 |
| 60 | Pantalla LCD del relé.....                                      | 101 |
| 61 | Ventana del software Zelio Soft 2.....                          | 104 |
| 62 | Tipos de relés del software Zelio Soft 2.....                   | 104 |
| 63 | Selección del módulo SR3B261FU en el software Zelio Soft 2..... | 105 |
| 64 | Características del módulo SR3B261FU.....                       | 105 |
| 65 | Tipo de lenguaje de programación.....                           | 106 |
| 66 | Interfaz del usuario.....                                       | 106 |
| 67 | Circuito eléctrico del equipo.....                              | 108 |
| 68 | Esquema del programa.....                                       | 109 |
| 69 | Interfaz de simulación.....                                     | 110 |
| 70 | Simulación.....   | 111 |
| 71 | Agitadores de pecera.....                                       | 112 |

|     |  |     |
|-----|--|-----|
| 72  | Manómetros de alta y de baja del sistema de refrigeración.....                                 | 115 |
| 73  | Termómetros digitales.....   | 115 |
| 74  | Termostato eléctrico.....  | 116 |
| 75  | Temperatura vs. Tiempo.....  | 118 |
| 76  | Foto de la placa-vista posterior (prueba).....   | 120 |
| 77  | Foto de la placa-vista frontal (prueba).....   | 120 |
| 78  | Tablero de control del equipo.....   | 126 |
| 79  | Interruptor que alimenta corriente de 110V al equipo.....                                      | 126 |
| 80  | Pulsador que pone en marcha el equipo.....   | 126 |
| 81  | Foco que muestra que la unidad condensadora está en funcionamiento.....                        | 127 |
| 82  | Controlador lógico programable (PLC), controla todo el funcionamiento del equipo.....          | 127 |
| 83  | Foco que muestra el funcionamiento de la bomba 1, la que pasa el fluido al tanque central..... | 128 |
| 84  | Foco que muestra el funcionamiento de la bomba 2.....  | 128 |
| 85  | Sensor de temperatura seteada al valor requerido por el operario.....                          | 129 |
| 86  | Pulsador de recirculación del fluido enfriado al tanque de almacenamiento.....                 | 129 |
| 87  | Foco que muestra el funcionamiento de la bomba 3, indica la recirculación del fluido..         | 130 |
| 88  | Pulsador que muestra si presenta una falla en el equipo.....                                   | 130 |
| 89  | Presostato de la unidad condensadora.....  | 131 |
| 90  | Intercambiador de calor Baudelot en SolidWorks.....  | 134 |
| 91  | Vista superior del intercambiador de calor Baudelot.....                                       | 134 |
| 92  | Vista frontal de intercambiador de calor Baudelot.....   | 135 |
| 93  | Mantenimiento de bomba eléctrica sumergible.....   | 137 |
| 94  | Mantenimiento de unidad condensadora de ½ HP.....  | 138 |
| 95  | Tubería de cobre utilizada en el equipo.....   | 142 |
| 96  | Soldadura de plata Harris.....   | 142 |
| 97  | Mantenimiento de acoples de bronce para la unión de la tubería.....                            | 143 |
| 98  | Mantenimiento de la placa tipo Baudelot.....   | 144 |
| 99  | Mantenimiento de manómetros de presión.....  | 146 |
| 100 | Mantenimiento del panel de control.....  | 147 |
| 101 | Mantenimiento de presóstato instalado.....   | 149 |
| 102 | Mantenimiento de controlador lógico programable (PLC).....                                     | 150 |
| 103 | Mantenimiento de sensor de temperatura.....  | 151 |
| 104 | Mantenimiento de termómetros digitales.....  | 153 |
| 105 | Mantenimiento de pulsadores con luz.....   | 153 |
| 106 | Mantenimiento de foco piloto.....  | 153 |

## SIMBOLOGÍA

|              |  |                   |
|--------------|--|-------------------|
| $q$          | Flujo de calor   | W                 |
| $k$          | Conductividad térmica del material                             | W/ m°C            |
| $A$          | Área de transferencia de flujo de calor                        | m <sup>2</sup>    |
| $T_1 - T_2$  | Temperatura de las superficies exteriores de la pared          | °C                |
| $e$          | Espesor de la pared  | m                 |
| $h$          | Coefficiente de transferencia de calor por convección          | $\frac{W}{m^2°C}$ |
| $T_\infty$   | Temperatura del fluido circundante                             | °C                |
| $T_s$        | Temperatura de la superficie                                   | °C                |
| $L_c$        | Longitud característica  | m                 |
| $v$          | Velocidad  | $\frac{m}{s}$     |
| $\gamma$     | Viscosidad cinemática de cada fluido                           | $\frac{m^2}{s}$   |
| $\mu$        | Viscosidad dinámica  | $\frac{kg}{ms}$   |
| $\rho$       | Densidad del fluido  | $\frac{kg}{m^3}$  |
| $Re$         | Reynolds   |                   |
| $Pr$         | Prandtl  |                   |
| $Nu$         | Nusselt  |                   |
| $\alpha$     | Difusividad térmica  | $\frac{m^2}{s}$   |
| $C_p$        | Calor específico   | $\frac{J}{kg°C}$  |
| $R_t$        | Resistencia térmica  |                   |
| $T_p$        | Temperatura promedio   | °C                |
| $T_f$        | Temperatura de película  | °C                |
| $U$          | Coefficiente global de transferencia de calor                  | $\frac{W}{m^2°C}$ |
| $\Delta T_m$ | Diferencia promedio apropiada de temperatura entre los fluidos | °C                |
| $T_{a1}$     | Temperatura del agua a la entrada de la placa                  | °C                |
| $T_{a2}$     | Temperatura del agua a la que se desea llegar                  | °C                |

|                   |  |  |
|-------------------|--|--|
| $T_{pa}$          | Temperatura promedio del agua  | $^{\circ}\text{C}$                                   |
| $T_{ref}$         | Temperatura de refrigeración del refrigerante                          | $^{\circ}\text{C}$                                   |
| $\Delta T_e$      | Diferencia de temperatura entre el evaporador y el espacio refrigerado | $^{\circ}\text{C}$                                   |
| $T_{ffrio}$       | Temperatura del espacio refrigerado                                    | $^{\circ}\text{C}$                                   |
| $P_{sat}$         | Presión de saturación del refrigerante                                 | $\text{MPa}$   |
| $\Delta T_{cond}$ | Diferencia de temperatura del condensador                              | $^{\circ}\text{C}$                                   |
| $P_{cond}$        | Presión de condensación del refrigerante                               | $\text{MPa}$   |
| $x$               | Calidad de vapor   |  |
| $q_{UC}$          | Capacidad de retirar calor por la unidad condensadora                  | $\text{W}$   |
| $m_{R-22}$        | Flujo de masa del refrigerante   | $\frac{\text{kg}}{\text{s}}$                         |
| $D_h$             | Diámetro hidráulico  | $\text{m}$   |
| $q''$             | Flujo másico por unidad de área  | $\frac{\text{W}}{\text{m}^2}$                        |
| $P_{pb}$          | Perímetro de la parte baja de la placa                                 | $\text{m}$   |
| $P_{pa}$          | Perímetro de la parte alta de la placa                                 | $\text{m}$   |
| $a$               | Ancho de la placa  | $\text{m}$   |
| $A_t$             | Área de transferencia de calor   | $\text{m}^2$   |
| $\alpha_{tp}$     | Coefficiente de transferencia de calor en el interior de la placa      | $\frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{^{\circ}\text{C}}}$ |
| $K_{ac}$          | Conductividad térmica del acero  | $\frac{\text{W}}{\text{m}^{\circ}\text{C}}$          |
| $h_a$             | Coefficiente convectivo del agua                                       | $\frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{^{\circ}\text{C}}}$ |

## LISTA DE ABREVIACIONES

|         |   |
|---------|---|
| A       | Área  |
| LMTD    | Método de la diferencia de temperaturas medias logarítmicas |
| PLC     | Controlador lógico programable                              |
| AC      | Corriente alterna   |
| FBD     | Programación se basa en bloques de funciones                |
| LADDERS | Programación se basa en un diagrama de contactos            |

## LISTA DE ANEXOS

- A** Ficha técnica R-22
- B** Refrigerante 22 (Chlorodifluorometane). Propiedades de fluido saturado y vapor saturado.
- C** Catálogo del fabricante de la unidad condensadora Tecumseh
- D** Estilos de evaporadores ECONOCOIL
- E** ECONOCOIL estilo EC 50
- F** Dimensiones de evaporadores ECONOCOIL
- G** Láminas de acrílico
- H** Tubería de cobre
- I** Válvula de expansión Danfoss
- J** Válvula solenoide Danfoss
- K** Filtros secador Danfoss
- L** Propiedades del agua

## RESUMEN

Este trabajo tiene como fin presentar un diseño térmico y mecánico ideal para un intercambiador de calor tipo Baudelot que va hacer utilizado para temas de estudio de los alumnos del Laboratorio de Transferencia de Calor de la Escuela de Ingeniería Mecánica.

Este proyecto comenzó con la compra de equipos y materiales a utilizarse, algunos de ellos tuvieron que ser importados ya que no se construye en nuestro medio. Con todos los equipos necesarios se vio el mejor diseño el cual consta de una estructura de metal resistente recubierta de planchas transparentes de acrílico que tiene como fin presentar al alumno la realización de todo el proceso de enfriamiento este mismo proceso que es accionado por un sistema de control eléctrico que tiene como programador un PLC el cual nos ayuda con el funcionamiento de los distintos equipos los cuales consta bombas eléctricas y el equipo condensador.

El proceso de un intercambiador de calor consiste en bombear agua a temperatura ambiente a  $17^{\circ}\text{C}$  a una tolva distribuidora construida en un tanque central y desde allí formar una película homogénea aproximadamente de un 1mm de espesor que debe cubrir la mayor área de la placa térmica vertical de acero inoxidable de (12X23) plg conocido como evaporador en cuyo interior circula el refrigerante R-22 (amigable con la naturaleza) a una temperatura de  $-1^{\circ}\text{C}$ . El mismo que absorbe el calor del agua en un lapso de tiempo, este refrigerante es enfriado por un condensador refrigerado por aire además consta de una válvula de expansión y un compresor para así cerrar nuestro circuito térmico y volver a nuestras condiciones iniciales.

Finalmente las pruebas que se realizaron en el banco de pruebas intercambiador de calor tipo BAUDELOT permitieron enfriar agua a  $5^{\circ}\text{C}$  en un tiempo aproximado de 12 minutos. Un equipo que funciona en óptimas condiciones y contribuye a obtener resultados con los cálculos técnicos como experimentales que se requieren en las prácticas de laboratorio de Transferencia de Calor de la Facultad; por lo que se recomienda su correcta operación.

## **ABSTRACT**

This work aims to present an ideal thermal and mechanical design for a heat exchanger type Baudelot that will be used for study topics of students of lab heat transfer of the mechanical engineering school.

This project began with the purchase of equipment and materials to be used, some of them had to be imported because they can't be built in our locality. With all equipment required it was found the best design that consists of a hard metal structure covered with transparent acrylic plates that takes as a purpose to present to the student the implementation of the whole process of cooling this same process that is operated by an electrical control system that has a PLC as a programmer which helps with the functioning of the different equipment that consist of electric pumps and the condenser equipment.

The process of a heat exchanger involves pumping water at room temperature to 17 °C to a distributor hopper built in a central tank and from there form a homogeneous film about 1mm of thickness which must cover the biggest area of the vertical thermal plate of stainless steel (12x23) plg know as evaporator inside which circulates the refrigerant R22 (friendly with nature) at a temperature of -1 °C. The same that absorbs the heat from the water in a period of time, this refrigerant is cooled by an air cooled condenser that also consists of an expansion valve and a compressor to close the thermal circuit and return to the initial conditions.

Finally the tests that were carried out in the test bank heat interchanger type BAUDELOT allowed to cool water to 5 °C in an approximate time of 12 minutes. Equipment that works in optimum conditions and helps to get results with the technical as experimental calculations required in the laboratory practices of Heat Transfer of the Faculty by what its correct operation is recommended.

# CAPÍTULO I

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1 Antecedentes

La tecnología de los intercambiadores de calor ha sufrido nuevas transformaciones de calidad y velocidad de producción al inicio de la revolución industrial (1790), con el fin de satisfacer nuevos requerimientos compatibles con un mejor uso de la energía y una reducción de la contaminación ambiental. En este aspecto, la introducción de nuevas tecnologías y el uso de diferentes métodos de enfriamiento o calentamiento han significado la creación de intercambiadores de calor más eficientes.

La aplicación del principio de la transferencia de calor no tiene límites. El uso más común son los llamados enfriadores de agua que consisten en el intercambio de calor de un fluido a otro, aprovechando la variación de temperaturas entre ellos.

Un enfriador de agua es un aparato industrial que produce agua fría para el enfriamiento de procesos industriales. La idea consiste en extraer el calor generado en un proceso por contacto con agua a una temperatura menor a la que el proceso finalmente debe quedar. Así; el proceso cede calor bajando su temperatura y el agua durante el paso por el proceso, la eleva. El agua ahora "caliente" retorna al enfriador donde nuevamente se reduce su temperatura para ser enviada nuevamente al proceso.

Esta tesis de grado Diseño, Construcción y Pruebas de un intercambiador de calor tipo Baudelot está destinada para el laboratorio de Transferencia de Calor de la Escuela de Ingeniería Mecánica para ser aprovechada con fines didácticos en cuanto a transferencia de calor se refiere.

## **1.2 Justificación**

Las industrias enfrentan cada vez mayores exigencias de ahorro de energía, conservación de recursos valiosos y mejoramiento en la productividad y desempeño ambiental. En tiempos en que la competencia puede encontrarse al otro lado del mundo; estas industrias se están inclinando hacia tecnologías de procesamiento avanzado y automatización para estar a la vanguardia y permanencia de ellos.

El enfriamiento es una de las operaciones más relevantes en la industria y conlleva una alta utilización de recursos energéticos. Por este motivo esta operación es de continuo interés en esta investigación, tanto en el empleo de métodos de enfriamiento con una mayor eficacia, como en sistemas que supongan una reducción en el consumo energético.

Como futuros profesionales de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Facultad de Mecánica de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo con conocimientos sobre la importancia de los diversos procesos industriales y manuales, hemos visto la necesidad de realizar el presente estudio de investigación buscando la manera de adquirir el conocimiento de los métodos de enfriamiento empleados más eficientemente, así como la aplicación de dichos conceptos para la realización de diseños básicos de intercambiadores de calor empleando una adecuada forma de enfriamiento.

## **1.3 Objetivos**

**1.3.1** *Objetivo general.* Diseñar y construir un banco de pruebas de un intercambiador de calor tipo Baudelot para el laboratorio.

**1.3.2** *Objetivos específicos:*

Analizar el marco teórico del intercambiador de calor tipo Baudelot.

Diseñar el banco de pruebas para enfriamiento de un fluido.

Instalar los componentes del banco de pruebas.

Realizar pruebas de laboratorio.

## **CAPÍTULO II**

### **2. FUNDAMENTO TEÓRICO**

La carrera de Ingeniería Mecánica abarca un campo muy amplio de estudio y análisis; los cuales son una rama de la ingeniería en donde se aplica los principios fundamentales de la Física, Termodinámica, Ciencia de Materiales, Mecánica de Fluidos, Análisis Estructural para el diseño y análisis de diversos elementos mecánicos utilizados en diferentes trabajos y en diferentes campos con ciertas especificaciones planteadas por el lugar y condiciones de trabajo. En este caso nos centraremos en el estudio de la transferencia de calor, la que gobierna todos los procesos térmicos junto con la construcción y ensamblaje de elementos termodinámicos tanto como mecánicos como electrónicos para la construcción de un intercambiador de calor tipo Baudelot diseñado como un banco de pruebas. (Wikipedia, 2013)

#### **2.1 Transferencia de calor**

La transferencia de calor se define como el proceso por el cual se intercambia energía térmica entre cuerpos, los cuales pueden encontrarse en cualquier estado (sólido, líquido o gaseoso); los mismos que se encuentran a distintas temperaturas; fluyendo el calor siempre a la zona más fría.

La rapidez que tiene el intercambio de energía térmica entre cuerpos es directamente proporcional de la diferencia de temperaturas de los mismos.

La transferencia de calor es una ciencia que trata de predecir el cambio de energía térmica que se provoca entre cuerpos si no también la rapidez y la eficiencia en que eso ocurre bajo condiciones específicas controladas complementando el primer y segundo principio de la termodinámica.

El intercambio de calor se puede realizar por tres modos distintos los cuales son: conducción, convección y radiación o una combinación entre ellos, los mismos que se

pueden realizar simultáneamente con la misma importancia o uno de estos predominar en dicho intercambio. (HOLMAN, 1998 pág. 1)

**2.1.1 Calor sensible.** Calor sensible es aquel que recibe un cuerpo o un objeto y hace que aumente su temperatura sin afectar su estructura molecular y por lo tanto su estado. En general, se ha observado experimentalmente que la cantidad de calor necesaria para calentar o enfriar un cuerpo es directamente proporcional a la masa del cuerpo y a la diferencia de temperaturas. La constante de proporcionalidad recibe el nombre de calor específico.

Para aumentar la temperatura de un cuerpo hace falta aplicarle una cierta cantidad de calor (energía). La cantidad de calor aplicada en relación con la diferencia de temperatura que se logre depende del calor específico del cuerpo, que es distinto para cada sustancia.

Si el proceso se efectúa a presión constante:

$$q = \dot{m} * C_p * (T_2 - T_1) \quad (1)$$

Dónde:

$\dot{m}$  es la masa del cuerpo,  $C_p$  es el calor específico a presión constante (definido como la cantidad de calor requerida para aumentar en un grado la temperatura de la unidad de masa de un cuerpo a presión constante),  $T_2$  es la temperatura final y  $T_1$  es la temperatura inicial del cuerpo.

**2.1.1.1 Transferencia de calor por conducción.** La conducción es un mecanismo de transferencia de calor que se basa en el contacto directo entre las partículas y la diferencia de temperatura que se encuentran entre ellas en ese instante donde las partículas cargadas más energéticamente entregan energía a las menos energéticas produciéndose el flujo de calor. El mismo que depende exclusivamente de la diferencia de las temperaturas y la conductividad térmica de los materiales que están en contacto.

Las líneas de flujo de calor de la conducción se realizan perpendicularmente a la geometría de la superficie de transferencia de calor. (Wikipedia, 2013)

*Ley de Fourier.* Se dice que la energía que es transferido por conducción y que el flujo del calor por unidad de área es proporcional al gradiente normal de temperatura.

Cuando se introduce la constante de proporcionalidad.

$$q = -kA \frac{\partial T}{\partial x} \quad (2)$$

Dónde:

$q$  = Flujo de calor [W]

$A$  = Área de transferencia de flujo de calor [ $m^2$ ]

$\frac{\partial T}{\partial x}$  = Gradiente de temperatura

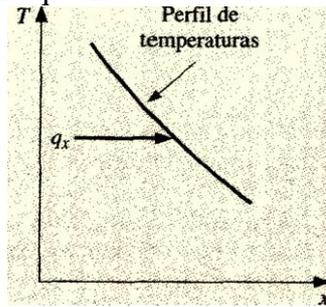
$k$  = Conductividad térmica del material [ $\frac{W}{m^{\circ}C}$ ]

El signo menos se apuesto para satisfacer el segundo principio de la termodinámica. (HOLMAN, 1998 pág. 1)

**2.1.1.2** *Segundo principio de la termodinámica.* Es una de las leyes más importantes de la física y manifiesta que si bien la materia y la energía no se puede crear ni destruir; pero si se puede transformar y establecer el sentido de dicha transformación en este caso se refiere a los estados de equilibrio térmico, según el cual el calor debe fluir hacia la zona de temperatura más baja como se expresa en la Figura1. (Wikipedia, 2013)

El gradiente de temperatura es negativo si la temperatura disminuye para los valores crecientes de  $x$ . (HOLMAN, 1998 pág. 1)

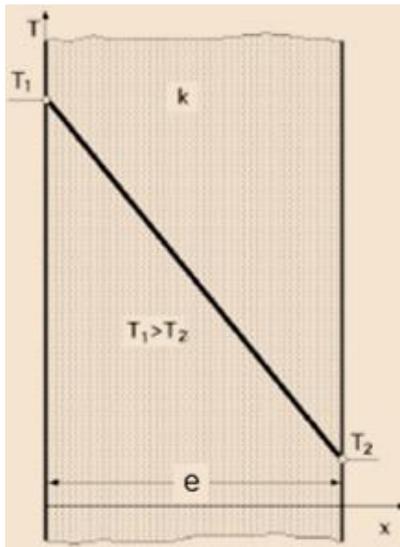
Figura 1. Diagrama que muestra la dirección de flujo de calor



Fuente: HOLMAN J.P. Transferencia de Calor. Pág. 2

**2.1.1.3 Placa plana.** La aplicación de la ley de Fourier corresponde al caso de la transmisión del calor a través de una pared plana Figura 2. Cuando las superficies de la pared se encuentran a temperaturas diferentes, el calor fluye sólo en dirección perpendicular a las superficies.

Figura 2. Transferencia de calor a través de una pared plana



Fuente: INCROPERA F.P. Fundamentos de Transferencia de Calor. Pág. 75

Si la conductividad térmica es uniforme, la integración de (1) proporciona:

$$q = -kA \frac{T_2 - T_1}{e} = kA \frac{T_1 - T_2}{e} \quad (3)$$

Siendo:

$q$  = Flujo de calor [W]

$k$  = Conductividad térmica del material  $[\frac{W}{m^{\circ}C}]$

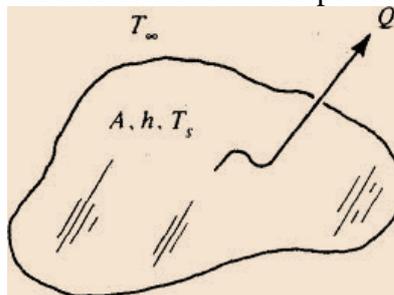
$A$  = Área transversal al flujo de calor  $[m^2]$

$T_1 - T_2$  = Temperatura de las superficies exteriores de la pared  $[^{\circ}C]$

$e$  = Espesor de la pared  $[m]$

**2.1.2** *Transferencia de calor por convección.* La convección es una transferencia de calor. Se caracteriza por que se produce por medio de un fluido ya sea este líquido o gas, que transporta energía térmica entre las zonas de diferentes temperaturas; es decir el transporte de calor por el movimiento de un fluido como se muestra en el esquema de la Figura 3. (Wikipedia, 2013)

Figura 3. Transferencia de calor por convección



Fuente: [www.google.com /imágenes/convección de calor](http://www.google.com/imágenes/convección%20de%20calor)

La ley de enfriamiento de Newton establece que la tasa de transferencia de calor que abandona una superficie a una temperatura  $T_s$  para pasar a un fluido del entorno a temperatura  $T_{\infty}$  se da por la ecuación. (SolidWorks, 1995)

$$q = hA(T_s - T_{\infty}) \quad (4)$$

Dónde:

$q$  = Flujo de calor  $[W]$

$h$  = Coeficiente de transferencia de calor por convección  $[\frac{W}{m^2^{\circ}C}]$

$A$  = Área en contacto con el fluido [ $m^2$ ]

$T_s$  = Temperatura de la superficie [ $^{\circ}C$ ]

$T_{\infty}$  = Temperatura del fluido circulante [ $^{\circ}C$ ]

La convección se puede clasificar de acuerdo a sus procesos los cuales podemos citar los siguientes:

***Según origen del movimiento***

- Convección forzada
- Convección libre

***Según el régimen de flujo***

- Laminar
- Turbulento

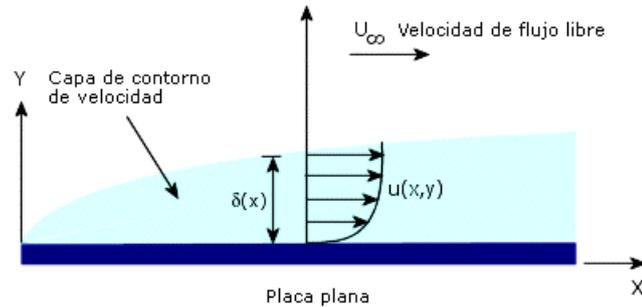
***Según la naturaleza del proceso***

- Con cambio de fase
- Sin cambio de fase

**2.1.2.1** *Coefficiente de transferencia de calor por convección.* El coeficiente de transferencia de calor  $h$  no es una propiedad termodinámica, es una correlación simplificada entre el estado del fluido y las condiciones de flujo, por lo cual generalmente se la conoce como una propiedad de flujo.

La convección está ligada al concepto de una capa de contorno, que es una delgada capa de transición entre una superficie, que se supone adyacente a las moléculas estacionarias, y el flujo del fluido en el entorno. Esto se puede observar en la Figura 4 que muestra un flujo sobre la placa plana.

Figura 4. Convección forzada sobre una placa plana



Fuente: [http://help.solidworks.com/Convection\\_Heat\\_Coefficient.htm](http://help.solidworks.com/Convection_Heat_Coefficient.htm)

El coeficiente de convección depende de múltiples parámetros relacionados con el flujo del fluido, a través del cual se da la convección: (Wikipedia, 2013)

- Del tipo de convección (forzada o natural).
- Del régimen del fluido (laminar o turbulento).
- De la velocidad del flujo.
- De la viscosidad del fluido.
- De la densidad del fluido.
- De la conductividad térmica del fluido.
- Del calor específico del fluido.
- Del coeficiente de dilatación del fluido.
- De la forma de la superficie de intercambio.
- De la rugosidad de la superficie de intercambio.
- De su temperatura.
- De si el derrame es interior o exterior.

**2.1.2.2 Correlaciones de la convección.** La mayoría de los problemas de transferencia de calor que se presentan por convección de interés práctico y de suma importancia, debido a la complejidad matemática de sus ecuaciones, se estudia experimentalmente y los resultados se presentan en forma de ecuaciones empíricas que se expresan en función de los grupos adimensionales.

- *Número de Nusselt.* Su nombre se llama así en honor al Wilhelm Nusselt, ingeniero alemán el 25 de noviembre de 1882 en Núremberg. Durante su periodo de enseñanza desarrolló el análisis dimensional de la transferencia de calor sin conocimiento del Teorema de Pi-Buckingham o el trabajo en fluidos de Lord Rayleigh. Al hacerlo abrió el camino de la formulación moderna de los fenómenos convectivos. (Wikipedia, 2013)

El número de Nusselt es un número dimensional que mide el aumento de la transmisión de calor desde una superficie por la que el fluido discurre (transferencia de calor por convección) comparada con la transferencia de calor si ésta ocurriera solamente por conducción y se expresa mediante la siguiente expresión: (Wikipedia, 2013)

$$Nu = \frac{hL_c}{k} \quad (5)$$

Siendo:

$h$  = Coeficiente de transferencia de calor por convección  $\left[ \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right]$

$L_c$  = Longitud característica [m]

$k$  = Conductividad térmica del fluido  $\left[ \frac{W}{m \cdot ^\circ C} \right]$

Aunque la ecuación 5 se emplea generalmente para determinar la rapidez del flujo de calor por convección entre una superficie y el fluido en contacto con ella. Ésta es más bien la definición del coeficiente de calor por convección. Más adelante se analizan y detallaran las expresiones que permitirán determinar tanto el coeficiente  $h$  para flujo interno como para el flujo externo.

- *Reynolds*. Es la relación de los términos entre las fuerzas inerciales y las fuerzas viscosas que actúan sobre un elemento de volumen de un fluido. Es un indicativo del tipo de flujo del fluido, laminar o turbulento.

$$Re = \frac{v L_c}{\gamma} = \frac{\rho v L_c}{\mu} \quad (6)$$

Siendo:

$v$  = Velocidad definir en cada caso  $[\frac{m}{s}]$

$\gamma$  = Viscosidad cinemática de cada fluido  $[\frac{m^2}{s}]$

$\mu$  = Viscosidad dinámica  $[\frac{kg}{ms}]$

$\rho$  = Densidad del fluido  $[\frac{kg}{m^3}]$

$L_c$  = Longitud característica[m]

Además el número de Reynolds permite predecir el tipo de régimen, sea turbulento o laminar en conductos o tuberías (En otros sistemas el límite de Reynolds varía).

$$Re \leq 2100$$

El flujo se mantiene estacionario y se comporta como si estuviera formado por láminas delgadas. Por eso a este flujo se le llama flujo laminar.

$$2100 \leq Re \leq 10000$$

El flujo pierde estabilidad formando pequeñas ondulaciones variables con el tiempo, manteniéndose sin embargo delgada. Este régimen se denomina de transición.

$$Re \geq 10000$$

Después de un pequeño tramo inicial con oscilaciones variables. Este régimen es llamado turbulento, es decir caracterizado por un movimiento desordenado, no estacionario y tridimensional.

- *Número de Prandtl.* Se llama así en honor a Ludwig Prandtl realizó importantes trabajos pioneros en el campo de la aerodinámica y durante la década de 1920 desarrolló la base matemática que da sustento a los principios fundamentales de la aerodinámica subsónica. En sus estudios identificó la capa límite, y elaboró la teoría de la línea sustentadora para alas esbeltas.

El número de Prandtl es un número dimensional proporcional al cociente entre la difusividad de momento (viscosidad) y la difusividad térmica. (Wikipedia, 2013)

$$Pr = \frac{\gamma}{\alpha} = \frac{c_p \mu}{k} \quad (7)$$

Siendo:

$$\gamma = \text{Viscosidad cinemática} \left[ \frac{m^2}{s} \right]$$

$$\alpha = \text{Difusividad térmica} \left[ \frac{m^2}{s} \right]$$

$$c_p = \text{Calor específico} \left[ \frac{J}{kg^\circ C} \right]$$

$$\mu = \text{Viscosidad dinámica} \left[ \frac{kg}{m s} \right]$$

- *Resistencia térmica.* Existe una analogía entre la difusión de calor y la carga eléctrica. La resistencia térmica de un material representa la capacidad del material de oponerse al flujo del calor.

La resistencia térmica por conducción se expresa de la siguiente manera:

$$R_{t,cond} = \frac{T_{s,1} - T_{s,2}}{q_x} = \frac{e}{kA} \quad (8)$$

Dónde:

$$k = \text{Conductividad térmica del material} \left[ \frac{W}{m^\circ C} \right]$$

$$e = \text{Espesor del material} [m]$$

Además, se asocia a la transferencia de calor con la convección a una superficie determinada. La resistencia térmica por convección se expresa como:

$$R_{t,conv} = \frac{T_s - T_\infty}{q} = \frac{1}{h A} \quad (9)$$

Dónde:

$h$  = Coeficiente de transferencia de calor por convección  $\left[ \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right]$

Cuando existe una variación apreciable entre las condiciones de la pared y de la corriente libre, se recomienda evaluar las propiedades a la llamada temperatura de película ( $T_f$ ), definida como la media aritmética entre la pared y la temperatura de la corriente libre. (HOLMAN, 1998 pág. 164)

Sabemos que las propiedades del fluido varían con la temperatura a través de la capa límite y esta variación ciertamente influirá en la transferencia de calor.

$$T_p = \frac{T_1 + T_2}{2} \quad (10)$$

$$T_f = \frac{T_s + T_p}{2} \quad (11)$$

$T_1$  = Temperatura del fluido a la entrada  $^\circ C$

$T_2$  = Temperatura del fluido a la salida  $^\circ C$

$T_s$  = Temperatura de la superficie  $^\circ C$

$T_p$  = Temperatura promedio del fluido  $^\circ C$

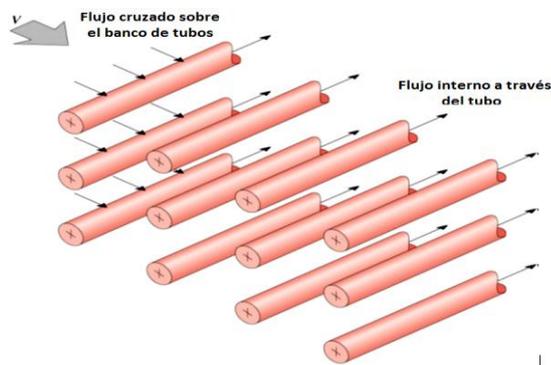
$T_f$  = Temperatura de película  $^\circ C$

**2.1.3 Relaciones empíricas para la transferencia de calor.** En este trabajo no se obtiene soluciones analíticas, tampoco existe información para encontrar el coeficiente  $h$ , por lo que se recurre a métodos experimentales cuyos resultados se expresan en forma de ecuaciones y gráficas.

**2.1.3.1 Flujo a través de un banco de tubos.** La transferencia de calor en este tipo de arreglo es muy utilizada en la industria, de hecho es uno de los tantos tipos de intercambiadores de calor que existe en el mundo.

Un fluido fluye dentro de los tubos, mientras un segundo fluido circula por el exterior a diferente temperatura. La transferencia de calor desde o hacia un banco de tubos en flujo cruzado es relevante para numerosas aplicaciones industriales, como la generación de vapor en una caldera o el enfriamiento en el serpentín de un acondicionador de aire. El arreglo geométrico se muestra de forma esquemática en la Figura 5. Normalmente un fluido se mueve sobre los tubos. Se enfocará de forma específica en la transferencia de calor por convección asociada con el flujo cruzado sobre los tubos.

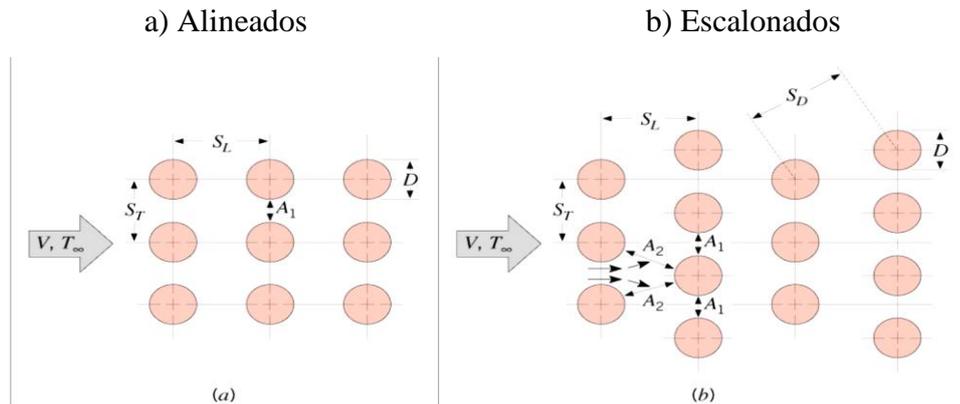
Figura 5. Esquema de un banco de tubos en flujo cruzado



Fuente: INCROPERA F.P. Fundamentos de Transferencia de Calor. Pág. 377

Las filas de los tubos de un banco pueden tener una configuración: escalonada o lineal, en la dirección de la velocidad del fluido Figura 6. La configuración se caracteriza por el diámetro exterior del tubo  $D$ ,  $ST$  y  $SL$  medidas entre los centros de los tubos. Las condiciones del flujo dentro del banco están dominadas por los efectos de separación de la capa límite y por las interacciones de estelas, que a su vez influyen en la transferencia de calor por convección.

Figura 6. Arreglos de tubos en un banco



Fuente: INCROPERA F.P. Fundamentos de Transferencia de Calor. Pág. 378

Dónde:

$SL$  = Distancia entre dos hileras consecutivas

$ST$  = Distancia transversal

$SD$  = Distancia diagonal

$NL$  = Número de tubos en dirección longitudinal

El coeficiente de calor asociado con un tubo está determinado por la posición en el banco. El coeficiente para un tubo en la primera línea es aproximadamente igual al de un solo tubo en flujo cruzado, mientras que los coeficientes de transferencia de calor más grandes están asociados con tubos en las líneas internas. Los tubos de las primeras líneas actúan como una rejilla de turbulencia que aumenta el coeficiente de transferencia de calor para los tubos de las líneas siguientes. Sin embargo, la mayoría de las configuraciones las condiciones de transferencia de calor se estabilizan, de modo que ocurren pocos cambios en el coeficiente de convección para un tubo más allá de la cuarta o quinta línea. (INCROPERA, 1999 pág. 377)

El número de Reynolds para las correlaciones anteriores se basa en la velocidad máxima del fluido que ocurre dentro del banco de tubos.

Se han obtenido resultados más recientes y Zhukauskas propuso una correlación de la forma:

$$Nu = C Re^{m_{D,max}} Pr^{0,36} \left(\frac{Pr}{Pr_s}\right)^{1/4} \quad (12)$$

$$\left[ \begin{array}{l} N_L \geq 20 \\ 1000 < Re < 2 \times 10^6 \\ 0,7 < Pr < 500 \end{array} \right]$$

Donde todas las propiedades excepto  $Pr_s$  ; se evalúan a temperatura fílmica y las constantes C y m se presentan en una lista en la Tabla 1. Si  $N_L < 20$ , se aplica un factor de corrección, tal que:

$$Nu_{N_L < 20} = C_2 Nu_{N_L \geq 20} \quad (13)$$

Donde C2 está dado en la Tabla 2.

Tabla 1. Constantes C y m para el banco de tubos en flujo cruzado

| Configuración       | $Re_{D, \text{máx}}$            | C  | m    |
|---------------------|---------------------------------|--|------|
| Alineado            | $10 - 10^2$                     | 0.80   | 0.40 |
| Escalonado          | $10 - 10^2$                     | 0.90   | 0.40 |
| Alineado            | $10^2 - 10^3$                   | Se aproxima como un cilindro único (aislado) |      |
| Escalonado          | $10^2 - 10^3$                   |  |      |
| Alineado            | $10^3 - 2 \times 10^5$          | 0.27   | 0.63 |
| $(S_T/S_L > 0.7)^a$ |                                 |  |      |
| Escalonado          | $10^3 - 2 \times 10^5$          | $0.35(S_T/S_L)^{1/5}$                        | 0.60 |
| $(S_T/S_L < 2)$     |                                 |  |      |
| Escalonado          | $10^3 - 2 \times 10^5$          | 0.40   | 0.60 |
| $(S_T/S_L > 2)$     |                                 |  |      |
| Alineado            | $2 \times 10^5 - 2 \times 10^6$ | 0.021  | 0.84 |
| Escalonado          | $2 \times 10^5 - 2 \times 10^6$ | 0.022  | 0.84 |

<sup>a</sup>Para  $S_T/S_L < 0.7$ , la transferencia de calor es ineficiente y los tubos alineados no se deben usar.

Fuente: INCROPERA F.P. Fundamentos de Transferencia de Calor. Pág. 380

Tabla 2. Factor de corrección C2 para  $N_L < 20$  ( $Re > 10^3$ )

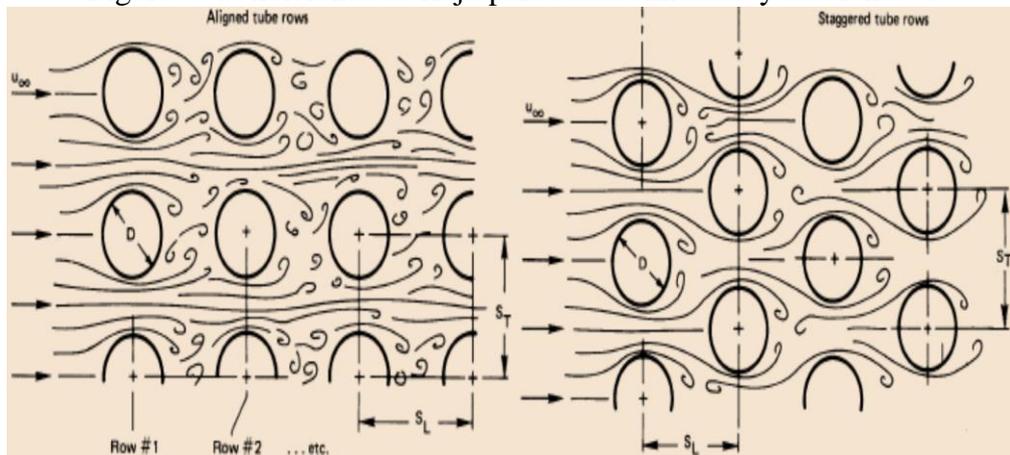
| NL         | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 7    | 10   | 13   | 16   |
|------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Alineado   | 0,7  | 0,8  | 0,86 | 0,9  | 0,92 | 0,95 | 0,97 | 0,98 | 0,99 |
| Triangular | 0,64 | 0,76 | 0,84 | 0,89 | 0,92 | 0,95 | 0,97 | 0,98 | 0,99 |

Fuente: INCROPERA F.P. Fundamentos de Transferencia de Calor. Pág. 380

El flujo alrededor de los tubos en la primera línea de un banco corresponde a la de un cilindro único (aislado) en flujo cruzado. Sin embargo para las líneas siguientes el flujo depende en gran parte del arreglo del banco de tubos Figura 7.

Los tubos alineados más allá de la primera línea están en las estelas turbulentas de los tubos de contra corriente, y para valores moderados de  $S_L$  los coeficientes de convección asociados con las líneas corrientes abajo aumentan por la turbulencia del flujo. (INCROPERA, 1999 pág. 381)

Figura 7. Condiciones de flujo para tubos alineados y escalonados



Fuente: INCROPERA F.P. Fundamentos de Transferencia de Calor. Pág. 381

La expresión del número de Nusselt es la que se muestra en la Ecuación 12. El número de Reynolds se basa en la velocidad máxima del fluido que ocurre dentro del banco de tubos.

La velocidad máxima  $v_{max}$  para un banco de tubos con arreglo en línea es:

$$v_{max} = \frac{v_{\infty} S_T}{S_T - D} \quad (14)$$

La velocidad máxima para un banco de tubos con arreglo alternado es la de mayor valor de las siguientes velocidades: (VALENZUELA, 2003 pág. 61)

$$v_1 = \frac{v_{\infty} S_T}{S_T - D} \quad (15)$$

$$v_2 = \frac{v_{\infty} S_T / 2}{\sqrt{\frac{S_T^2}{2} + S_L^2 - D}} \quad (16)$$

Dónde:

$v_{\infty}$  = Velocidad característica del fluido [m/s]

$D$  = Diámetro exterior de los tubos [m]

$S_T$  = Distancia transversal [m]

$S_L$  = Distancia entre dos hileras consecutivas [m]

Una vez que se conoce el número de Nusselt y por lo tanto el coeficiente de transferencia de calor de la parte líquida se procede al cálculo del coeficiente de transferencia de calor para flujo bifásico en evaporación para convección forzada.

**2.1.3.2 Convección natural.** En convección natural el flujo resulta solamente de la diferencia de temperaturas del fluido en la presencia de una fuerza gravitacional.

La densidad de un fluido disminuye con el incremento de temperatura. (Albert1891, 2012 pág. 1)

**2.1.3.3 Convección forzada.** El movimiento del fluido es generado por fuerzas impulsoras externas. Por ejemplo: aplicación de gradientes de presión con una bomba, un soplador, etc. (Universidad Nacional de la Plata, 2011 pág. 1)

**2.1.3.4 Correlaciones empíricas para flujos externos de convección forzada.** Las correlaciones generales aceptadas para el caso de un fluido circulando sobre una placa plana con flujo paralelo son las siguientes:

Temperatura superficial uniforme

a) Para flujo laminar. El número de Nusselt local en un flujo laminar sobre una placa plana se verifica para valores de:

$$0,6 \leq Pr \leq 50$$

$$Re_x < 5 \times 10^5$$

Y viene dado por la ecuación de Pohlhausen.

El número de Nusselt local:

$$Nu_x = \frac{x \cdot h_x}{k} = 0,332 Re_x^{1/2} Pr^{1/3} \quad (17)$$

El Número de Nusselt promedio para toda la longitud de la placa, si se mantiene el régimen laminar en toda ella es la siguiente:

$$Nu_L = \frac{l \cdot h_L}{k} = 0,664 Re_x^{1/2} Pr^{1/3} \quad (18)$$

Se usa la ecuación (18) con todas las propiedades evaluadas a una temperatura media de la capa límite  $T_f$ , que se denomina temperatura de película. (INCROPERA, 1999 pág. 354)

### 2.1.3.5 Coeficiente de transferencia de calor para flujo bifásico interno en evaporación

– *Ebullición forzada.* El proceso de transmisión de calor en ebullición forzada es un fenómeno complejo, en el que intervienen una serie de patrones de flujo, que caracterizan la transferencia de calor. Dado que los patrones de flujo se ven influenciados por la geometría de la superficie donde se produce la ebullición, se ha creado una simplificación que permite obtener resultados aceptables, y con continuas evoluciones se ha estado utilizando a lo largo de los últimos 40 años.

Esta simplificación consiste en considerar dos términos de ebullición, la ebullición nucleada y ebullición convectiva. A lo largo de los años se han propuesto diferentes formas de establecer la transición de uno a otro fenómeno, y éstos se pueden agrupar correlaciones de superposición (Chen (1963)), correlaciones de efectos separados (Shah (1982)) y correlaciones de tipo asintótico (Steiner y Taborek (1992)). Fuera de esta clasificación, se encontraría el modelo de Kandlikar (1990), que separa zonas de dominancia de los fenómenos, y en cada una de estas zonas considera la influencia de los efectos convectivos y de nucleación. (TABÓAS pág. 8)

En la propuesta de este modelo, el autor partió de 5000 datos experimentales de coeficientes de ebullición forzada de distintos autores, fundamentalmente refrigerantes. Entre los fluidos se encuentran agua, R-11, R-12, R-13B, R-22, R113, R-114, R152A, nitrógeno. La correlación de Kandlikar ha demostrado que obtiene muy buenos resultados en las predicciones de los coeficientes. (TABÓAS págs. 14-15)

Correlaciones generales para evaporadores y condensadores deben ser similares a aquellos para conductos circulares y no circulares, con específicas constantes o variables que definen la geometría.

Kandlikar desarrolla dos correlaciones una para la zona de ebullición nucleada  $\alpha_{nb}$  y la otra para zona de ebullición convectiva  $\alpha_{cb}$ , tomando como coeficiente de transferencia de calor, el máximo entre ambas, haciéndolo de manera iterativa hasta llegar a una precisión deseada, ya que el número de ebullición  $Bo$  está en función de  $\alpha$ .

$$\alpha_{nb} = 0.6683 C_o^{-0.2} (1 - x_g)^{0.8} \alpha_{lo} (25 Fr_{lo})^{C_5} + 1058 B_o^{0.7} (1 - x_g)^{0.8} F_{fl} \alpha_{lo} \quad (19)$$

$$\alpha_{cb} = 1.136 C_o^{-0.9} (1 - x_g)^{0.8} \alpha_{lo} (25 Fr_{lo})^{C_5} + 667.2 B_o^{0.7} (1 - x_g)^{0.8} F_{fl} \alpha_{lo} \quad (20)$$

Kandlikar modela su ecuación estableciendo dos regiones perfectamente diferenciadas, la región convectiva y la de nucleación, mismas que son caracterizadas por los números de convección  $Co$  y de ebullición  $Bo$  respectivamente. Para valores de  $Co > 0.65$  nos encontraremos en la región de evaporación convectiva mientras que para valores de  $Co < 0.65$  estaremos en la región de evaporación nucleada. Y el coeficiente de transferencia de calor  $\alpha_{lo}$  se lo calcula a partir de la correlación de Dittus - Boelter para el Nusselt ( $N_u = 0.023 Re_l^{0.8} Pr_l^{0.4}$ ) considerando para el cálculo del  $Re$  como si todo el flujo fuera líquido.  $C_5$  Es igual a cero si es un tubo vertical o si el tubo es horizontal con  $Fr_l > 0.04$ . En caso contrario su valor es 0.3 y  $F_{fl}$  es el parámetro de Kandlikar; que es un parámetro de asociación superficie líquido. (KANDLIKAR, 1990)

Tabla 3. Parámetro de Kandlikar

| Fluido | $F_{fl}$ |
|--------|----------|
| Agua   | 1.0      |
| R11    | 1.3      |
| R12    | 1.5      |
| R13B1  | 1.31     |
| R22    | 2.2      |
| R113   | 1.3      |
| R114   | 1.24     |
| R13a   | 1.63     |
| R15a   | 1.1      |

Fuente: KANDLIKAR, Satish G. Transactions of the ASME, Journal of Heat Transfer. Pág. 219- 228.

Si el tubo es acero inoxidable el  $F_{fl}$  es igual a 1 para todos los fluidos.

Dónde:

$$m_{R-22} = \frac{q_{UC}}{(h_1 - h_4)} \quad (21)$$

$$q_A = \frac{m\dot{R}-22}{A} \quad (22)$$

$$Bo = \frac{q_{UC}}{G * h_{fg}} \quad (23)$$

$$Co = \left[ \frac{1-x}{x} \right]^{0,8} \left( \frac{\rho_{rv}}{\rho_{rl}} \right)^{0,5} \quad (24)$$

$$Fr_l = \frac{\left( \frac{G}{\rho_l} \right)^2}{gD} \quad (25)$$

$$G = \rho * v \quad (26)$$

$$Pr_l = \frac{\mu_l * Cp_l}{k_l} \quad (27)$$

$$Re_l = \frac{\rho_l * v_{max} * Dh}{\mu_l} \quad (28)$$

$$A_c = \frac{\pi d^2}{4} \quad (29)$$

Dónde:

$q_A$  = Flujo de calor por unidad de área  $\left[ \frac{W}{m^2} \right]$

$A_c$  = Área circunferencial  $[m^2]$

$\alpha$  = Coeficiente de transferencia de calor  $\left[ \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right]$

$q_{UC}$  = Calor capaz de retirar la unidad condensadora

$\rho$  = Densidad  $\left[ \frac{kg}{m^3} \right]$

$\mu$  = Viscosidad dinámica  $[Pa * s]$

$Bo$  = Número de ebullición (*boiling*)

$Co$  = Número convectivo

$Cp$  = Calor específico a presión constante  $\left[ \frac{J}{kg \cdot ^\circ C} \right]$

$D$  = Diámetro  $[m]$

$$Fr_l = \text{Número de Froude para el líquido } Fr_l = \frac{\left(\frac{G}{\rho_l}\right)^2}{gD}$$

$$g = \text{Aceleración de la gravedad } \left[\frac{m}{s^2}\right]$$

$$G = \text{Flujo por unidad de área } \left[\frac{kg}{m^2 * s}\right]$$

$$h_{fg} = \text{Calor latente de cambio de fase } \left[\frac{J}{kg}\right]$$

$$Pr_l = \text{Número de Prandtl}$$

$$Re_r = \text{Número de Reynolds}$$

$$v = \text{Velocidad } \left[\frac{m}{s}\right]$$

$$x_g = \text{Fracción másica de vapor ( calidad del refrigerante)}$$

Subíndices

$g$  = gas

$l$  = líquido

(Yan and Lin (1999) investigaron el proceso de ebullición en un intercambiador de placas donde apreciaron que los coeficientes de ebullición dependían fundamentalmente del título de vapor, y el flujo de calor sólo afectaba a los coeficientes de ebullición en las zonas de bajo título de vapor y altas diferencias de temperatura.

(Donowski and Kandlikar 2000) propusieron una modificación a la correlación propuesta anteriormente (Kandlikar 1990), utilizando datos experimentales obtenidos por (Yan and Lin 1999) con el refrigerante R134a en un intercambiador de placas, demostrando que las correlaciones de ebullición en tubos si son modificadas pueden ser aplicadas a intercambiadores de placas.

El cual presenta la siguiente ecuación:

$$\alpha_{TP} = [2,312 C_o^{-0,3} E_{CB} + 667,3 B_o^{2,8} F_{fl} * E_{NB}] (1 - x_g)^{0,003} \alpha_{lo} \quad (30)$$

Con:

$$E_{CB} = 0,512$$

$$E_{NB} = 0,338$$

En la ecuación (30) el coeficiente de la parte líquida se calcula por medio de la ecuación:

$$\alpha_{lo} = 0,2875 Re_l^{0,78} Pr_l^{\frac{1}{3}} \frac{k_l}{D_h} \quad (31)$$

## 2.2 Intercambiador de calor

Un intercambiador de calor es un equipo térmico diseñado para transferir energía térmica entre dos medios o sistemas físicos los cuales se encuentran a temperaturas diferentes provocando un cambio térmico entre ellos, evitando una mezcla entre sí.

Los intercambiadores de calor pueden utilizarse como un proceso de calentamiento o de enfriamiento dependiendo la aplicación en la que se va a utilizar. La transferencia de calor se lo realiza a través de una pared metálica o de tubos que separa ambos fluidos dependiendo el tipo de intercambiador de calor. Los intercambiadores de calor se emplean en diversas industrias y presentan numerosos diseños. (Wikipedia, 2013)

Figura 8. Chiller tipo Baudelot



Fuente: <http://www.e-therm.com.ar/productos/chillers.html>

**2.2.1 Clasificación de los intercambiadores de calor.** Si bien los intercambiadores de calor presentan una gran variedad de formas y tamaños existen varias formas de clasificarlos una de la más importante de las clasificaciones se realiza en base de la dirección de los flujos, el grado de contacto de los fluidos y según la construcción del intercambiador.

A continuación citaremos los más utilizados.

*Según el proceso de transferencia:*

- Contacto directo
  - Líquido / Gas
  - Líquido / Vapor
  - Fluidos no mezclables (inmiscible)
  
- Contacto indirecto
  - Con transferencia directa
  - Con almacenamiento
  - Lecho del fluido o lecho fluidizado
  - Paso simple
  - Multipaso

*Según su número de fluidos utilizados*

- Un
- Dos
- n Fluidos

*Según su construcción y configuración*

- Tubular
  - Doble tubo
    - Paralelo
    - Contraflujo

Carcasa y tubos  
Tubos en espiral  
Tubos enrollados (Pipe coils)

- Placas Planas
  - PHE
  - Espiral
  - Platecoils (plato enrollado)
  - Circuito impreso
  
- Superficie aletada (tubular o de placas)
  - Aletas planas
  - Aletas de tubos
  
- Regenerativo
  - Estático
  - Dinámico

*Según su compacidad*

- Compactos
- No compactos

*Según la disposición de flujos*

- Paso único
  - Contracorriente
  - Paralelo
  - Flujo cruzado
  - Flujo dividido
  - Flujo partido
  
- Paso múltiple

Superficies extendidas

Cruzado / Contra corriente

Cruzado / Paralelo

Flujo compuesto

Carcasa y tubos

Paralelo contra corriente

n carcasa

n tubos

Flujo partido

Flujo dividido

Planos

Fluido 1 n pasos

Fluidos 2 n pasos

*Según el mecanismo de transferencia*

- Convección / Convección
- Convección / Cambio de fase
- Cambio de fase / Cambio de fase
- Convección / Radiación

*Según su servicio*

- Refrigerador
- Calentador
- Condensador
- Rehervidor
- Sobrecalentador
- Vaporizador
- Generador de vapor
- Enfriador (GUTI, 2009)

**2.2.2** *Aplicaciones de los intercambiadores de calor.* Algunas de las aplicaciones más comunes se encuentran en calentamiento, ventilación, sistemas de acondicionamiento de

espacios, radiadores en máquinas de combustión interna, calderas, condensadores, y pre-calentadores o enfriamiento de fluidos.

Se intenta proveer varios ejemplos específicos de cómo funciona un intercambiador de calor en un determinado sistema, claro está que no se cubren todas las aplicaciones posibles.

Las aplicaciones de los intercambiadores de calor son muy variadas y reciben diferentes nombres:

*Intercambiador de calor.* Realiza la función doble de calentar y enfriar dos fluidos.

*Condensador.* Condensa un vapor o mezcla de vapores.

*Enfriador.* Enfría un fluido por medio de otro.

*Calentador.* Aplica calor sensible a un fluido.

*Rehervidor.* Conectado a la base de una torre fraccionadora proporciona el calor de ebullición que se necesita para la destilación. (Los hay de termosifón, de circulación forzada, de caldera)

*Vaporizador.* Un calentador que vaporiza parte del líquido. (USAL, 2009 pág. 2)

**2.2.3 Evaporadores.** Se conoce como evaporador al intercambiador de calor que genera la transferencia de energía térmica contenida en el medio ambiente hacia un gas refrigerante a bajas temperaturas y en proceso de evaporación. Este medio puede ser aire o agua.

Los evaporadores se encuentran en todos los sistemas de refrigeración como neveras, equipos de aire acondicionado y cámaras frigoríficas. Su diseño, tamaño y capacidad depende de la aplicación y carga térmica de cada uso.

**2.2.3.1 Clasificación de los evaporadores.** En función del estado del fluido a la salida:

- Secos: el refrigerante abandona el equipo en estado de vapor recalentado.
- Inundados: el compresor se conecta en la parte superior tomando el vapor a saturación, dada su coexistencia con fase líquida.

En función del fluido a enfriar

- De aire
  - Convección natural (estáticos)
  - Convección forzada
- De líquido

**2.2.3.2 Principio.** En los sistemas frigoríficos el evaporador opera como intercambiador de calor, por cuyo interior fluye el refrigerante el cual cambia su estado de líquido a vapor. Este cambio de estado permite absorber el calor sensible contenido alrededor del evaporador y de esta manera el gas, al abandonar el evaporador lo hace con una energía interna notablemente superior debido al aumento de su entalpía, cumpliéndose así el fenómeno de refrigeración.

El flujo de refrigerante en estado líquido es controlado por un dispositivo o válvula de expansión la cual genera una abrupta caída de presión en la entrada del evaporador. En los sistemas de expansión directa esta válvula despiden una fina mezcla de líquido y vapor a baja presión y temperatura. Debido a las propiedades termodinámicas de los gases refrigerantes este descenso de presión está asociado a un cambio de estado y, lo que es más importante aún, al descenso en la temperatura del mismo.

De esta manera, el evaporador absorbe el calor sensible del medio a refrigerar transformándolo en calor latente el cual queda incorporado al refrigerante en estado de vapor. Este calor latente será disipado en otro intercambiador de calor del sistema de refrigeración por compresión conocido como condensador dentro del cual se genera el cambio de estado inverso, es decir, de vapor a líquido. (Wikipedia, 2013)

### 2.3 Intercambiador de calor tipo Baudelot

Dispositivo mecánico que es utilizado para enfriar agua u otros líquidos o para varios usos industriales. El más común de ellos es como enfriador de leche el cual trata de bombear un fluido a una batea o tolva distribuidora y desde allí formar una película homogénea de agua; en este caso descendiendo sobre paneles o placas térmicas verticales.

Este sistema logra una alta velocidad de flujo, asegurando máxima eficiencia en la transferencia de calor y un exclusivo efecto de auto limpieza. (E-THERM, 2012)

Figura 9. Banco de hielo-chiller Baudelot



Fuente: <http://www.e-therm.com.ar/productos/chillers.html>

**Confiabilidad.** Compactos para suministro de agua de proceso 100% confiables, tanto en R-22 como amoníaco a 0,5% °C.

- No se bloquean
- No se calcifican
- Apto para agua duras
- Apto para fluidos ácidos
- Apto para fluidos alcalinos
- Apto para fluidos con sólidos en suspensión

**2.3.1** *Funcionamiento de un intercambiador de calor tipo Baudelot.* El intercambiador de calor tipo Baudelot puede usarse para enfriar agua o para varios usos industriales consiste básicamente en una serie de placas ubicadas horizontalmente tanto como verticalmente enlazados y soldados con láser entre sí para formar una malla en cual interior servirá para el flujo del refrigerante mientras que el líquido a enfriarse fluye como una película o capa delgada sobre todo el exterior de la placa. En sus dos lados estas placas son construidas generalmente de acero inoxidable en algunos casos de titanio para trabajos especiales.

El refrigerante que circula en el interior de la placa absorbe el calor del fluido exterior y cambia de fase de líquido a gas.

Estas placas son de fácil limpieza con la posibilidad de desmontar para su inspección. Su estructura, cerramientos, tanques de agua y bandeja distribuidora de agua son de acero inoxidable. Pero en este caso por ser un banco de pruebas para que sea mejor visible su funcionamiento y la toma de datos se lo realizó de planchas transparentes de acrílico resistente a las temperaturas que vamos a trabajar.

Las dimensiones de todo el intercambiador se basa directamente en el número de placas que vamos a poner como de sus dimensiones las cuales podemos obtener de los cálculos térmicos de transferencia de calor.

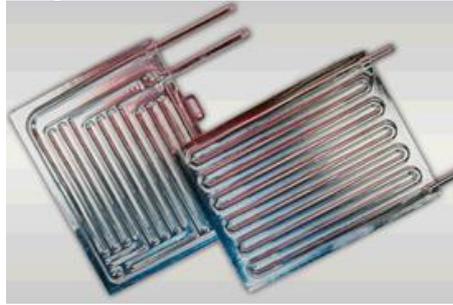
La placa descrita anteriormente por su manera de trabajo térmico toma el nombre de evaporador. (E-THERM, 2012)

### **2.3.2** *Tipos de paneles del intercambiador de calor tipo Baudelot*

**2.3.2.1** *Paneles PLATECOIL.* Básicamente, dos láminas soldadas juntas (una de ellas o ambas son paneles PLATECOIL troquelados) forman una serie de canales a través de los cuales fluye un medio de calentamiento o enfriamiento. Tres estilos de varias etapas y dos estilos de configuraciones de flujo serpentín garantizan que usted cuente con la combinación adecuada de velocidad de flujo y velocidad de transferencia de calor con vapor, gases o líquidos.

Durante las oscilaciones de carga PLATECOIL alcanza las temperaturas de funcionamiento deseadas extremadamente rápidos y con una variación mínima. Los estilos PLATECOIL para medios de calentamiento o enfriamiento líquido que incluyen aceites calientes o refrigerantes promueven velocidades altas de flujo interno para velocidades de transferencia de calor altas. (TRANTER, 2013)

Figura 10. Paneles PLATECOIL



Fuente: <http://www.tranter.com/Pages/products/prime-surface/description-benefits.aspx>

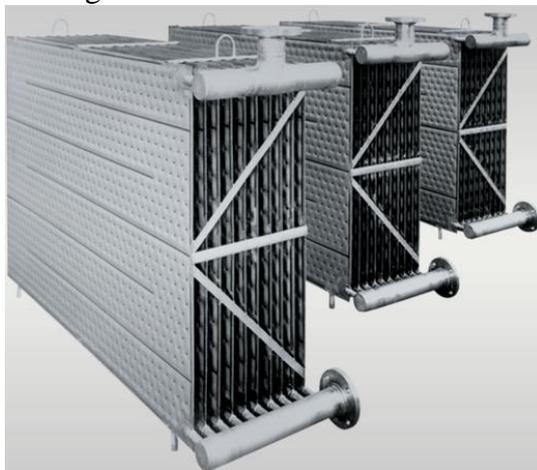
**2.3.2.2 Paneles ECONOCOIL.** De calibre ligero, resistentes a la corrosión los paneles hidráulicamente expandidos ECONOCOIL son una variante especial de PLATECOIL disponibles en una variedad de estilos de relieve simple y relieve doble, y tamaños en pasos paralelos o de serpentin. La construcción con titanio brinda una prolongada vida útil donde existen entornos altamente corrosivos. Los paneles de titanio de calibre ligero ECONOCOIL brindan una mejor conductividad térmica que las unidades construidas a partir de material de calibre pesado. (TRANTER, 2013)

Aplicaciones típicas de ECONOCOIL:

- Soluciones de recubrimiento de sulfato de cromo
- Ácido de cromo, 10 % en ebullición
- Soluciones de niquelado (a excepción del niquelado sin electrolitos con fluoruros)
- Ácido sulfúrico inhibido
- Ácido clorhídrico inhibido

- Hipocloritos
- Agua de mar o salmuera
- Hidrocarburos clorados
- Recuperación de calor de gases de combustión
- Calentamiento de gas de chimenea

Figura 11. Paneles ECONOCOIL



Fuente: <http://www.tranter.com/Pages/products/prime-surface/description-benefits.aspx>

## 2.4 Diseño de un intercambiador de calor

El diseño de un intercambiador de calor es una tarea que permita integrar conocimientos tanto teóricos como experimentales. Familiarizarse con el manejo de normas técnicas internacionales, obtener habilidades de salida del proceso de diseño que sistematiza las habilidades simples (comparar, definir, identificar, clasificar) para interpretar y predecir su funcionamiento en condiciones particulares de una nueva instalación, reconstrucción o ampliación.

La etapa crítica del proceso es la modificación de los parámetros de diseño; dependiendo del diseño puede ser manual o utilizando un programa de computadora. Si

la modificación es manual dependerá de la experiencia y conocimiento del proceso físico del diseñador para lograr una rápida convergencia de un diseño aceptable que no presente fallas. Por otro lado si se utilizan un programa de computación la convergencia dependerá de la habilidad y cuidado con que se modifique los parámetros de diseño.

**2.4.1 Diseño térmico.** El mayor problema en el diseño térmico de intercambiadores de calor es encontrar el tamaño adecuado que debe tener esa frontera sólida “área o superficie de transferencia de calor” para garantizar una determinada tasa de transferencia de calor. La tasa de transferencia de calor  $q$  para un intercambiador de calor se expresa por medio de la ecuación:

$$q = U * A * \Delta T_m \quad (32)$$

Dónde:

$U$  = Coeficiente global de transferencia de calor

$A$  = Área de transferencia de calor

$\Delta T_m$  = Diferencia promedio apropiada de temperatura entre los fluidos

**2.4.1.1 Coeficiente global de transferencia de calor.** Una parte fundamental, y en la mayoría de ocasiones la más incierta, en cualquier análisis de intercambiadores de calor es la obtención del coeficiente global de transferencia de calor.

Este coeficiente de transferencia de calor ( $U$ ) se define en términos de resistencia térmica total para la transferencia de calor entre un fluido caliente a temperatura  $T_1$  y otro frío a temperatura  $T_2$  separados por una pared plana se lo expresa como:

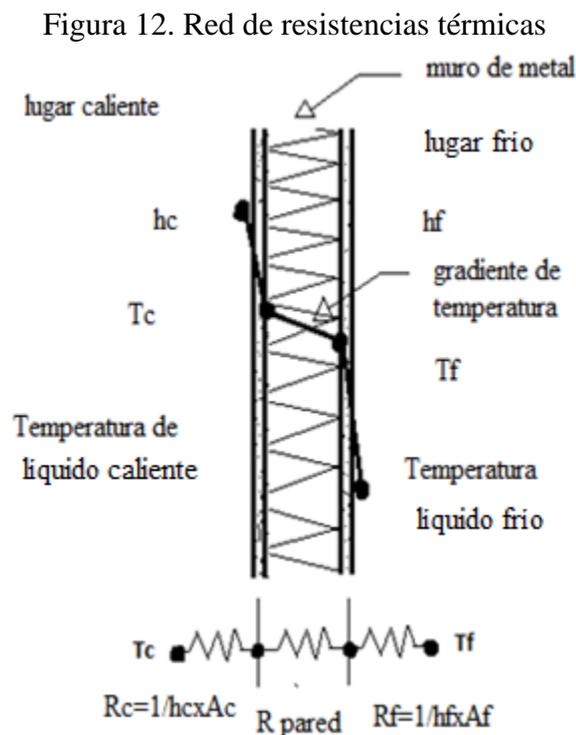
$$UA = \frac{1}{\sum R_i} = \frac{\Delta T}{q} = \frac{1}{U * A} = \frac{1}{U_c * A_c} = \frac{1}{U_f * A_f} \quad (33)$$

$A_c, A_p, A_f$  son áreas superficiales de la pared mojadas por los fluidos

Donde c, f se refiere a los fluidos caliente y frío, respectivamente. Tomar en cuenta que el cálculo del producto  $U \cdot A$  no requiere la designación del lado caliente o frío ( $U_c \cdot A_c = U_f \cdot A_f$ ). Sin embargo el cálculo del coeficiente global depende si se basa en el área de superficie del lado caliente o frío, ya que:

$$U_c \neq U_f, \text{ si } A_c \neq A_f \text{ (Ver figura 12)}$$

En resumen el calor se trasfiere del fluido caliente a la pared por convección, luego a través de la pared por conducción, finalmente de la pared hacia el fluido frío otra vez por convección.



Fuente: Autores

El coeficiente global de transferencia de calor está influenciado por los coeficientes de transferencia de calor por convección de los fluidos caliente y frío, también por la forma de ondulaciones de las placas que viene dado por la siguiente expresión:

$$U = \frac{1}{\sum R_i} = \frac{1}{\frac{1}{h_{\text{calient}}} + \frac{e}{k} + \frac{1}{h_{\text{fría}}}} \quad (34)$$

Dónde:

$h_{calient}$  = Coeficiente de convección del fluido caliente

$e$  = Espesor de la placa

$k$  = Conductividad térmica del material de la placa

$h_{fría}$  = Coeficiente de convección del fluido frío

No se toma en cuenta los factores de incrustación ya que es obvio que el factor de incrustación es cero en un intercambiador de calor nuevo, y pesar que aumenta con el tiempo a medida que se acumulan los depósitos de sólidos sobre la superficie del mismo. El factor de incrustación depende de la temperatura de operación y de la velocidad de los fluidos, así como de la duración del servicio.

**2.4.1.2 Método de la diferencia de temperaturas media logarítmica, LMTD.** La diferencia de temperaturas entre los fluidos caliente y frío varía a lo largo del intercambiador y resulta conveniente tener una diferencia media de temperaturas logarítmicas para usarse en la ecuación (32).

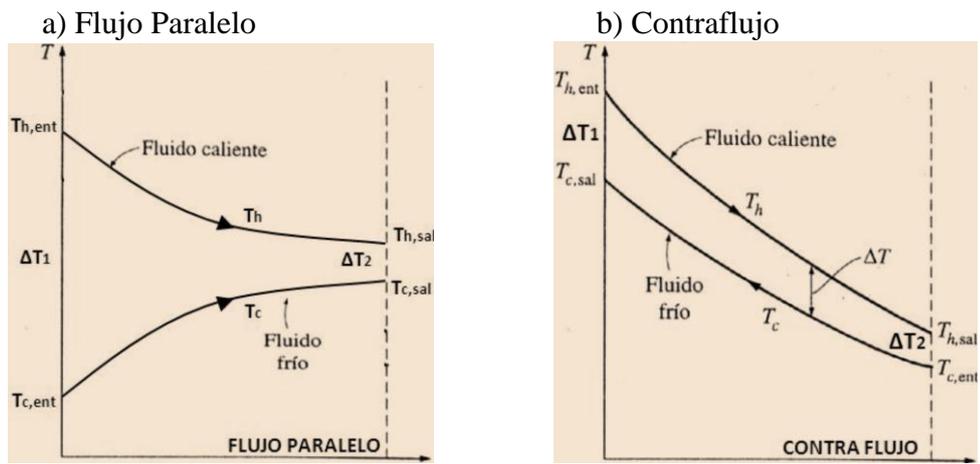
La diferencia de temperaturas media logarítmica se obtiene siguiendo el perfil real de temperaturas de los fluidos a lo largo del intercambiador y es una representación exacta de la diferencia de temperatura promedio entre los fluidos caliente y frío.

Dónde:

$$LMTD = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}} \quad (35)$$

La diferencia de temperatura media logarítmica es la representación apropiada de la diferencia de temperatura promedio que debe usarse en el análisis de los intercambiadores de calor. En este caso  $\Delta T_1$  y  $\Delta T_2$  representan la diferencia de temperatura entre los dos fluidos del intercambiador. No existe diferencia con respecto a cuál de los extremos de éste se designe como la entrada o la salida.

Figura 13. Variación de las temperaturas de los fluidos en un intercambiador



Fuente: INCROPERA F.P. Fundamentos de Transferencia de Calor

## CAPÍTULO III

### 3. DISEÑO DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR

#### 3.1 Generalidades

Los intercambiadores de calor son equipos muy utilizados para el intercambio de calor de un fluido con alta temperatura a otro fluido con menos temperatura con el fin de utilizarlo en diferentes procesos de refrigeración industrial. El intercambiador de calor Baudelot es un equipo cuya misión es enfriar fluidos incluso hasta  $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$  y están basados en el ciclo de compresión de vapor.

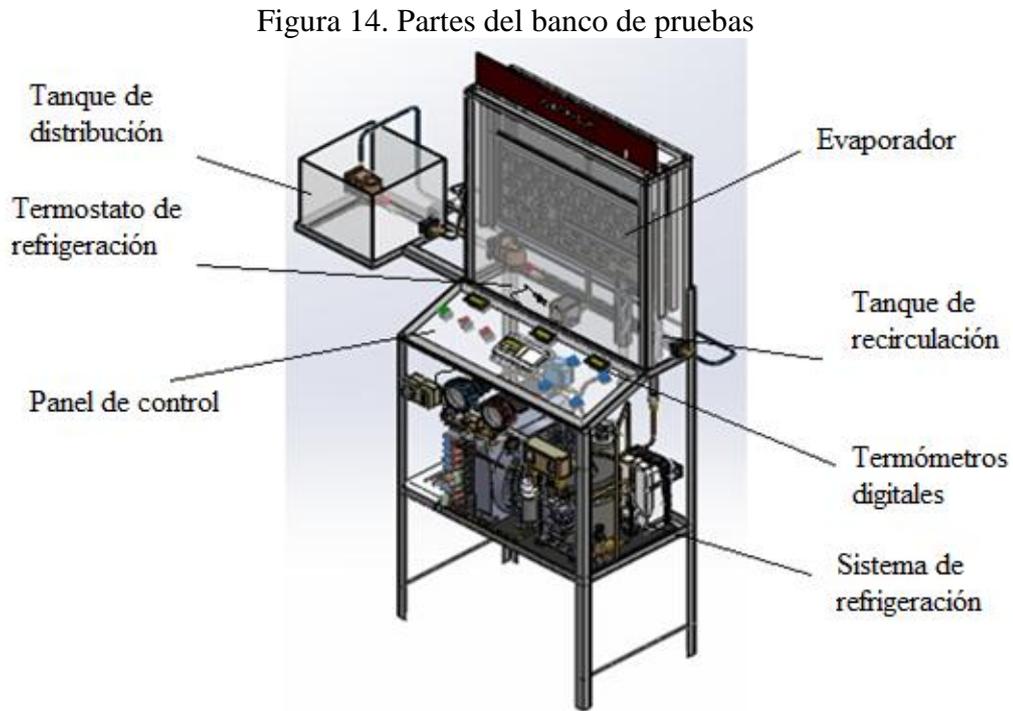
Las máquinas de compresión de vapor constan de un evaporador donde se produce el intercambio de temperaturas de un condensador que es necesario refrigerar, la válvula de expansión y el compresor. En el evaporador se enfría el agua en el exterior que posteriormente se enviará a otros procesos. El condensador puede ser refrigerado por aire o por agua.

El diseño parte prácticamente de la obtención de algunos componentes del sistema para luego proceder con la comprobación con el cálculo térmico. Este cálculo térmico consta en la comparación del coeficiente global de transferencia de calor teórico con el experimental. Luego de la comprobación se procede a la selección de los otros equipos que se requiera.

#### 3.2 Principio de funcionamiento

El intercambiador tipo Baudelot consta básicamente de una placa de acero inoxidable (evaporador) soldada por sistema a laser. Su funcionamiento es de expansión seca, el refrigerante R-22 circula por el interior de la placa mientras el líquido a enfriar (agua) fluye como una película delgada sobre el exterior del mismo. El líquido fluye bajando sobre la placa por acción de la gravedad desde un distribuidor localizado en la parte alta de la placa y es recogido en una especie de cajón colocado en la parte inferior.

La Figura 14 muestra las partes del banco de pruebas:



Fuente: Planos del intercambiador de calor tipo Baudelot- SolidWorks

El líquido es recogido en el tanque de recirculación la cual puede ser recirculado por medio de una bomba por la placa las veces que sea necesario hasta llegar a la temperatura deseada.

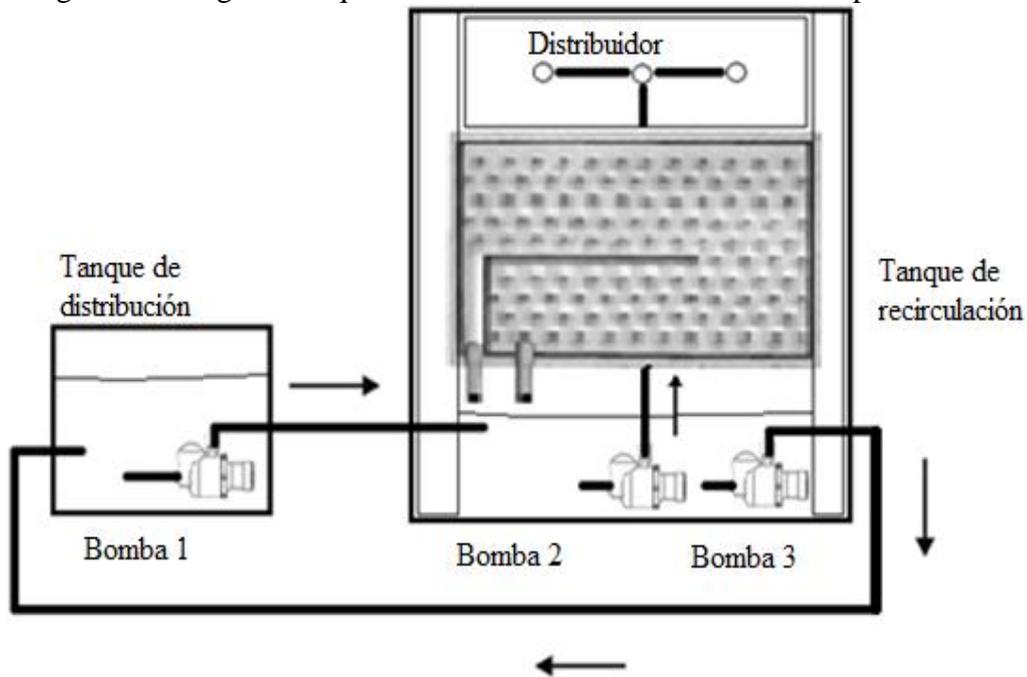
El banco de pruebas básicamente funciona de la siguiente manera:

El líquido a enfriar a temperatura ambiente es bombeado por medio de la bomba 1 desde el tanque de distribución hacia el tanque de recirculación. Luego se procede a bombear por medio de la bomba 2 desde el tanque de recirculación hacia el distribuidor.

El agua se bombea hasta la bandeja de distribución y de forma controlada se distribuye homogéneamente a través de los orificios alimentando la placa vertical. La alta velocidad del flujo de agua sobre la placa asegura un efecto de auto limpieza que permite trabajar con medios sucios.

Una vez que el líquido alcance la temperatura deseada es bombeada por medio de la bomba 3 desde el tanque de recirculación hacia el tanque de distribución para la repetición del proceso si es necesario.

Figura 15. Diagrama esquemático del intercambiador de calor tipo Baudelot



Fuente: Autores

### 3.3 Selección de materiales

Los materiales que se elijan para los distintos elementos del banco de pruebas deberán resistir los efectos de corrosión, desgaste y poseer resistencia suficiente para soportar la temperatura y presión de trabajo.

Una selección de materiales asegura una buena presentación del trabajo, bajos costos de mantenimiento y facilidad de montaje.

**3.3.1 Placa.** La tesis parte de la adquisición de la placa en el mercado. Debe ser fabricada de un material resistente ya que van a estar en contacto con fluidos; constan de las siguientes características:

Tabla 4. Datos materiales de Econocoil

| Material de Econocoil              | Espesor (mm) | Presión de diseño (bar) | Temperatura de diseño (°C) |
|------------------------------------|--------------|-------------------------|----------------------------|
| <i>Doble cara con relieve</i>      |              |                         |                            |
| Acero inoxidable 304/316/304I/316I | 1,2/1,2      | 9,6                     | 185                        |
|                                    | 1,5/1,5      | 12,0                    | 185                        |
|                                    | 2,0/2,0      | 18,0                    | 185                        |
| Titanio                            | 1,0/1,0      | 7,0                     | 165                        |
| <i>Una cara con relieve</i>        |              |                         |                            |
| Acero inoxidable 304/316/304I/316I | 1,2/3,0      | 9,6                     | 185                        |
|                                    | 1,5/3,0      | 12,0                    | 185                        |

Fuente: <http://www.tranter.com/Pages/literature/iomanuals.aspx>

La placa importada de la empresa TRANTER consta de las siguientes características:

- Acero inoxidable 304L
- Con espesores de 1,5 mm
- Presión de diseño: 12bar
- Temperatura de diseño: 185°C

**3.3.2 Tanques de distribución y recirculación.** En vista que el banco de pruebas “Intercambiador de calor tipo Baudelot” a construirse es para el laboratorio de Transferencia de Calor y para fines didácticos, nos es necesario seleccionar un material que cumpla algunas exigencias.

El vidrio o el acrílico son materiales transparentes que nos facilita la observación del proceso y son excelentes para la construcción de los tanques.

Se ha escogido el acrílico debido a su peso y la facilidad de montaje. En el mercado existe una amplia gama de tamaños y acabados con diferentes espesores.

Se ha seleccionado planchas de acrílico con 2 mm de espesor y que se encuentra en stock.

### 3.4 Diseño térmico del intercambiador de calor tipo Baudelot

Para el diseño térmico del intercambiador de calor tipo Baudelot es necesario conocer la carga térmica.

**3.4.1 Cálculo de la carga térmica.** Para calcular la carga térmica se toma en cuenta la ubicación en donde será instalado el banco de pruebas; posteriormente se procede al cálculo del calor a extraer del producto:

Ubicación: Riobamba

Altitud: 2764 msnm

Humedad: 76%

Temperatura ambiente: 14- 23 °C

Fluido a manejar: Agua

*Datos de entrada necesarios para los cálculos*

Temperatura del agua a la entrada de la placa:

$$T_{a1} = 17 \text{ °C}$$

Temperatura ambiente

Temperatura del agua a la que se desea llegar:

$$T_{a2} = 5 \text{ °C}$$

*Temperatura promedio del agua.* Se calcula por medio de la ecuación (10) y se tiene:

$$T_{pa} = \frac{T_{a1} + T_{a2}}{2}$$

$$T_{pa} = \frac{17 + 5}{2}$$

$$T_{pa} = 11^{\circ}\text{C}$$

$T_{pa}$  = temperatura promedio del agua °C

Tabla 5. Propiedades del agua a temperatura promedio:  $T_{pa} = 11^{\circ}\text{C}$

|   |         |
|---|---------|
| Densidad<br>$\rho_a \left(\frac{kg}{m^3}\right)$                        | 999,1   |
| Conductividad térmica<br>$k_a \left(\frac{W}{m^{\circ}\text{C}}\right)$ | 0,586   |
| Calor específico<br>$c_{pa} \left(\frac{J}{kg^{\circ}\text{C}}\right)$  | 4191    |
| Viscosidad dinámica<br>$\mu_a \left(\frac{kg}{m\ s}\right)$             | 0,00127 |
| Número de Prandtl<br>$Pr_a$   | 9,126   |

Fuente: HOLMAN J.P. Transferencia de Calor. Tabla A9. Pág. 451

*Cálculo del flujo másico de agua.*- Se parte de un volumen establecido de acuerdo a la programación del PLC (tanque de recirculación).

*longitud del tanque* = 60 cm = 0,6m

*ancho del tanque* = 15 cm = 0,15m

altura del volumen de agua = 10 cm = 0,1m

$$V = (0,6 * 0,1 * 0,15)m = 0,009 m^3$$

Tiempo estimado de enfriamiento del agua = 20 min

$$\delta = \frac{m}{V} \rightarrow m = \delta * V$$

$$m = 999,1 \frac{kg}{m^3} * 0,009m^3$$

$$m = 8,992 kg$$

$$\dot{m}_a = \frac{m}{t} = \frac{8,992kg}{20 min} * \frac{min}{60s}$$

$$\dot{m}_a = 0,0075 \frac{kg}{s}$$

Con valores anteriores y la Tabla 5 reemplazamos en (1) se tiene:

$$q_{req} = \dot{m}_a * C_{p_a} * (T_{a1} - T_{a2})$$

$$q_{req} = 0,0075 \frac{kg}{s} * 4195 \frac{J}{kg^{\circ}C} * (17 - 5)^{\circ}C$$

$$q_{req} = 377,55 W$$

$$q_{req} = 1288,254 \frac{BTU}{h}$$

**3.4.2** *Cálculo del coeficiente de transferencia de calor en el exterior de la placa.* Se determina las propiedades del agua a temperatura de película con la ecuación (11):

Temperatura de la superficie de la placa:

$$T_s = 5^{\circ}C \quad \text{Asumida}$$

$$T_f = \frac{T_{pa} + T_s}{2}$$

$$T_f = \frac{11 + 5}{2}$$

$$T_f = 8^\circ\text{C}$$

Tabla 6. Propiedades del agua a temperatura de película  $T_f$

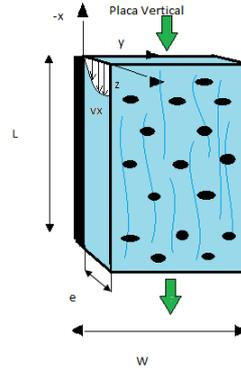
|  |         |
|--|---------|
| Densidad<br>$\rho_{fa} \left(\frac{kg}{m^3}\right)$                      | 999,44  |
| Conductividad térmica<br>$k_{fa} \left(\frac{W}{m^\circ\text{C}}\right)$ | 0,581   |
| Calor específico<br>$Cp_{fa} \left(\frac{J}{kg^\circ\text{C}}\right)$    | 4200    |
| Viscosidad dinámica<br>$\mu_{fa} \left(\frac{kg}{m\ s}\right)$           | 0,00141 |
| Número de Prandtl<br>$Pr_{fa}$   | 10,189  |

Fuente: HOLMAN J.P. Transferencia de Calor. Tabla A9. Pág. 451

**3.4.2.1** *Cálculo del coeficiente convectivo del agua.* Se toma en cuenta convección forzada por la presencia de una bomba que se utiliza para transportar el agua hacia el distribuidor.

El cálculo de la velocidad del agua se realiza por medio de ecuaciones diferenciales para el caso de película líquida descendente en una placa vertical plana:

Figura 16. Película líquida descendente en una placa vertical plana



Fuente: Autores

*Ecuación de la continuidad - Coordenadas rectangulares*

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\partial V_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\partial V_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\partial V_z)}{\partial z} = 0$$

$$\frac{\partial(\partial V_x)}{\partial x} = 0$$

$$V_x = cte$$

*Ecuación del movimiento – Coordenadas rectangulares - Dirección (x)*

$$\rho \left\{ \frac{\partial V_x}{\partial t} + V_x \frac{\partial V_x}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_x}{\partial y} + V_z \frac{\partial V_x}{\partial z} \right\} = - \frac{\partial P}{\partial x} + \mu \left\{ \frac{\partial^2 V_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V_x}{\partial z^2} \right\} + \rho g$$

La componente de la velocidad en dirección en x depende de la coordenada z

$$\frac{\partial^2 V_x}{\partial z^2} = - \frac{\rho g}{\mu}$$

Integrando se tiene:

$$V_x = - \frac{\rho g}{\mu} \frac{z^2}{2} - C_1 z - C_2$$

Límites de frontera:

$$z = 0 \rightarrow V_x = 0 \rightarrow C_2 = 0$$

$$z = e \rightarrow V_x = V_{max} \rightarrow \frac{\partial V_x}{\partial z} = 0 \rightarrow C_1 = - \frac{\rho g}{\mu} z$$

Sustituimos estos coeficientes en la ecuación anterior se tiene:

$$Vx = \frac{\rho g e^2}{\mu} \quad (36)$$

Se asume un espesor de película de aproximadamente  $e = 0,0005 \text{ m}$  y con los valores de la Tabla 6 se tiene:

$$Vx = \frac{999,44 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 9,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} * (0,0005)^2}{0,00141 \frac{\text{kg}}{\text{m s}}}$$

$$Vx = 0,868 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Se considera que la placa tiene ondulaciones y no es completamente plana por tal razón existe una disminución de la velocidad. Para nuestro caso se toma un 60% de la velocidad máxima de la película líquida descendente.

$$Vx = 0,868 * 0,6 = 0,52 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

El número de Reynolds y de Prandtl se calcula por la ecuación (6), (7) y con los valores de la Tabla 6.

$$Re_a = \frac{\rho_{fa} * v_{max} * l}{\mu_{fa}}$$

Dónde:

$l$  = longitud de la placa [m]

$$Re_a = \frac{999,44 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 0,52 \frac{\text{m}}{\text{s}} * 0,25\text{m}}{0,00141 \frac{\text{kg}}{\text{m.s}}} = 92146,95 \quad \text{adimensional}$$

$$Pr_a = \frac{\mu_{fa} * Cp_{fa}}{k_{fa}} = 10,189$$

El número de Nusselt sobre placas planas es evaluado a partir de la ecuación (17)

$$Nu = \frac{l * h_a}{k} = 0,664 Re_a^{1/2} Pr_a^{1/3}$$

$$Nu = 0,664 Re_l^{1/2} Pr^{1/3} = 0,664 (92146,95)^{1/2} (10,189)^{1/3} = 436,97$$

El coeficiente convectivo del agua se calcula a partir de la ecuación (5)

$$h_a = \frac{K_{fa} * Nu}{l}$$

Dónde:

$l$  = longitud de la placa [m]

Evaluando los valores antes calculados junto con los datos de la Tabla 6 se tiene:

$$h_a = \frac{0,581 \frac{W}{m^{\circ}C} * 436,97}{0,25m} = 1015,51 \frac{W}{m^2^{\circ}C}$$

**3.4.3 Análisis termodinámico.** Con el análisis termodinámico se busca las propiedades requeridas del refrigerante R-22.

**3.4.3.1 Refrigerante R-22.** El refrigerante que se va a utilizar es el R – 22 que es recomendado para sistemas de aire acondicionado y de refrigeración. Tiene excelentes propiedades termodinámicas que hacen que este refrigerante sea idóneo para aplicaciones de alta y media temperatura.

Nuestro trabajo es un sistema de refrigeración por lo tanto es recomendado este refrigerante (ver Anexo A).

*Determinación de la temperatura de refrigeración del refrigerante R-22*

$$T_{ref} = T_{ffrio} - \Delta_{Te} \quad (37)$$

Dónde:

$T_{ref}$  = temperatura de refrigeración

$T_{ffrio}$  = temperatura del espacio refrigerado

$\Delta_{Te}$  = diferencia de temperatura entre el evaporador y el espacio refrigerado

Este  $\Delta_{Te}$  está condicionado por el tipo de evaporador, la humedad relativa de la cámara que a su vez está determinada por el tipo de producto en el interior de la misma.

Para nuestro caso el  $\Delta_{Te} = 6^{\circ}\text{C}$  ya que el fluido a enfriar es agua y es un evaporador de expansión directa. (ALARCÓN CREUS, 1998 pág. 122)

Para lo cual:

$$T_{ref} = 5^{\circ}\text{C} - 6^{\circ}\text{C}$$

$$T_{ref} = -1^{\circ}\text{C}$$

Con este análisis se obtiene las propiedades requeridas del refrigerante R-22.

Presión de saturación con la temperatura  $T_{ref} = -1^{\circ}\text{C}$  (ver Anexo B).

$$P_{sat} = 0,482175 \text{ MPa}$$

*Determinación de la temperatura de condensación del refrigerante.* Para la determinación de la temperatura de condensación hay que tomar en cuenta el tipo de condensador.

En este trabajo se utiliza una unidad condensadora que posee un condensador enfriado por aire forzado con ventilador impulsado por motor eléctrico.

En el catálogo del fabricante así como en la práctica establece una diferencia de temperatura de  $\Delta T_{cond} = 5^{\circ}\text{C}$ . (ALARCÓN CREUS, 1998 pág. 119)

$$T_{cond} = T_{amb} + \Delta T_{cond} \quad (38)$$

Dónde:

$\Delta T_{cond}$  = diferencia de temperatura del condensador

$T_{amb}$  = temperatura ambiente

$T_{cond}$  = temperatura de condensación

Reemplazando en la ecuación (37) se obtiene:

$$T_{cond} = 19^{\circ}\text{C} + 5^{\circ}\text{C}$$

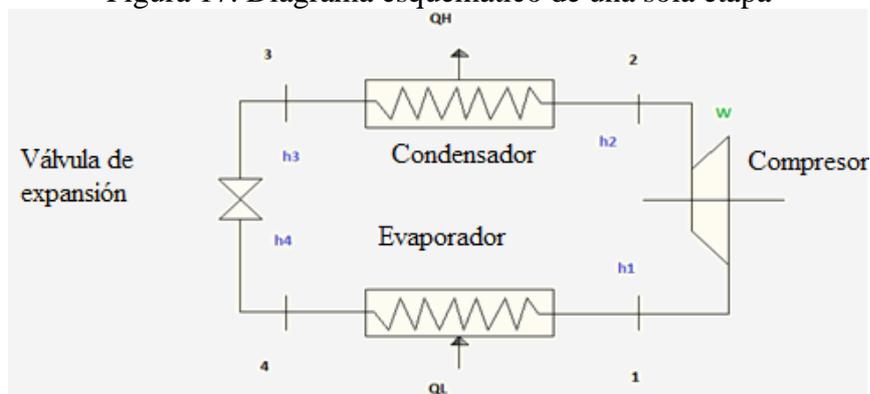
$$T_{cond} = 24^{\circ}\text{C}$$

Con las tablas del refrigerante (ver Anexo B) determinamos la presión de condensación:

$$P_{cond} = 1,016 \text{ MPa}$$

El diagrama esquemático de una sola fase del refrigerante R- 22 se presenta en la Figura 17 que se emplea en el diseño térmico para una temperatura de evaporación del refrigerante de  $T_{ref} = -1^{\circ}\text{C}$ .

Figura 17. Diagrama esquemático de una sola etapa



Fuente: Autores

1 – 2 → Compresión adiabática  $Q = 0$

2 – 3 → Cede calor a presión constante

3 – 4 → Estrangulamiento (disminución de presión) adiabático, isoentálpico

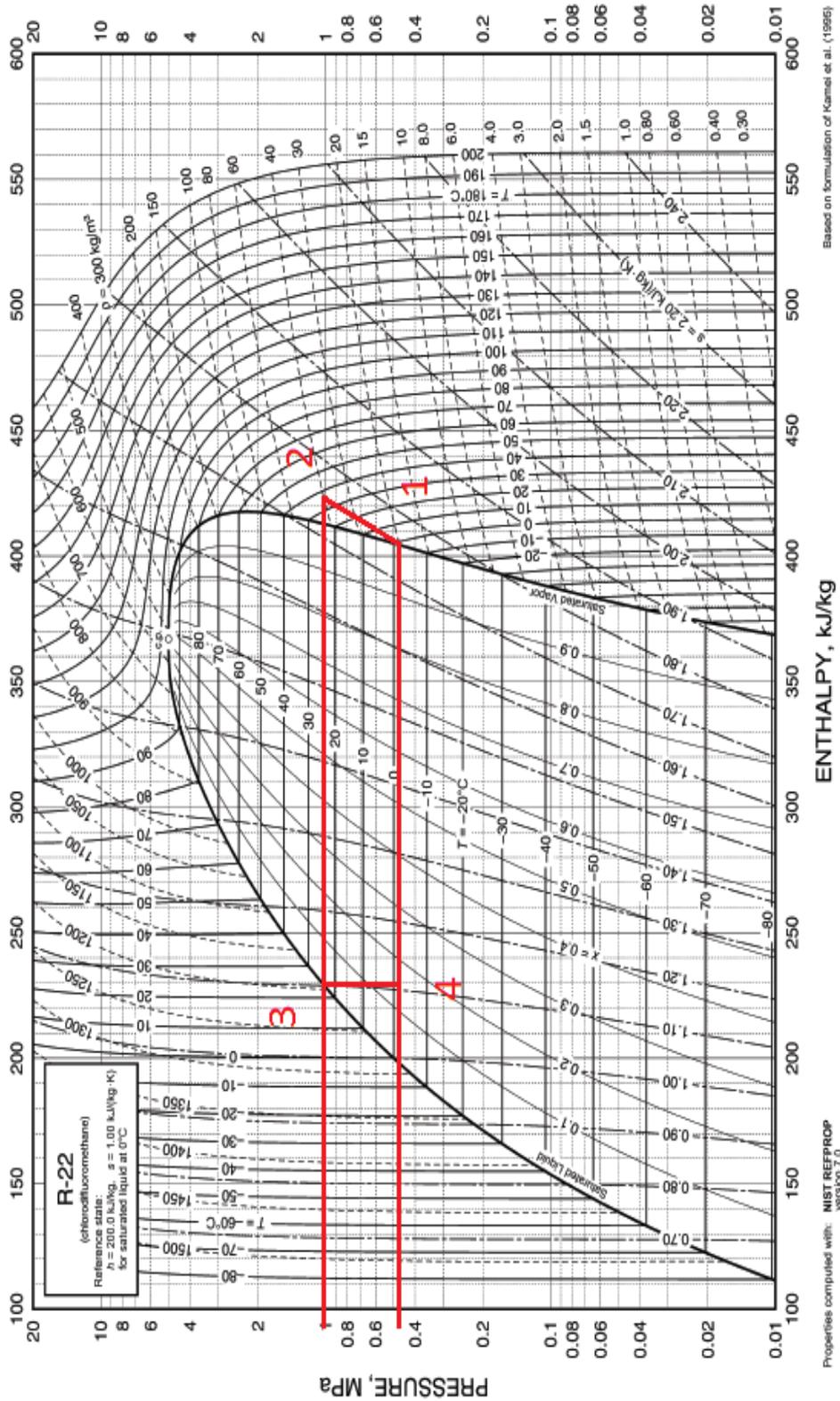
4 – 1 → Evaporación a presión constante

En la Figura 18 se indica el diagrama Presión - Entalpía del refrigerante R – 22 donde están trazadas las presiones y temperatura teóricas tanto de evaporación como de condensación.

Figura 18. Diagrama p- h del R-22

30.4

2009 ASHRAE Handbook—Fundamentals (SI)



Fuente: ASHRAE Fundamentals 2009.rar. Chapter 30 Thermophysical properties of refrigerants R-22

**3.4.4 Cálculo del coeficiente de transferencia de calor en el interior de la placa.** Para el cálculo del coeficiente de transferencia de calor en el interior de la placa se empleó la correlación de Donowski y Kandlikar para la ebullición bifásica en intercambiadores de placas de conversión forzada.

En la Tabla 7 se da la información de las propiedades del refrigerante con una calidad del 15%:

Tabla 7. Propiedades – Refrigerante R-22

|  |                              |
|--|------------------------------|
| $T_{ref}$ °C   | -1                           |
| Presión de saturación [MPa]  | $P_{sat} = 0,482175$         |
| Densidad del condensado [ $\frac{kg}{m^3}$ ]                             | $\rho_{rl} = 1284,9$         |
| Volumen específico del vapor [ $\frac{m^3}{kg}$ ]                        | $v_{rv} = 0,048645$          |
| Entalpía del condensado [ $\frac{kJ}{kg}$ ]                              | $h_{rl} = 198,83$            |
| Entalpía del vapor [ $\frac{kJ}{kg}$ ]                                   | $h_{rv} = 404,67$            |
| Calor específico del condensado [ $\frac{kJ}{kg \text{ } ^\circ C}$ ]    | $Cp_l = 1,1665$              |
| Calor específico del vapor [ $\frac{kJ}{kg \text{ } ^\circ C}$ ]         | $Cp_v = 0,7345$              |
| Viscosidad del condensado [Pa * s]                                       | $\mu_{rl} = 220,6 * 10^{-6}$ |
| Viscosidad del vapor [Pa * s]  | $\mu_{rv} = 11,45 * 10^{-6}$ |
| Conductividad térmica del condensado [ $\frac{W}{m \text{ } ^\circ C}$ ] | $k_{rl} = 95,25 * 10^{-3}$   |
| Conductividad térmica del vapor [ $\frac{W}{m \text{ } ^\circ C}$ ]      | $k_{rv} = 9,35 * 10^{-3}$    |

Fuente: ASHRAE Fundamentals 2009.rar Chapter 30 Thermophysical properties of refrigerants R-22

Se calcula la entalpía del refrigerante con una calidad del 15%:

$$h_{x=0,15} = h_f + x * h_{fg}$$

$$h_{x=0,15} = (198,83 + 0,15 * 205,84) \frac{kJ}{kg}$$

$$h_{x=0,15} = 229,706 \frac{kJ}{kg} = h_4$$

El flujo másico del refrigerante se calcula a partir de la ecuación (21)

$$m_{R-22} \dot{=} \frac{q_{UC}}{(h_1 - h_4)}$$

$q_{UC}$  = Capacidad de retirar calor por la unidad condensadora = 1352 W ,(ver Anexo C)

$h_1$  = entalpía del refrigerante R – 22 a vapor saturado

$h_4$  = entalpía del refrigerante R – 22 =  $h_{x=0,15}$

Al reemplazar valores en la ecuación se obtiene:

$$m_{R-22} \dot{=} \frac{1352 \text{ W}}{(404,67 \frac{kJ}{kg} - 229,706 \frac{kJ}{kg})}$$

$$m_{R-22} \dot{=} 0,00773 \frac{kg}{s}$$

Con la ecuación de la continuidad y con la ecuación (29) se obtienen las velocidades del refrigerante en los distintos tramos de la instalación hasta llegar al interior de la placa:

*Primer tramo:*

$$\phi_{1/4} = 0,00635 \text{ m} \qquad A = \frac{\pi(0,00635)^2}{4} = 3,167 \times 10^{-5} \text{ m}^2$$

$$m_{R-22} \dot{=} \rho_{rl} * v * A$$

$$v_1 = \frac{(0,00773 \frac{kg}{s})}{1284,9 \frac{kg}{m^3} * 3,167 \times 10^{-5} \text{ m}^2}$$

$$v_1 = 0,189 \frac{m}{s}$$

*Segundo tramo:*

*Espesor de la tubería de la placa = 0,035 in*

*Diámetro exterior de la tubería de la placa = 0,75 in = 0,019 m*

*Diámetro interno de la tubería de la placa = 0,68 in = 0,0172 m*

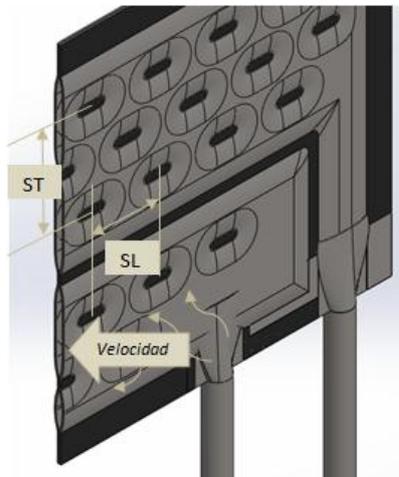
$$A = \frac{\pi(0,0172)^2}{4} = 0,000232 \text{ m}^2$$

$$\begin{aligned} \rho_{rl} * v_1 * A_1 &= \rho_{rl} * v_2 * A_2 \\ v_2 &= \frac{0,189 \frac{m}{s} * 3,167 \times 10^{-5} \text{ m}^2}{0,000232 \text{ m}^2} \\ v_2 &= 0,0258 \frac{m}{s} \end{aligned}$$

*Tercer tramo:*

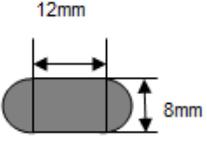
Es necesaria la velocidad con la que circula el refrigerante por los puntos de soldadura en el interior de la placa; por tal razón se calcula con la ecuación (14) estimando el caso del flujo a través de un banco de tubos.

Figura 19. Placa Econocoil- corte en SolidWorks



Fuente: Autores

Tabla 8. Dimensiones de la placa Econocoil como banco de tubos

| $ST$    | $SL$   | $D$   |
|---------|--------|---|
|         |        |  |
| 0,075 m | 0,02 m | 0,01191m  |

Fuente: Autores

La velocidad máxima se obtiene de las ecuaciones (15), (16) y los valores de la Tabla 8 se tienen:

$$v_{max1} = \frac{v_{\infty} S_T}{S_T - D} \quad v_{max1} = \frac{0,0258 \frac{m}{s} (0,075m)}{0,075 m - 0,01191m}$$

$$v_{max1} = 0,0306 \frac{m}{s}$$

$$v_{max2} = \frac{\frac{v_{\infty} S_T}{2}}{\sqrt{\left(\frac{S_T}{2}\right)^2 + S_L^2} - D} \quad v_{max2} = \frac{0,0258 \frac{m}{s} * \frac{0,075m}{2}}{\sqrt{\left(\frac{0,075m}{2}\right)^2 + (0,02m)^2} - 0,01191m}$$

$$v_{max2} = 0,0316 \frac{m}{s}$$

Se considera el valor de la velocidad el máximo de las dos ecuaciones:

$$v_{max} = 0,0316 \frac{m}{s}$$

Por la dificultad del cálculo del diámetro hidráulico en el interior de la placa se obtiene los valores mediante el programa *Solid Works*:

$$A = 0,000389 m^2$$

$$PM = 0,195 m$$

Dónde:

$$D_h = \frac{4A}{PM} \quad (37)$$

$$D_h = \frac{4 * 0,000389 \text{ m}^2}{0,195 \text{ m}} = 0,00795 \text{ m}$$

Reynolds de la parte líquida; de la ecuación (28) con la mayor velocidad y con valores de la Tabla 7.

Cabe recalcar que las propiedades del refrigerante son de la parte líquida.

$$Re_r = \frac{\rho_{rl} * v_{max} * D_h}{\mu_{rl}} = \frac{1284,9 \frac{kg}{m^3} * 0,0316 \frac{m}{s} * 0,00795m}{220,6 * 10^{-6} Pa * s}$$

$$Re_r = 1463,25 \quad \text{adimensional}$$

Número de Prandtl, de la ecuación (27)

$$Pr_r = \frac{\mu_{rl} * Cp_l}{k_{rl}}$$

$$Pr_r = \frac{220,6 * 10^{-6} Pa * s * 1,1665 \frac{kJ}{kg \text{ } ^\circ C}}{95,25 * 10^{-3} \frac{W}{m \text{ } ^\circ C}} = 2,7$$

*Coefficiente de transferencia de calor de la parte líquida*

Al evaluar la ecuación (31) y reemplazar los valores de la Tabla 7 se tiene:

$$\alpha_l = 0,2875 Re^{0,78} Pr^{1/3} \frac{k_{rl}}{D_h} = 0,2875 * (1463,25)^{0,78} 2,7^{1/3} \frac{\left( 95,25 * 10^{-3} \frac{W}{m \text{ } ^\circ C} \right)}{0,00795 \text{ m}}$$

$$\alpha_l = 1412,12 \frac{W}{m^2 \text{ } ^\circ C}$$

En cálculo del flujo másico por unidad de área se determina a partir de la ecuación (22)

$$q'' = \frac{q}{A} = \frac{1352 \text{ W}}{(P_{pa} + P_{pb}) * a} = \frac{1352 \text{ W}}{(0,196 + 0,273)m * 0,55m} = 5241,325 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

$P_{pb}$  = perímetro de la parte baja de la placa = 0,196 m

$P_{pa}$  = perímetro de la parte alta de la placa = 0,273 m

$a$  = ancho de la placa = 0,55 m

Número de ebullición se calcula con las ecuaciones (23) y (26)

$$G = \rho_{rl} * v = 1284,9 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 0,0316 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 40,60 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \text{s}}$$

$$Bo = \frac{q''}{G * h_{fg}} = \frac{5241,325 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}}{\left(40,60 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 * \text{s}}\right) \left(205840 \frac{\text{J}}{\text{kg}}\right)} = 0,000627$$

Número convectivo con la ecuación (24)

$$Co = \left[\frac{1-x}{x}\right]^{0,8} \left(\frac{\rho_{rv}}{\rho_{rl}}\right)^{0,5} = \left[\frac{1-0,15}{0,15}\right]^{0,8} \left(\frac{20,557}{1284,9}\right)^{0,5} = 0,5066$$

Con estos valores reemplazamos en la ecuación (30)

$$\alpha_{TP} = [2,312 C_o^{-0,3} E_{CB} + 667,3 B_o^{2,8} F_{fl} * E_{NB}] (1 - x_g)^{0,003} \alpha_{lo}$$

$$\alpha_{TP} = [2,312 (0,5066)^{-0,3} (0,512) + 667,3 (0,000627)^{2,8} (2,2) * (0,338)] (1 - 0,15)^{0,003} \left(1412,12 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{°C}}\right)$$

$$\alpha_{TP} = 2048,88 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{°C}}$$

Por tal razón el coeficiente de transferencia de calor en el interior de la placa es:

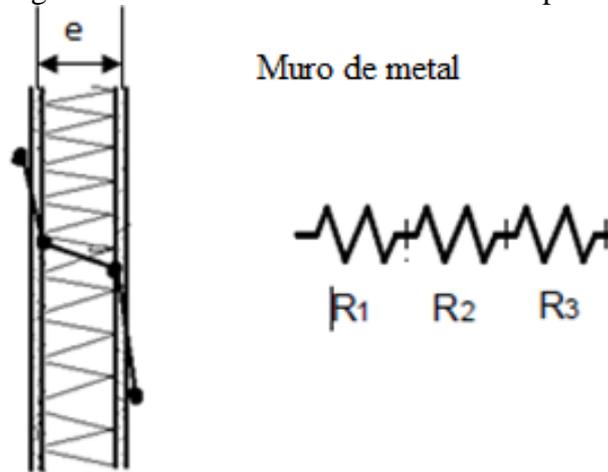
$$\alpha_{tp} = 2048,88 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{°C}}$$

**3.4.5 Cálculo térmico del evaporador.** El evaporador está sujeto a tres resistencias térmicas en serie, la cual se aprecia en la Figura 20.

Se utiliza la ecuación (32)

$$q = A_t UF(LMTD)$$

Figura 20. Resistencias térmicas en el evaporador



Fuente: Autores

**3.4.5.1** *Cálculo del coeficiente global de transferencia de calor.* En donde el coeficiente global de transferencia está dado por la ecuación (34):

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_a} + \frac{e}{K_{ac}} + \frac{1}{\alpha_{tp}}}$$

En la Tabla 9 se presentan valores para el cálculo del coeficiente global de transferencia de calor en el evaporador:

Tabla 9. Datos para determinar el coeficiente global de transferencia de calor del evaporador

| <b>Espesor de la pared [m]</b> | <b>Conductividad térmica del acero inoxidable 304L<br/><math>K_{ac}</math><br/>[<math>\frac{W}{m^{\circ}C}</math>]</b> | <b>Coeficiente convectivo del refrigerante <math>\alpha_{tp}</math><br/>[<math>\frac{W}{m^2^{\circ}C}</math>]</b> | <b>Coeficiente convectivo del agua <math>h_a</math><br/>[<math>\frac{W}{m^2^{\circ}C}</math>]</b> |
|--------------------------------|--|---|---|
| 0,0015                         | 16,297   | 2048,88   | 1015,51   |

Fuente: Autores

Resistencias térmicas del evaporador con las ecuaciones (8) y (9).

$$R_1 = \frac{1}{h_a} = \frac{1}{1015,51} = 0,000984 \frac{m^2 \cdot ^\circ C}{W}$$
$$R_2 = \frac{1}{\alpha_{tp}} = \frac{1}{2048,88} = 0,00048 \frac{m^2 \cdot ^\circ C}{W}$$
$$R_2 = \frac{e}{K_{ac}} = \frac{0,0015}{16,297} = 9,204 \times 10^{-5} \frac{m^2 \cdot ^\circ C}{W}$$

Por lo tanto se tiene:

$$U = 639,30 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$$

#### **3.4.5.2** *Determinación del área de la placa o superficie de transferencia*

Base de la placa: 0,55 mm

Longitud de la placa: 0,25 mm

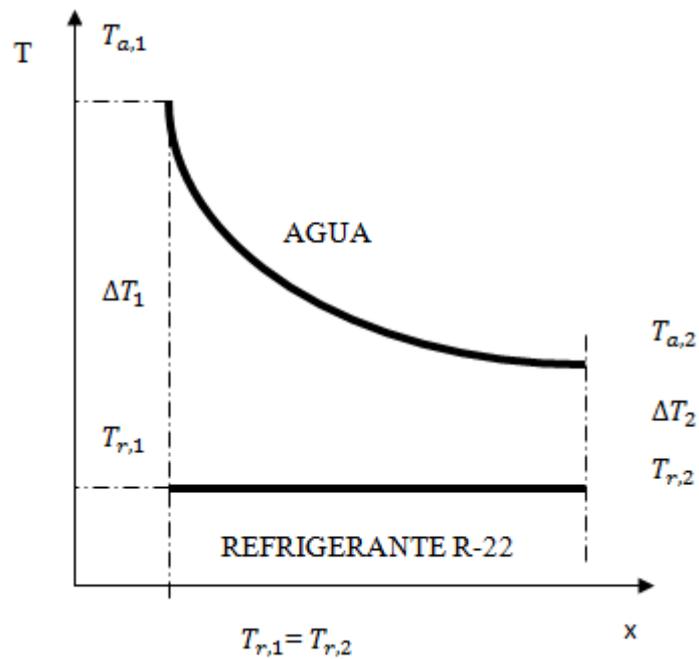
Apertura entre placas soldadas: 0,0064 m

Área de transferencia de calor

$$A = 0,55 \text{ mm} * 0,25 \text{ mm} * 2 = 0,275 m^2$$

**3.4.5.3** *Cálculo del LMTD.* Las temperaturas involucradas en el evaporador se muestran en la Figura 21.

Figura 21. Distribución de temperaturas



Fuente: Autores

Temperatura de evaporación  $R_{22} = -1^{\circ}\text{C}$  o  $30,2^{\circ}\text{F}$

Temperatura del agua a la entrada de la placa:  $T_{a1} = 17^{\circ}\text{C}$  o  $62,6^{\circ}\text{F}$

Temperatura del agua a la que se desea llegar:  $T_{a2} = 5^{\circ}\text{C}$  o  $41^{\circ}\text{F}$

$$\Delta T_1 = T_{a,1} - T_r = 17 + 1 = 18^{\circ}\text{C}$$

$$\Delta T_2 = T_{a,2} - T_r = 5 + 1 = 6^{\circ}\text{C}$$

La diferencia de temperatura media logarítmica se calcula a partir de la ecuación (35)

$$LMTD = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}}$$

Al reemplazar los valores en la ecuación se tiene:

$$LMTD = \frac{18 - 6}{\ln \frac{18}{6}}$$

$$LMTD = 10,92^{\circ}\text{C}$$

Si estos valores se sustituyen en la ecuación (32) se obtiene el calor disponible que es capaz de retirar el evaporador del agua.

$$q = A_t U(LMTD)$$

Se toma en consideración que el agua no cubre en su totalidad el área de transferencia ya que la superficie de la placa no es completamente plana; existen ondulaciones debido a su innovadora fabricación con puntos de suelda en ambas caras de la placa.

Para el cálculo se toma en cuenta un 30% del área de transferencia total; reemplazando en la ecuación se obtiene:

$$q = (0,275 * 0,3)m^2 * 639,30 \frac{W}{m^2 \text{ } ^{\circ}\text{C}} * 10,92^{\circ}\text{C}$$

$$q = 575,95W$$

### 3.5 Selección de equipos y accesorios

**3.5.1 Selección de la unidad condensadora.** Se adquiere la unidad condensadora que cuenta con una 1/2 Hp de potencia para media/ alta temperatura con refrigerante R-22.

La unidad condensadora tiene las siguientes características:

|              |             |
|--------------|-------------|
| Marca        | Tecumseh    |
| Modelo       | CAE9460TMHR |
| Refrigerante | R 22        |

|   |            |
|---|------------|
| Voltaje                                   | 110 V      |
| Temperatura                               | Media/Alta |
| Diámetro del conducto de aspiración       | 3/8 in     |
| Diámetro de conducto de salida de líquido | 1/4 in     |

(Ver Anexo C)

Figura 22. Unidad condensadora - Modelo CAE9460TMHR



Fuente: Autores

**3.5.2 Selección del evaporador.** Evaporador o placa de transferencia de calor llamada TRANTER ECONOCOIL. Es una placa de intercambiador de calor muy eficiente y versátil.

Por lo tanto se seleccionó una placa que tiene las siguientes características (ver Anexos D, E, F).

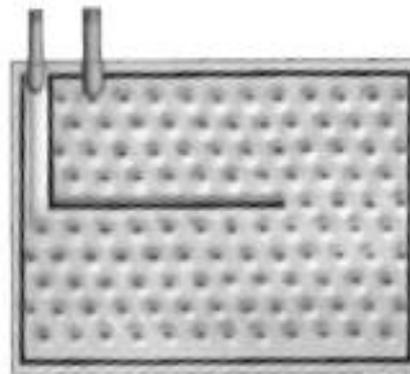
|                                    |              |
|------------------------------------|--------------|
| Nombre                             | Econocoil    |
| Marca                              | Tranter      |
| Modelo                             | 50 D         |
| Refrigerante                       | R 22         |
| Material                           | 16GA. 304LSS |
| Dimensiones                        | 12x23 in     |
| Diámetro de distribuidor entrada y | 3/4 in       |

salida

Descripción

Doble relieve

Figura 23. Panel Econocoil - Style 50D



**STYLE 50D**

Fuente: <http://www.tranter.com/Pages/literature/iomanuals.aspx>

**3.5.3 Selección de las láminas de acrílico.** Para la selección del material que se va a utilizar para la construcción de los tanques así como el panel de control se consideró en cuenta las siguientes condiciones:

La observación del proceso

La estética del trabajo

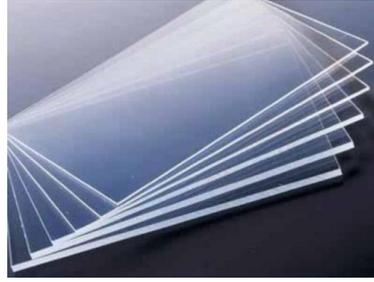
Resistencia a fugas

Material ligero

Por tal razón se hizo la selección de láminas de acrílico que tienen las siguientes características:

|               |                     |
|---------------|---------------------|
| Nombre        | Lámina lisa cristal |
| Marca         | Acrilux             |
| Largo         | 1,20 m              |
| Ancho         | 1,80 m              |
| Espesor       | 2 mm                |
| (Ver Anexo G) |                     |

Figura 24. Láminas de acrílico 2mm



Fuente:[https://www.google.com.ec/?gws\\_rd=cr&ei=fdjuUpnAIoWIkQfm34CQAw#q=Láminas+de+acrílico](https://www.google.com.ec/?gws_rd=cr&ei=fdjuUpnAIoWIkQfm34CQAw#q=Láminas+de+acrílico)

**3.5.4 Selección de bombas de agua.** La selección de las bombas de agua se realiza tomando en cuenta los siguientes parámetros:

Bombas de mínima potencia

Bajos caudales

Bombas eléctricas

Por lo cual se hace la selección de bombas para pileta que tienen las siguientes características:

|            |                   |
|------------|-------------------|
| Nombre     | Bomba Sumergible  |
| Marca      | SUNTERRA          |
| Modelo     | 114516            |
| Flujo      | $492 \frac{L}{h}$ |
| Elevación  | 122 cm            |
| Voltaje    | 120 V             |
| Corriente  | 0,19 AC           |
| Frecuencia | 60 Hz             |

Figura 25. Bomba de pileta, marca SUNTERRA



Fuente: Autores

|            |                   |
|------------|-------------------|
| Nombre     | Bomba Sumergible  |
| Marca      | FILTER JAD        |
| Modelo     | SP – 101B         |
| Flujo      | $720 \frac{L}{h}$ |
| Elevación  | 100 cm            |
| Voltaje    | AC230/115 V       |
| Potencia   | 9,5 W             |
| Frecuencia | 50/60 Hz          |

Figura 26. Bomba de pileta, marca FILTER JAD



Fuente: Autores

**3.5.5 Selección de las tuberías de agua.** Para la selección de las tuberías se ha tomado las siguientes condiciones:

Bajos caudales

Diámetro pequeño en la salida de bombas

Facilidad de instalación

Para nuestro sistema se ha seleccionado tubería de cobre flexible ya que son muy utilizados en refrigeración y cumple con todas nuestras necesidades (Ver Anexo H).

|          |         |
|----------|---------|
| Marca    | Nacobre |
| Tipo     | L       |
| Diámetro | ¼ in    |

Figura 27. Tuberías de cobre flexible



Fuente: [https://www.google.com.ec/?gws\\_rd=cr&ei=fdjuUpnAloWikQfm34CQAw#q=tuberias+de+cobre](https://www.google.com.ec/?gws_rd=cr&ei=fdjuUpnAloWikQfm34CQAw#q=tuberias+de+cobre)

**3.5.6 Selección de válvula de expansión.** Se seleccionó una válvula de expansión que tiene las siguientes características:

Válvula de expansión con abrazadera de sensor, sin orificio, cono de filtro y tuercas.

Conexiones abocardadas.

Conexión para tubo de cobre con diámetro exterior de ¼ in (Ver Anexo I).

|                                      |                 |
|--------------------------------------|-----------------|
| Marca                                | Danfoss         |
| Refrigerante                         | R- 22           |
| Tipo de válvula                      | TEX2            |
| Descripción                          | Gama N sin MOP  |
| Rango de temperatura                 | -40°C to + 10°C |
| Código                               | 068Z3209        |
| Igualación de presión                | Externa         |
| Tubo capilar                         | 1,5 m           |
| Conexión entrada x salida ( in x in) | 3/8 x ½         |

Orificio  
Código

02  
068-2015

Figura 28. Válvula de expansión TEX2 - Marca Danfoss



Fuente: Autores

**3.5.7 Selección de válvula solenoide.** La selección de la válvula solenoide está en función de los siguientes parámetros:

Diámetro de tubería:  $\frac{1}{4}$  in

Para lo cual se realiza la selección de la válvula solenoide y bobina que tiene las siguientes características:

Cuerpos de válvula sin bobina

Normalmente cerrada

(Ver Anexo J)

|                           |                  |
|---------------------------|------------------|
| Marca                     | Danfoss          |
| Tipo                      | EVR2             |
| Bobina requerida          | CA               |
| Conexión                  | $\frac{1}{4}$ in |
| Abocardar in/ mm (código) | 032F1200         |

Figura 29. Válvula solenoide - Marca Danfoss. Tipo EVR2



Fuente: Autores

*Bobina clip-on para solenoide.* Se selecciona la bobina con las siguientes características:

|                 |                       |
|-----------------|-----------------------|
| Marca           | Danfoss               |
| Tipo de válvula | EVR2- NC              |
| Tensión         | 115V                  |
| Frecuencia      | 60 Hz                 |
| Código          | 018F6260              |
| Descripción     | Con 1m de cable IP 67 |

Figura 30. Bobina clip-on para solenoide - Marca Danfoss



Fuente: Autores

**3.5.8 Selección de manómetros.** Para la selección de los manómetros tanto de alta como de baja presión depende de los siguientes parámetros:

Presión de funcionamiento del sistema de refrigeración.

Se selecciona los manómetros que tienen las siguientes características:

|                      |         |
|----------------------|---------|
| Marca                | Quality |
| Modelo               | QM-336  |
| Refrigerante         | R -22   |
| Longitud de manguera | 36 in   |

Figura 31. Manómetros - Marca Quality - Modelo QM-336



Fuente: <http://es.qequality.com/>

**3.5.9 Selección del termostato de refrigeración.** Para la selección del termostato de refrigeración se considera los siguientes parámetros:

Rangos de temperatura que se emplea en el sistema de refrigeración.

Temperatura a la que se desea llegar.

Por tal razón se selecciona un termostato de refrigeración que tiene las siguientes características:

|                      |                     |
|----------------------|---------------------|
| Marca                | Quality             |
| Modelo               | QTH-101             |
| Tipo                 | Premium/ Steel case |
| Rango de temperatura | -34°C to + 32°C     |
| Longitud de capilar  | 5 ft                |

Figura 32. Termostatos de refrigeración - Marca Quality



Fuente: <http://es.qequality.com/>

**3.5.10 Selección del filtro secador.** El filtro secador para líneas de líquido protege las instalaciones de refrigeración y de aire acondicionado contra la humedad, los ácidos y las partículas sólidas. Con la eliminación de estas fuentes de contaminación las instalaciones están mejor protegidas contra las dañinas reacciones químicas y las partículas abrasivas.

Para la selección del filtro secador se toma en cuenta los siguientes parámetros:

Diámetro de tubería: ¼ in

Tipo de refrigerante: R – 22

Por tal razón se ha seleccionado un filtro secador que tiene las siguientes características:  
(Ver Anexo K)

|                  |                 |
|------------------|-----------------|
| Marca            | Danfoss         |
| Modelo           | DML032*         |
| Tipo             | Abocardadas DML |
| Conexión         | ¼ in            |
| Numero de código | 023Z5035        |

Figura 33. Filtro secador Marca Danfoss - Marca DML032



Fuente: Autores

**3.5.11 Selección de la tubería para refrigerante.** Para la selección de la tubería para el sistema de refrigeración hay que tomar en cuenta los siguientes parámetros:

(Ver Anexo H)

Diámetro de tubería para la línea de líquido: 1/4 in

Diámetro de tubería para línea de succión: 3/8 in

De acuerdo con los parámetros se selecciona una tubería de cobre que tiene las siguientes características:

|             |          |
|-------------|----------|
| Marca       | Nacobre  |
| Tipo        | L        |
| Descripción | Flexible |

Figura 34. Tuberías de cobre flexible para refrigerante



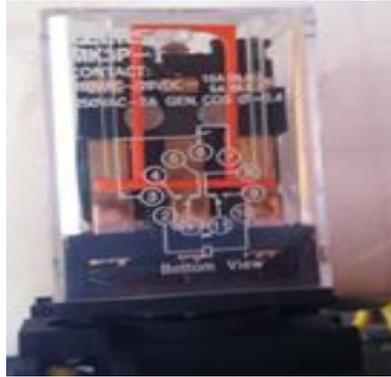
Fuente: [https://www.google.com.ec/?gws\\_rd=cr&ei=fdjuUpnAIoWIkQfm34CQAw#q=tuberias+de+cobre](https://www.google.com.ec/?gws_rd=cr&ei=fdjuUpnAIoWIkQfm34CQAw#q=tuberias+de+cobre)

### 3.5.12 Selección de los elementos y componentes del sistema eléctrico.

*Relé.* Dado que el relé es capaz de controlar un circuito de salida de mayor potencia que el de entrada puede considerarse en un amplio sentido como un amplificador eléctrico. El relé seleccionado cumple con nuestras condiciones y posee las siguientes características:

|             |                |
|-------------|----------------|
| Marca       | Camsco         |
| Tipo        | MK3P-I         |
| Descripción | 12 PINES       |
| Voltaje     | 250 AC/ 28 VDC |
| Corriente   | 7 A            |

Figura 35. Relé - Marca Camsco. Tipo MK3P-I



Fuente: Autores

*Selección del PLC.* Para la selección del PLC para el control del sistema está en función de los siguientes parámetros:

Número de entradas

Número de salidas

De acuerdo con los parámetros se selecciona un PLC que tiene las siguientes características:

|             |                                 |
|-------------|---------------------------------|
| Marca       | Schneider electric- Zelio logic |
| Tipo        | SR3B261FU                       |
| Descripción | 12 PINES                        |
| Voltaje     | 100-240V                        |
| Peso        | 0,4 kg                          |

Figura 36. PLC - Marca Schneider electric- Zelio logic



Fuente: Autores

*Selección de los termómetros.* Para la selección de los termómetros se debe tomar en cuenta el rango de temperatura que se desea y la precisión; mientras más sensibles sean mejor.

Se selecciona un termómetro digital que tiene las siguientes características:

|                      |                 |
|----------------------|-----------------|
| Marca                | Quality         |
| Tipo                 | QTR-47D         |
| Descripción          | Panel empotrado |
| Rango de temperatura | -50°C to + 70°C |
| Detalles             | 48 in de sensor |

Figura 37. Termómetro digital - Quality. QTR- 47D



Fuente: Autores

*Selección de los indicadores luminosos.* Los receptores que está dispuesto el panel de control tienen las siguientes características:

|          |              |
|----------|--------------|
| Marca    | Sassin       |
| Tipo     | AD22-22D-B   |
| Voltaje  | 120/220 V AC |
| Detalles | 60 Hz        |

Figura 38. Indicadores luminosos - Sassin. Tipo AD22-22D-B



Fuente: Autores

*Selección de los pulsadores.* Los pulsadores que se seleccionaron tienen las siguientes características:

|           |              |
|-----------|--------------|
| Marca     | Sassin       |
| Tipo      | 3SA5-BW3462  |
| Voltaje   | 120/220 V AC |
| Corriente | 10 A         |

Figura 39. Pulsadores. Marca Sassin. 3SA5-BW3462



Fuente: Autores

## CAPÍTULO IV

### 4. CONSTRUCCIÓN, MONTAJE Y AUTOMATIZACIÓN DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR

#### 4.1 Generalidades

Una vez realizado el proceso de diseño del intercambiador de calor tipo Baudelot, la selección de la unidad condensadora, obtención de las bombas de agua, obtención del evaporador (placa de transferencia), accesorios y otros equipos se procede a la construcción del intercambiador con la ayuda de planos de cada uno de los elementos del equipo.

#### 4.2 Construcción del intercambiador de calor

**4.2.1 Construcción del evaporador.** Cabe recordar que el evaporador en nuestro caso la placa o superficie de transferencia se hizo su adquisición completamente construida pero a continuación se detalla el proceso de fabricación de este tipo de placas.

La placa Econocoil está fabricada de dos láminas de metal utilizando una máquina de soldadura totalmente computarizada que utiliza soldadura eléctrica por puntos de resistencia. La placa entonces es hidráulicamente inflada formando una variedad de patrones de flujo.

Cada placa Econocoil está diseñada y construida para que satisfaga las necesidades de cada una de las aplicaciones, la misma podemos observar en la Figura 40.

Figura 40. Evaporador Econocoil



Fuente: Platecoil Data Manual.pdf. Página 99

**4.2.2 Construcción de la estructura principal.** Para la construcción de la estructura principal en la cual va ir montada todos los equipos del banco de pruebas, instrumentos de medición e accesorios para su construcción se requiere los siguientes pasos:

- Adquisición del material (perfil L in 2 mm)
- Corte a medida de los elementos
- Ubicación y unión de los elementos
- Observación y verificación de las medidas en los planos
- Nivelación de todos los elementos
- Soldadura de los elementos
- Soldadura de los soportes laterales para los tanques (capacidad 10 litros)
- Verificación de las perpendicularidades y paralelismo de todos los elementos

Figura 41. Estructura principal



Fuente: Autores

**4.2.3 Construcción del bastidor - soporte.** Hay que tomar en cuenta que este bastidor-soporte sirve para el apoyo de la placa de transferencia y su construcción se basa de acuerdo a los siguientes pasos:

- Corte a medida de los elementos (perfil L 1in x 2 mm)
- Unión de los elementos
- Verificación de las medidas en los planos
- Nivelación y ubicación de los elementos
- Soldadura de los elementos
- Verificación de perpendicularidades

**4.2.4 Construcción del tanque de almacenamiento.** Para la construcción del tanque se procede a realizar los siguientes pasos:

- Adquisición del material para el tanque (acrílico)
- Corte a medida (a láser) del acrílico de 2 mm de espesor de cada una de las caras de tanque (24 x 24 cm)
- Lijado de los filos de las caras
- Nivelación de las caras
- Perforación de los agujeros para las tuberías e instrumentos de medición
- Pegado 1 de cada una de las caras para formar los tanques con adhesivo sellador Polimax
- Pegado 2 con pegamento industrial de alta eficiencia en las periferias exteriores

Figura 42. Tanque de acrílico



Fuente: Autores

**4.2.5 Construcción del tanque de recirculación.** Prácticamente es un forrado del bastidor – soporte ya que se cubre con acrílico sus caras. Para su construcción se realizan los siguientes pasos:

- Corte a medida (a laser) del acrílico de 3 mm de espesor de las caras del tanque
- Cara frontal y posterior: 63x 64,5 cm
- Caras laterales: 15 x 34,5 cm
- Lijado de los filos para su pegado
- Ubicación de las caras en el bastidor soporte
- Perforación de los agujeros para las tuberías e instrumentos
- Pegado con silicón en el bastidor – soporte
- Verificación del pegado de todas las caras del tanque

Figura 43. Tanque central o de recirculación



Fuente: Autores

**4.2.6 Construcción del distribuidor.** Para la construcción del distribuidor o tolva para un baño adecuado de agua a la placa se realizan los siguientes pasos:

- Corte a medida (a laser) del acrílico de las caras del distribuidor
- Lijado de los filos
- Perforación de los agujeros para las tuberías
- Pegado con silicón todas las caras del distribuidor
- Perforación de la cara inferior del distribuidor que permita el baño de agua hacia la placa

Figura 44. Distribuidor o tolva



Fuente: Autores

**4.2.7 Construcción de la tapa.** Para la construcción de la tapa del intercambiador de calor tipo Baudelot se realizan los siguientes pasos:

- Corte a medida del acrílico de 3 mm de espesor
- Lijado de los filos del elemento
- Perforación de los agujeros para los pernos de sujeción

Figura 45. Tapa del intercambiador de calor



Fuente: Autores

**4.2.8 Construcción del panel de control.** Para la construcción del panel de control en donde se ubicará el PLC, botoneras, luces se realizan los siguientes pasos:

- Corte a medida del acrílico de 3 mm de espesor
- Lijado de los filos del elemento
- Perforación de los agujeros para las botoneras y PLC
- Pegado con silicón en la estructura principal

Figura 46. Panel de control y botoneras



Fuente: Autores

### **4.3 Montaje e instalación de los elementos del equipo**

Para el montaje e instalación de los diferentes equipos y elementos del intercambiador de calor se realizaron las siguientes operaciones:

- Montaje del evaporador en el bastidor- soporte
- Montaje del bastidor soporte en la estructura principal
- Montaje de los tanques de distribución, recirculación y almacenamiento
- Montaje del distribuidor en el tanque de recirculación
- Montaje de tuberías de agua
- Montaje de bombas
- Montaje del sistema de refrigeración

**4.3.1** *Montaje del evaporador en el bastidor –soporte.* Para el montaje del evaporador se procedió de la siguiente manera:

- Colocación del evaporador por las guías del bastidor – soporte
- Alineación y sujeción del evaporador
- Verificación de la nivelación
- Ajuste definitivo del evaporador o placa de transferencia en el bastidor- soporte

**4.3.2** *Montaje del bastidor - soporte en la estructura principal.* Para el montaje del bastidor- soporte se observa los siguientes pasos:

- Colocación del bastidor-soporte en la estructura principal
- Nivelación del bastidor-soporte en la estructura principal

Figura 47. Bastidor – soporte con cubierta de acrílico



Fuente: Autores

**4.3.3** *Montaje del distribuidor en el tanque de recirculación.* Para el montaje del distribuidor en el tanque de recirculación se realizan los siguientes pasos:

- Ubicación del distribuidor por las guías del bastidor-soporte
- Alineación y sujeción con la placa
- Nivelación del distribuidor en relación a la placa

Figura 48. Montaje del distribuidor de acrílico



Fuente: Autores

**4.3.4** *Montaje de los tanques de almacenamiento y recirculación.* El montaje de los tanques se procede de la siguiente manera:

- Ubicación de los tanques de distribución y almacenamiento en los soportes de la estructura principal
- Nivelación de los tanques con el tanque de recirculación para la instalación de tuberías

**4.3.5 Montaje de tuberías de agua.** Para el montaje de las tuberías en los tanques se realizaron los siguientes pasos:

- Corte a medida de las tuberías
- Alineación de las tuberías en los tanques
- Ubicación de las conexiones de tuberías en el distribuidor
- Nivelación de las tuberías para evitar caídas de presión
- Sujeción de las tuberías en los tanques

**4.3.6 Montaje de bombas.** Para el montaje de bomba en los tanques se procede de la siguiente manera:

- Ubicación de las bombas en todos los tanques
- Nivelación de las bombas con las tuberías
- Sujeción de las bombas con las tuberías con diferentes conexiones
- Ajuste definitivo de las bombas

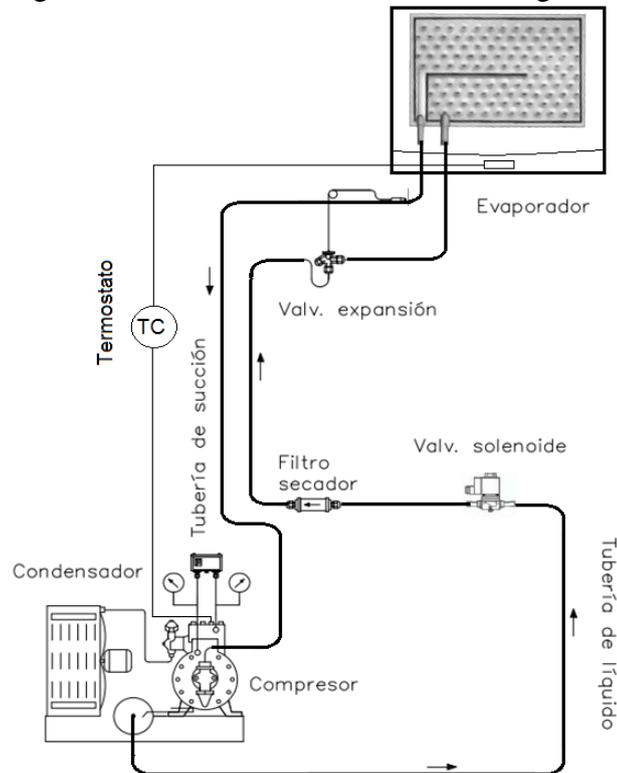
Figura 49. Montaje de bombas en el tanque de recirculación



Fuente: Autores

**4.3.7 Montaje del sistema de refrigeración.** En la Figura 50 se puede apreciar la disposición de todos los diferentes componentes y elementos del sistema de refrigeración.

Figura 50. Elementos del sistema de refrigeración



Fuente: Autores

Para el montaje de los elementos del sistema de refrigeración se realizaron los siguientes pasos:

- Planificación y ensamble de los elementos y componentes del sistema de refrigeración e instalación de tuberías
- Instalación de los equipos y accesorios
- Pruebas de fugas
- Proceso de vacío
- Carga del refrigerante en el sistema

**4.3.7.1** *Planificación y ensamble de los elementos y componentes del sistema de refrigeración e instalación de tuberías.* Hay que tener en cuenta la ubicación y la facilidad así como la comodidad de manipulación de los componentes del sistema, también el orden de ensamblaje de acuerdo al esquema de instalación.

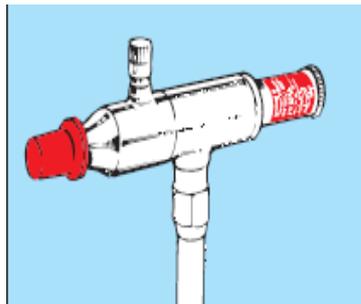
Los componentes se han instalados de una manera funcional (suficiente entrada de aire al compresor, condensador) con una recomendación en el trazado de tuberías lo cual sea lo más corto posible.

**4.3.7.2** *Instalación de los equipos y accesorios.* Todos los equipos del sistema como la unidad condensadora, filtros, tuberías, válvulas deben estar herméticamente cerrados hasta la instalación de los mismos en el sistema de refrigeración.

Para evitar la humedad ya que la humedad penetra a través del aire atmosférico y provoca algunos efectos no deseables como:

- Separación de agua y formación de hielo (bloqueo) en la válvula de expansión
- Formación de ácidos
- Envejecimiento y descomposición del aceite
- Corrosión
- Precipitación de cobre (cobre disuelto de los tubos se sedimenta en las partes lisas de acero del compresor)

Figura 51. Hermeticidad de los accesorios



Fuente: [www.danfoss.com /notas del instalador](http://www.danfoss.com/ notas del instalador)

*Instalación de la unidad condensadora.* La unidad condensadora debe ser ubicada en la estructura principal de tal manera que el aire pueda circular libremente al exterior y debe colocarse para un adecuado acceso y manipulación libre de todas las partes de la unidad; de preferencia lejos o a una distancia prudencial de cualquier pared.

Además debe tener espacio suficiente para su respectivo mantenimiento e inspección.  
(DANFOSS, 2012)

Figura 52. Montaje de la unidad condensadora



Fuente: Autores

*Instalación del evaporador.* Para la instalación del evaporador en nuestro caso la placa Econocoil se realizaron los siguientes pasos:

Para la conexión del evaporador y la unidad condensadora se realizó una especie de reducción ya que el distribuidor tanto de entrada como de salida de refrigerante del evaporador tienen como diámetro  $\frac{3}{4}$  de in y se lo reduce a  $\frac{1}{4}$  de in con acoples y utilizando soldadura TIG para evitar fugas en un futuro.

Para menores recorridos de tubería se debe tratar de instalar a distancias mínimas con la unidad condensadora.

Como los tubos del distribuidor del refrigerante de la placa son muy largos necesariamente se debe aislar para su funcionamiento.

*Instalación de la válvula de expansión.* Se colocará el orificio en la válvula de expansión para nuestro caso para refrigerante R-22 seleccionado anteriormente.

Se instala la válvula de expansión termostática en el distribuidor del evaporador. Se pueden colocar en cualquier posición y deben estar ubicadas lo más cerca posible del evaporador.

Para mayor rendimiento del sistema esta válvula de expansión debe ser montada directamente en el cuerpo del distribuidor del evaporador para que no tenga problemas de distribución de refrigerante.

*Ubicación del bulbo.* Para la ubicación del bulbo hay que tomar en cuenta lo siguiente:

Se coloca en un tramo horizontal de la línea de succión tan cerca del cabezal de succión como sea posible.

El bulbo deberá ser adherido con abrazadera metálica en la línea de succión y cubierta con aislante impermeable.

No debería ser montado en uniones, conexiones, acoplamientos que no permitan el 100% del contacto con la línea de succión.

No se recomienda colocar el bulbo en la parte inferior de la línea de succión ya que este detectará señales falsas por la presencia de aceite en el fondo de la tubería.

La mejor posición de montaje del bulbo es en una tubería horizontal en una posición que corresponde a las agujas del reloj marcando entre la una y las cuatro.

La ubicación depende del diámetro exterior de la tubería. (DANFOSS, 2012)

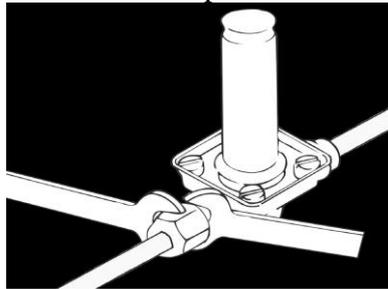
*Instalación de la válvula solenoide.* Todas las válvulas de solenoide tipo EVR/EVRA solamente funcionan cuando se instalan correctamente en la dirección de flujo. Esa es la dirección indicada por la flecha.

Normalmente cuando se monta una válvula de solenoide delante de una válvula de expansión termostática se debe colocar cerca de ésta.

De esta manera se evitan golpes de ariete cuando la válvula de solenoide se abre.

Se recomienda utilizar siempre fuerzas contrarias en el apriete final de la válvula de solenoide a las tuberías, es decir dos llaves en el mismo lado de la válvula.

Figura 53. Método adecuado de apriete en la válvula de expansión



Fuente: [www.danfoss.com /notas del instalador](http://www.danfoss.com/ notas del instalador)

*La bobina.* Cuando se monta la bobina se presiona la misma con la mano sobre el tubo de la armadura hasta que se escuche un clic. Eso significa que la bobina ha sido colocada correctamente.

Nota: Recuerde colocar una junta tórica entre el cuerpo de la válvula y la bobina. (DANFOSS, 2012)

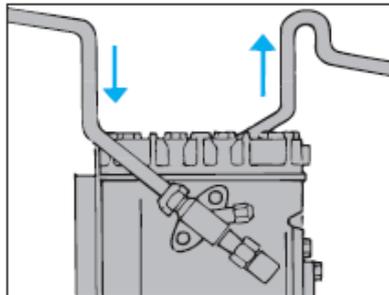
*Instalación de la tubería.* La clave del buen funcionamiento y de una vida duradera de la instalación de refrigeración es un montaje de tuberías bien realizado.

Siempre que sea posible el trazado de la tubería tiene que ser horizontal o vertical. Las excepciones son:

- Las líneas de aspiración a las que se pueden dar una ligera inclinación descendente hacia el compresor.
- Las líneas de descarga que pueden tener una ligera inclinación descendente alejándose del compresor.
- Las abrazaderas, clips, etc. deben colocarse a intervalos convenientes dependiendo del diámetro del tubo y del peso que ejercen los componentes montados en el trazado de la tubería.

Por lo demás, las líneas de aspiración deben instalarse teniendo en cuenta el retorno de aceite al compresor.

Figura 54. Líneas de aspiración y descarga del compresor



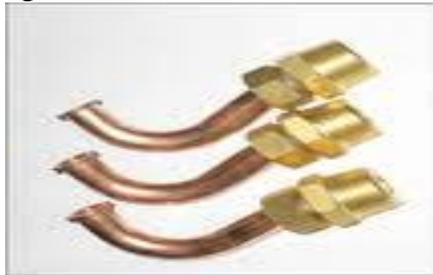
Fuente: [www.danfoss.com /notas del instalador](http://www.danfoss.com/ notas del instalador)

- Las tuberías deben ser cortadas con un corta-tubos o serradas, nunca usar medios lubricantes o refrigerantes.
- Eliminar la rebaba interior y exterior con una herramienta especial.
- Evitar la viruta de cobre en el interior de la tubería. Hacer uso de herramientas de calibre para conseguir el diámetro y redondez adecuados.
- Soplar con una potente corriente de aire comprimido seco o de nitrógeno seco a través de la tubería.
- Nunca usar aire comprimido corriente a causa de su gran contenido de humedad. Nunca soplar con la boca a través del tubo. (DANFOSS, 2012)

*Conexiones abocardadas.* Para realizar conexiones abocardadas se debe tomar en cuenta lo siguiente:

- Emplear solamente tubos de cobre aprobados para refrigeración.
- Cortar los tubos en ángulo recto.
- Eliminar todas las rebabas interiores y exteriores.
- Hacer el ensanche abocardado a la medida adecuada, ni demasiado grande ni demasiado pequeño.
- No apretar demasiado el ensanche abocardado para que no endurezca.
- El apriete final se efectúa al acabar el montaje de la instalación.

Figura 55. Conexiones abocardadas



Fuente: [www.danfoss.com /notas del instalador](http://www.danfoss.com/ notas del instalador)

*Soldadura en tuberías de cobre.* Para soldar tuberías de cobre se utilizará plata y se tomará en cuenta lo siguiente:

- La soldadura con plata se compone de un 30% de plata, cobre, zinc y estaño. La temperatura de fusión va desde aproximadamente 655 °C hasta cerca de 755 °C.
- Solamente se consigue una buena unión en superficies metálicas limpias y no oxidadas.
- Limpiar los extremos de las tuberías con un cepillo especial y aplicar al momento la materia fundente inmediatamente antes de soldar.
- La materia fundente para soldadura con plata se disuelve con alcohol, nunca con agua.

- Untar una capa fina de materia fundente alrededor del punto de soldadura después de haber unido las partes a soldar.
- La soldadura con plata se puede utilizar para soldar diferentes materiales, como latón/cobre y hierro/cobre. (DANFOSS, 2012)

**4.3.7.3 Pruebas de fugas.** Uno de los métodos más utilizados para detectar fugas en las instalaciones del sistema es el siguiente:

- El sistema debe permanecer presurizado con nitrógeno o gas refrigerante.
- Aplicar una solución jabonosa en todas las conexiones, acoples de tuberías o en donde se sospeche que existen fugas.
- Se verifica fugas cuando hay la formación de burbujas.
- Todos los elementos de refrigeración deben estar herméticos al momento de la instalación para evitar la humedad ya que si existen fugas habrá pérdida de refrigerante.

**4.3.7.4 Proceso de vacío.** El método que se utilizó es el más común para el proceso de vacío en todo el sistema.

#### *Evacuación con vacío profundo*

Es el medio más seguro de proporcionar un sistema libre de humedad, aire y agua, que toma ligeramente más tiempo que el otro método. El propósito de la evacuación es reducir la presión o vacío lo suficiente para hervir o vaporizar el agua y luego bombearla fuera del sistema.

La bomba de vacío puede descender rápidamente la presión del sistema hasta cerca de 0,05 mbar.

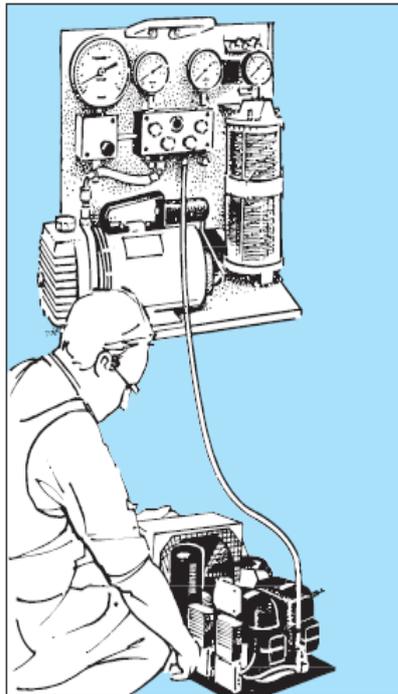
El vacío correcto se alcanza midiendo por medio de un vacuómetro y no por el tiempo que se deje la bomba trabajando en el sistema.

En caso de detectar fugas:

Localice aproximadamente la fuga cerrando la instalación por secciones. Apretar de nuevo conexiones abocardadas y/o de bridas. Efectuar de nuevo el vaciado.

Efectuar de nuevo la comprobación del vacío hasta que éste se mantenga o continuar al punto siguiente.

Figura 56. Proceso de vacío



Fuente: [www.danfoss.com](http://www.danfoss.com) /notas del instalador

**4.3.7.5 Carga del refrigerante en el sistema.** Tras finalizar la operación de vaciado se procede a la carga del refrigerante.

Conecte el cilindro del refrigerante en nuestro caso R-22. Purgue la manguera de servicio del manifold que conecta al circuito. Abra la válvula de servicio que da acceso al cilindro del refrigerante y después abra el registro de alta presión del manifold que conecta al lado de alta del compresor.

Si el sistema dispone de una válvula de carga, el refrigerante se puede aplicar en forma de líquido a la línea de líquido. En caso contrario, el refrigerante deberá aplicarse en forma de vapor a la válvula de aspiración del compresor, estando éste en marcha.

En este caso, será necesario controlar continuamente que las presiones de aspiración y condensación sean normales, y que el recalentamiento de la válvula de expansión termostática no sea demasiado pequeño.

El ajuste y la prueba definitiva del equipo de seguridad deben ser llevados a cabo con todos sus elementos mecánicos y eléctricos montados en la instalación, y está en funcionamiento.

*Ajuste del presostato de alta presión.* Aumentar la presión de condensación hasta el máximo permisible y ajustar el presostato de alta con un manómetro.

*Ajuste del presostato de baja presión.* Reducir la presión de aspiración hasta el nivel mínimo admisible y utilizar un manómetro para ajustar el regulador de baja. (DANFOSS, 2012)

#### **4.4 Control automático**

**4.4.1 Introducción.** El control automático en la industria tiene sus comienzos hace 300 años atrás en máquinas e instrumentos los cuales eran muy sencillos y de un funcionamiento muy simple.

Para poner en marcha una máquina se le puede realizar tanto manual en la que el operador a través de pulsadores, interruptores va dando órdenes a diferentes operaciones, así como también en forma automática, la cual hace funcionar a la máquina o equipo sin intervención de un operador con ayuda de un controlador lógico programable.

En algunos casos se puede tener la combinación de ambos al cual le llamamos semiautomático tanto con ayuda de un operador como sin él.

En muchas universidades del Ecuador las cátedras de control automático son dictadas generalmente por la Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, mientras que los dispositivos para realizar el control automático de las distintas máquinas y equipos eran diseñados por Ingeniería Mecánica, las que son:

- Levas
- Dispositivos neumáticos e hidráulicos
- Dispositivos mecánicos
- Cilindros
- Finales de carrera

**4.4.2 Control Automático.** El Control Automático forma parte de la Ingeniería de Control, el cual se centra en el control de los sistemas dinámicos y se relaciona con la Ingeniería Eléctrica.

El control aplicado en la industria se conoce con el nombre de control de procesos, el cual se centra en el control de distintas variables como:

- Presión
- Temperatura
- Caudal

La Ingeniería de Control Automático es muy amplia, variada y cualquier ingeniería puede utilizar los mismos principios y técnicas que se utiliza por lo que se aplica en campos como la biología, finanzas e incluso el comportamiento humano.

**4.4.2.1 Ventajas del control automático industrial.** Algunas ventajas que tiene el uso del control automático se detallan a continuación:

- Puede controlar sistemas inestables

- Puede compensar perturbaciones
- Aumento en cantidad o número de productos
- Mejoramiento de la calidad de producto
- Economía en uso de materiales
- Economía de energía y/o potencia
- Instalaciones eléctricas no complicadas con relación a la de contactores
- Posibilidad de introducir modificaciones sin cambiar el cableado ni añadir aparatos nuevos
- Reducción de inversión de mano de obra en operaciones no especializadas
- Posibilidad de gobernar varias máquinas con un mismo autómeta

Todas estas ventajas ayudan a aumentar la productividad.

**4.4.2.2** *Desventajas del control automático industrial.* Estas desventajas no son un problema importante que no se pueda resolver ya que por si solo se compensará en aumentar la producción y mejorar la calidad final del producto pero si debemos aclarar que la inversión inicial de un control automático es elevada.

**4.4.2.3** *Factores de control.* Para la implementación de un control debemos tener en cuenta cuatro factores importantes:

- Cantidad
- Tiempo
- Costo
- Calidad

**4.4.2.4** *Conocimientos básicos para la automatización.* Al necesitar de los beneficios de la automatización, se requiere principios básicos para ello, es así que la automatización maneja diferentes conocimientos que solo un personal indicado y adecuado lo conoce.

El diseñador necesita conocimientos que a continuación mencionamos:

- Conocimiento del proceso y sus necesidades
- Lógica
- Teoría de control
- Programación y sus lenguajes
- Electrónica
- Sistemas digitales
- Tecnología eléctrica
- Tecnología mecánica, neumática e hidráulica
- Tecnología para automatizar
- Comunicaciones digitales

Los sistemas de control se clasifican en sistemas de lazo cerrado y de lazo abierto. La distinción la determina la acción de control que es la que activa al sistema para producir la salida.

En un sistema de lazo abierto la acción de control es independiente de la salida.

Ejemplo:

- Un tostador automático el cual está regulado con el tiempo de calentado

- En un sistema de lazo cerrado la acción de control es en cierto modo dependiente de la salida

Ejemplo:

- El mecanismo de un piloto automático de un avión

#### 4.5 Controladores lógicos programables

Como su mismo nombre lo indica, se ha diseñado para programar y controlar procesos secuenciales en tiempo real y es el último elemento de un lazo de control.

Todos los controladores automáticos usan las mismas respuestas generales, a pesar de que los mecanismos internos y las definiciones dadas para estas respuestas pueden ser ligeramente diferentes con respecto a su fabricación.

**4.5.1 Relé inteligente Zelio.** El objetivo principal de utilizar un módulo lógico programable es facilitar el cableado eléctrico de soluciones inteligentes y su instalación es muy sencilla. La flexibilidad y el rendimiento del módulo lógico le permitirán ahorrar mucho tiempo y dinero.

Figura 57. Módulo lógico programable Zelio



Fuente: [www.google.com/imagenes/modulo Zelio](http://www.google.com/imagenes/modulo%20Zelio)

Para la programación de los circuitos automatizados en cada uno de estos equipos se debe utilizar programas mediante un ordenador y conexión mediante cable de datos. En

nuestro caso para programar los relés inteligentes Zelio se requiere el programa ZELIO SOFT 2 (V.4.3).

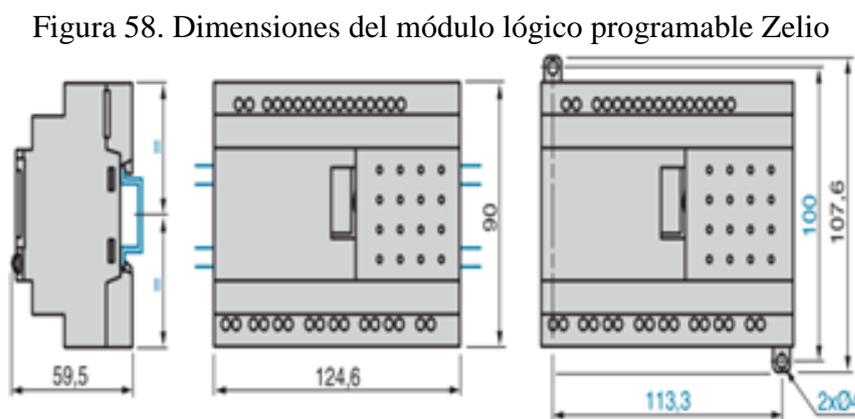
**4.5.2 Aplicaciones de los relés inteligentes Zelio.** El relé inteligente Zelio tiene un sin número de utilidades orientadas hacia la industria para la automatización de máquinas sencillas y hasta la posibilidad de la utilización en hogares.

Este relé está diseñado para pequeños sistemas de automatismos. Se usa tanto en los sectores de la industria como en el de servicios.

*En la industria:*

- La automatización de máquinas de terminaciones, producción, ensamblaje o embalaje
- La automatización de equipos auxiliares en máquinas del sector textil, plásticos y sector de proceso de materiales

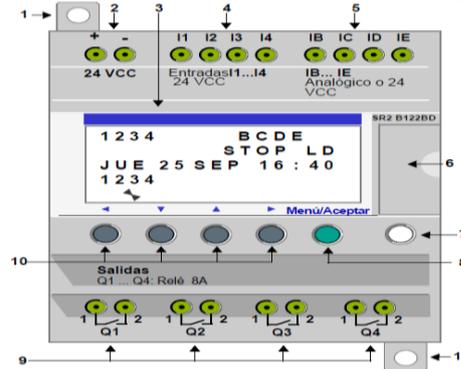
**4.5.3 Dimensiones físicas del relé Zelio.** Las dimensiones que tiene nuestro relé escogido para este trabajo son las siguientes:



Fuente: Zelio Logic -Relés programables- catálogos 09-10

**4.5.4 Presentación del panel frontal del módulo lógico.** La imagen que se muestra a continuación muestra los elementos físicos que presenta nuestro relé.

Figura 59. Panel frontal del módulo lógico



Fuente: Zelio Logic -Relés programables- catálogos 09-10

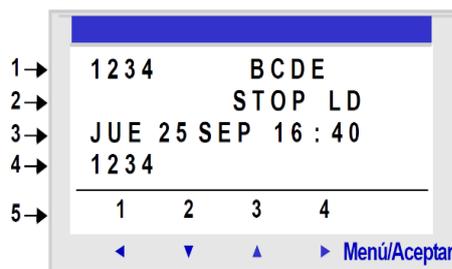
Tabla 10. Detalles Zelio Logic

| Indicación | Elemento   |
|------------|--|
| 1          | Pestañas de fijación retráctiles   |
| 2          | Bloque terminal de alimentación  |
| 3          | Pantalla LCD, 4 líneas, 18 caracteres  |
| 4          | Bloque terminal de entradas DIG  |
| 5          | 5 Bloque terminal de entradas analógicas<br>0-10 voltios utilizables en entradas DIG según el modelo |
| 6          | Alojamiento de la memoria de copia de seguridad o cable conexión para PC                             |
| 7          | Tecla Mayúscula (blanca)   |
| 8          | Tecla Menú/Aceptar (verde) de selección y validación   |
| 9          | Bloque terminal de salida para relé  |
| 10         | Teclas de navegación (grises) o, después de la configuración, botones pulsadores Z                   |

Fuente: Zelio Logic -Relés programables- catálogos 09-10

*Presentación de la pantalla LCD del relé.* En la Figura 61 se muestra un ejemplo de los elementos de la pantalla LCD mientras se visualiza la pantalla ENTRADAS Y SALIDAS.

Figura 60. Pantalla LCD del relé



Fuente: Zelio Logic -Relés programables- catálogos 09-10

Tabla 11. Características de la pantalla LCD del relé

| Indicación | Elemento  |
|------------|---|
| 1          | Visualización del estado de las entradas (B...E representan las entradas analógicas, también se pueden utilizar en digital) |
| 2          | Visualización del modo de funcionamiento (RUN/STOP) y del modo de programación (BDF/LD)                                     |
| 3          | Visualización de la fecha (día y hora para los productos con reloj)   |
| 4          | Visualización del estado de las salidas   |
| 5          | Menús contextuales / botones pulsadores / iconos indicativos del modo de funcionamiento                                     |

Fuente: Zelio Logic -Relés programables- catálogos 09-10

*Consideraciones que debe tener el relé Zelio*

- Alimentación 110 V AC
- Entradas digitales
- Salidas digitales
- Pantalla LCD del teclado
- Reloj
- Programación LADDER/FBD

**4.5.5 Consideraciones de funcionamiento del Zelio.** El Zelio debe tener las siguientes consideraciones para su buen funcionamiento, protegiéndole de condiciones que lo puedan dañar.

Tabla 12. Condiciones de funcionamiento del Zelio

|  |  |
|--|--|
| Temperatura de funcionamiento                      | -20.....+55°C  |
| Temperatura de almacenamiento                      | -40.....+70°C  |
| Humedad relativa                                   | Nivel RH1, del 30....90%(no condensante)   |
| Grado de contaminación                             | 2(IEC/EN 61131-2)  |
| Grado de protección                                | IP 20 (IEC 60529)  |
| Altitud  | Utilización: 0...2000 m<br>Transporte: 0....3048 m   |
| Resistencia a las vibraciones (IEC 60068-2-6)      | En montaje en carril y en panel<br>5....9 Hz, amplitud: 3.5mm<br>9....150 Hz, aceleración: 1 g<br>10 ciclos/eje, 1 octava/minuto |
| Resistencia mecánica a los golpes (IEC 60068-2-27) | 147 m/sec <sup>2</sup> (15 g)<br>Duración 11msec<br>3 golpes por eje.  |
| Material de la caja                                | Auto extingible  |
| Norma de aplicación/condiciones de funcionamiento. | IEC/EN 61131-2   |

Fuente: Zelio Logic -Relés programables- catálogos 09-10

**4.5.6 Lenguajes de programación.** La información entregada por el fabricante que el Relé Zelio Soft 2 puede captar y ejecutar dos tipos de programación.

*FBD.* Este tipo de programación se basa en bloques de funciones.

*LADDER.* Este tipo de programación se basa en un diagrama de contactos.

**4.5.7 Características que tiene el software Zelio Soft 2.** El programa entregado por el fabricante consta de un CD de instalación del Software para la programación del Relé Zelio el cual consta de las siguientes características.

- Programación real con FBD (Diagrama de bloques de funciones) o lenguaje de contacto (LADDER)
- Detección de cualquier error de programación con su función de prueba de coherencia
- Modos de simulación y monitoreo: prueban el programa en tiempo real, con o sin relé inteligente conectado a la PC
- Ventanas de supervisión: permite ver los estados de las E/S del relé inteligente en su entorno de aplicación
- Descarga y carga de programas
- Edición de archivos personalizados
- Compilación automática de programas
- Ayuda en línea

#### **4.6 Diseño del circuito eléctrico CPN conexión del Zelio**

*Inicio de aplicación.* En el instante que el Software se ejecuta presenta la Figura 61.

Figura 61. Ventana del software Zelio Soft 2

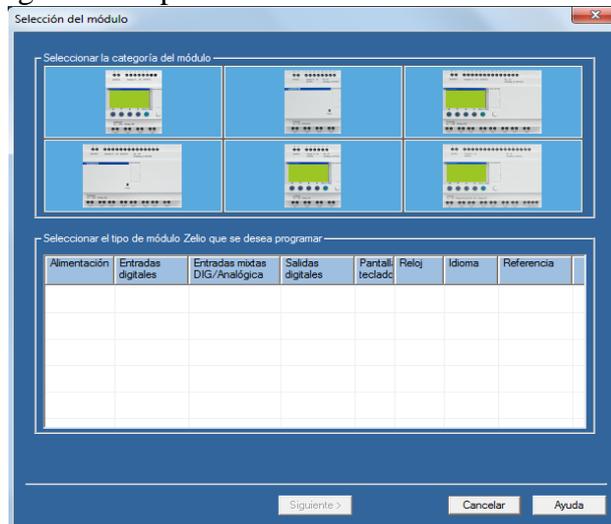


Fuente: software Zelio Soft 2

Para este caso escogeremos crear un nuevo programa o seleccionar nuevo en el menú Archivo si ya se ha iniciado el software.

La ventana que se abrirá presentará los diferentes tipos de relés que tiene el fabricante; señalaremos el nuestro.

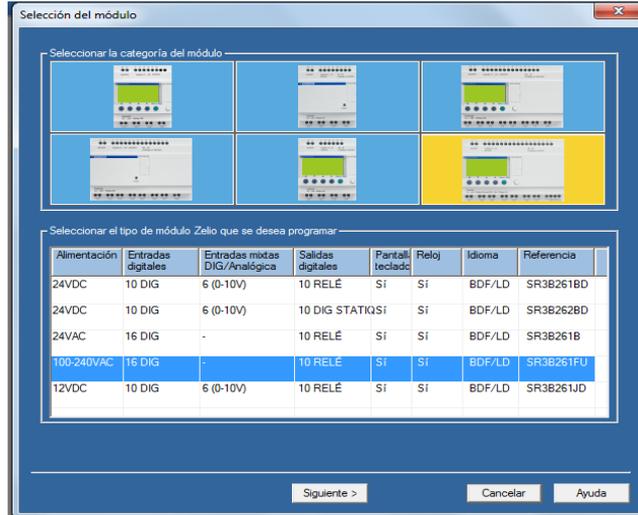
Figura 62. Tipos de relés del software Zelio Soft 2



Fuente: Software Zelio Soft 2

Nuestro módulo utilizado es el SR3B261FU con una alimentación de 110 V por lo que escogeremos el módulo que nos corresponde.

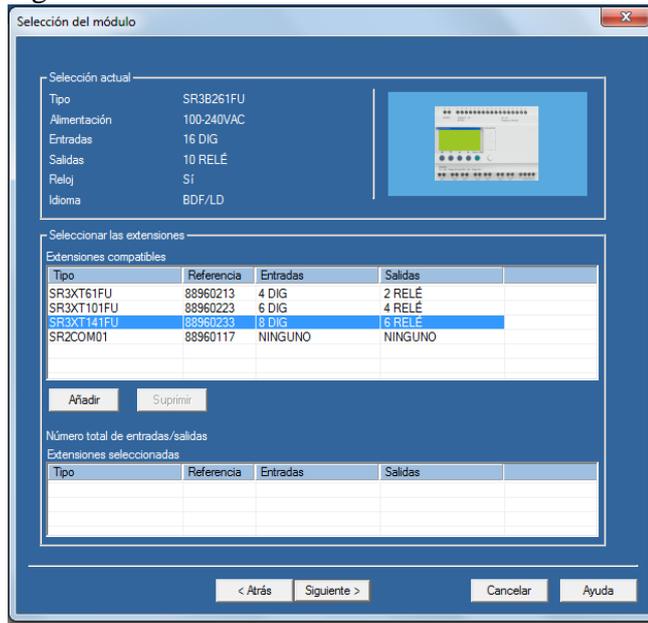
Figura 63. Selección del módulo SR3B261FU en el software Zelio Soft 2



Fuente: Software Zelio Soft 2

A continuación hacer clic en lo siguiente.

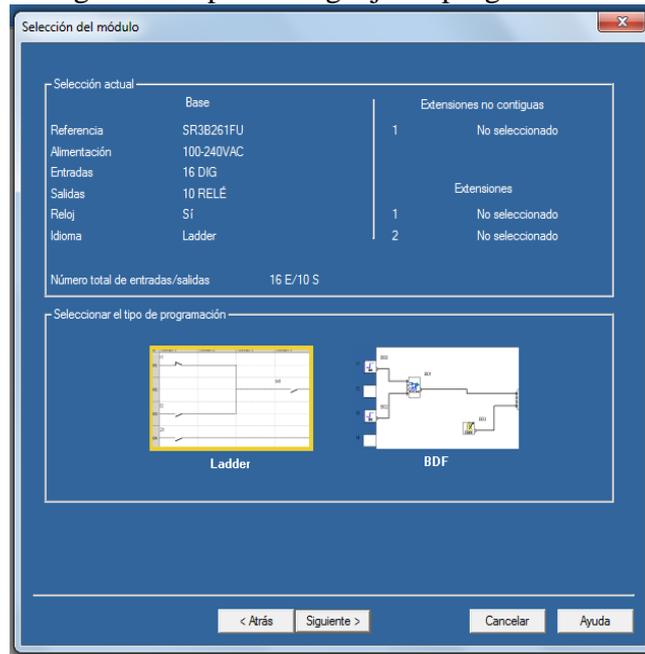
Figura 64. Características del módulo SR3B261FU



Fuente: Software Zelio Soft 2

A continuación aparecerá la ventana donde deberemos escoger el tipo de lenguaje a programar.

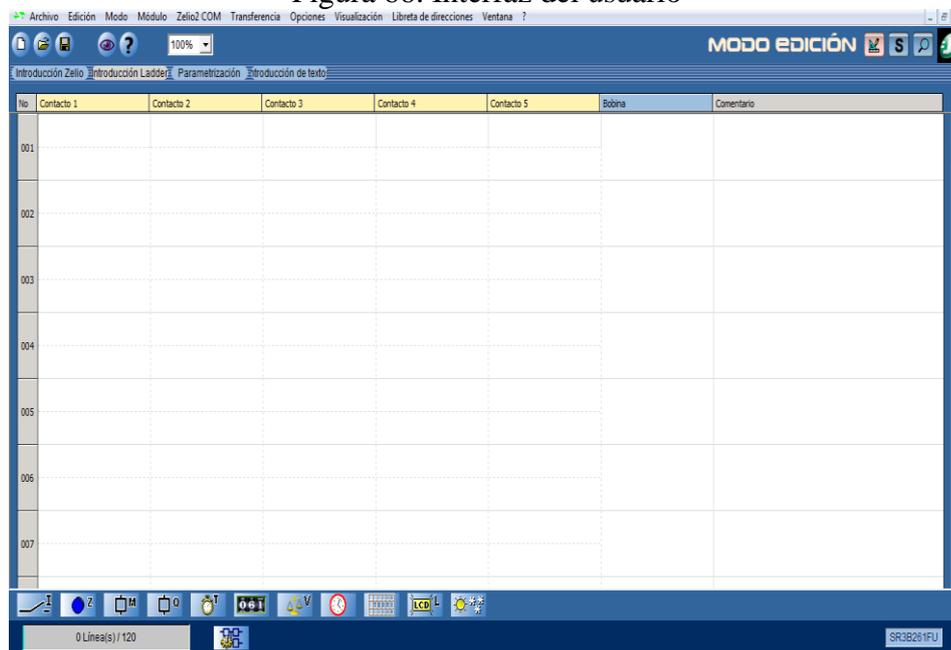
Figura 65. Tipo de lenguaje de programación



Fuente: Software Zelio Soft 2

Aparece la siguiente imagen.

Figura 66. Interfaz del usuario



Fuente: Software Zelio Soft 2

Esta imagen representa la hoja de trabajo o de cableado para programar nuestro PLC.

#### 4.6.1 Elementos principales utilizados del software Zelio

Tabla 13. Elementos del software Zelio

| Elemento                  | Icono   |
|---------------------------|---|
| Entradas digitales        |  |
| Botón de la parte frontal |  |
| Relé auxiliar M           |  |
| Salida Q                  |  |
| Temporizador              |  |
| Contador                  |  |
| Comparador de analógico   |  |
| Reloj semanal             |  |
| Monitor de operación      |  |
| Luz de fondo              |  |

Fuente: Software Zelio Soft 2

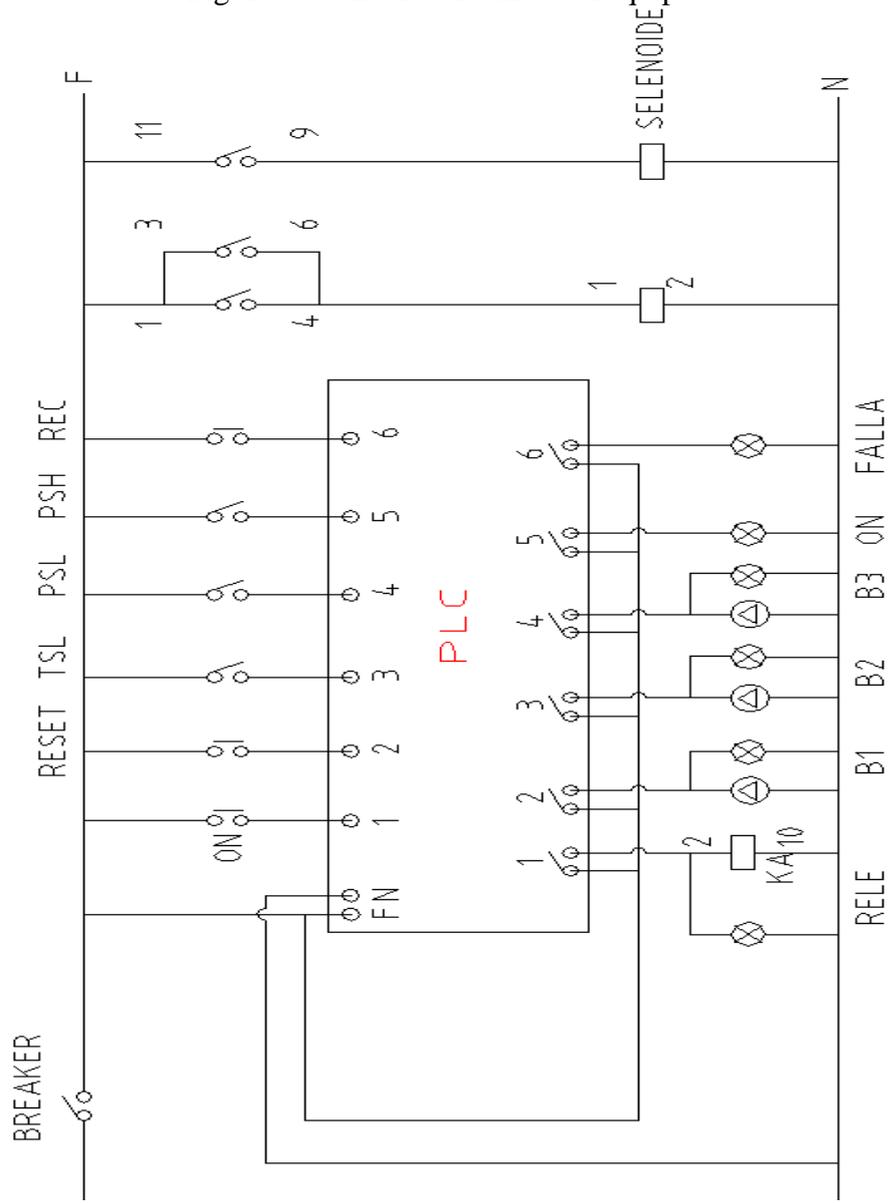
#### 4.6.2 Determinación de variables

Tabla 14. Variables de entrada y salida del PLC

| Entradas físicas        | Salidas     |
|-------------------------|-------------|
| Sensor de temperatura   | Bomba 1     |
| Botón 1 (ON)            | Bomba 2     |
| Botón 2 (FALLA)         | Bomba 3     |
| Botón 3 (RECIRCULACIÓN) | Foco 1 (UC) |
| Sensor de presión.      | Foco 2 (B1) |
|                         | Foco 3(B2)  |
|                         | Foco 4(B3)  |

Fuente: Software Zelio Soft 2

Figura 67. Circuito eléctrico del equipo



Fuente: Autores

Figura 68. Esquema del programa

Esquema del programa

| No  | Contacto 1      | Contacto 2      | Contacto 3 | Contacto 4 | Contacto 5 | Bobina              | Comentario   |
|-----|-----------------|-----------------|------------|------------|------------|---------------------|--|
| 001 | I1              | m2              | I3         | m4         |            | [ M1                | PULSADOR ON/OFF  |
| 002 | ON/OFF<br>M1    | FALLA           | BOMBEO B3  |            |            | ENCENDIDO           |  |
| 003 | ENCENDIDO<br>M1 |                 |            |            |            | RM3                 |  |
| 004 | ENCENDIDO<br>M1 | I3              |            |            |            | [ Q1                | ENCENDIDO COMPRESOR  |
| 005 | ENCENDIDO<br>M1 | TSL             |            |            |            | COMPR SELEN<br>[ Q5 | FOCO ON  |
| 006 | ENCENDIDO<br>I4 | I2              |            |            |            | ON<br>[ M2          | FALLA  |
| 007 | PSL<br>I5       | RESET           |            |            |            | FALLA               |  |
| 008 | PSH<br>M2       |                 |            |            |            |                     |  |
| 009 | FALLA<br>I6     |                 |            |            |            |                     |  |
| 010 | I2              |                 |            |            |            | SM4                 |  |
| 011 | RESET<br>M4     |                 |            |            |            | [ Q4                |  |
| 012 |                 |                 |            |            |            | B3<br>TT4           |  |
| 013 | T4              |                 |            |            |            | RM4                 |  |
| 014 | M2              |                 |            |            |            | [ Q6                | FOCO FALLA   |
| 015 | FALLA           |                 |            |            |            | FAULT<br>TX3        |  |
| 016 | M1              | T1              |            |            |            | [ Q2                | ENCENDIDO B1 LUEGO DE 60S. (es el tiempo que el compresor esta prendido solo antes de la circulación del agua al tanque central) |
| 017 | ENCENDIDO<br>M1 | ESPERA B1<br>t2 |            |            |            | B1<br>TT1           |  |
| 018 | ENCENDIDO<br>M1 | ESPERA B2       |            |            |            | ESPERA B1<br>TT2    |  |
| 019 | ENCENDIDO<br>M1 | T2              | m3         |            |            | ESPERA B2<br>[ Q3   | ENCENDIDO B2 LUEGO DE 120S (60 DE B1 Y 60 ESPERA POR ENFRIAMIENTO PLACA)   |
| 020 | ENCENDIDO<br>I3 | TSL             |            |            |            | B2<br>SM3           |  |
| 021 | M1              | T2              | M3         |            |            | TT3                 |  |
| 022 | ENCENDIDO       | ESPERA B2       |            |            |            | BOMBEO B3           |  |
| 023 |                 |                 |            | q6         |            | TX1                 | texto siempre  |
| 024 | Q2              |                 |            | FAULT      |            | TX2                 | texto con bobina para q se prenda solo con la bobina   |
| 025 | B1<br>M1        |                 |            |            |            | TL1                 | brillo pantalla  |

Fuente: Software Zelio Soft 2

**4.6.3 Simulación del programa.** Una vez finalizado el programa, se puede probar mediante un clic en el icono " S " situado en la parte superior derecha o en el menú Modo, a continuación, Simulación. Par a iniciar el programa, hacer clic en (RUN), como se indica en la Figura 70.

Figura 69. Interfax de simulación



Fuente: Software Zelio Soft 2

El forzado se realiza mediante un clic en la función o en el pin de entrada o de salida. No es necesario que el módulo esté conectado al PC para realizar la simulación.

**4.6.4 Transferencia del programa.** Este es el último paso para que nuestro equipo esté en funcionamiento. Se lo puede realizar de dos formas.

- PC hacia el ZELIO
- ZELIO hacia la PC

Estos dos casos son muy simples pero el más efectivo es el segundo por lo que tomaremos ese método para cargar nuestro PLC.

Una vez que haya conectado el módulo a la alimentación y al ordenador, ya puede transferir el programa:

Se realizan los siguientes pasos.

- Asegurarse que el tipo de módulo que tengamos sea el seleccionado en el software de nuestro PLC. Si ocurre que no es igual puede seleccionar otro módulo

mediante un clic en selección de módulo de programación en el menú módulo y que el programa no esté funcionando o este en simulación.

Figura 70. Simulación



Fuente: Software Zelio Soft 2

En el menú transferencia seleccione transferir programa y haga clic en PC>MÓDULO. Una vez confirmada el programa se transferirá al módulo.

#### **4.7 Construcción de un intercambiador de calor tipo Baudelot de placa sumergida**

##### ***IMPORTANTE.***

Cabe mencionar que la construcción de un intercambiador de calor tipo Baudelot acondicionado de tal manera que sirva como fuente didáctica para el laboratorio del área de transferencia no solo se puede construir de la manera indicada anteriormente. Si no tiene un sin número de opciones de construcción y de representación; el equipo tiene preparado muchas más opciones de funcionamiento. Uno de estos procesos que es muy utilizado en la industria es el INTERCAMBIADOR DE CALOR TIPO BAUDELLOT DE PLACA SUMERGIDA. Esta opción puede ser aplicada a nuestro equipo haciendo algunos cambios en los mismos que pueden ser realizados por un estudiante sin problema pero debe seguir las sugerencias que mencionamos a continuación.

El baño que realizamos a la placa es por medio de una tolva la cual contiene pequeño orificios de distribución del agua para poder enfriarlo en el menor tiempo posible.

Un problema visto en este tipo de construcción es el baño de la placa el cual no es total, es decir no ocupa toda el área de transferencia de calor, por lo que comienza a producirse hielo en esas partes. Este fenómeno muestra una deficiencia del diseño, pero la cual es muy pequeña y despreciable, por esta razón la industria hace el proceso de enfriamiento por baño.

Para modificar nuestro equipo haciéndole de placa sumergible debemos tomar en cuenta lo siguiente:

- No es indispensable cambiar la forma del equipo ni su distribución de las partes del mismo.
- Sellar todo el tanque central de posibles fugas de líquido.
- Retirar la bomba de recirculación del tanque central ya que de este modo no influye en el proceso de enfriamiento, pero a esta bomba lo podemos hacer funcionar no como elemento de distribución si no como agitador de agua para mantener el agua en movimiento.
- Cerrar la compuerta de mantenimiento del tanque central la misma que se encuentra en la parte posterior de dicho tanque.
- Buscar o comprar un agitador de líquidos. Se recomienda agitadores de pecera el mismo que vine acoplado de un motor pequeño la que hace funcionar todo el equipo y es perfecta por su pequeño tamaño y es fácil adquirirlo.

Figura 71. Agitadores de pecera



Fuente: [www.preciolandia.com](http://www.preciolandia.com)

- Tener muy en cuenta que la programación cargada en el PLC se puede modificar para cualquier proceso que queramos.
- La forma de suministrar líquido al tanque central será de forma manual directo en el tanque ya que el tanque de almacenamiento es muy pequeño para satisfacer el

volumen. Por esta razón debemos eliminar el funcionamiento de la bomba UNO del programa borrando la señal de salida.

- La descarga del líquido será de forma igual manual debido a los volúmenes de líquidos de los tanques.

## CAPÍTULO V

### 5. PRUEBAS EXPERIMENTALES, SEGURIDAD, OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO

#### 5.1 Pruebas

Las pruebas del intercambiador de calor tipo Baudelot fueron realizadas en las instalaciones del taller mecánico donde se pudo realizar toda la construcción y puesta en marcha del equipo, con lo que después de ultimar detalles de construcción se comprueba su buen funcionamiento para la obtención de resultados.

Los datos obtenidos del banco de pruebas son indicados por termómetros digitales presentes en el panel de control y en los manómetros de alta y baja presión instalados en el equipo.

##### 5.1.1 *Objetivos de la prueba*

- Puesta en marcha del intercambiador de calor tipo Baudelot
- Determinar en qué tiempo el agua alcanza la temperatura de 5 °C
- Comparar el coeficiente global de transferencia de calor experimental con el teórico

**5.1.2 *Equipos e instrumentación.*** Los equipos e instrumentos para la toma de datos se enumeran a continuación.

*Manómetro.* Es un instrumento que se usa para medir la presión en los fluidos o gases que se establece a través de una diferencia con la presión local. Su unidad de medida es la atmósfera, en el sistema internacional es newton por metro cuadrado, se utilizó un manómetro análogo tanto en la cañería de alta como de baja del sistema de refrigeración por su eficiencia, rentabilidad y su buen funcionamiento para estos trabajos.

El manómetro se encuentra acoplado al sistema de refrigeración por mangueras de presión las cuales están conectadas a la tubería de entrada y salida del refrigerante que se encuentra en la tubería del radiador del sistema de refrigeración.

Figura 72. Manómetros de alta y de baja del sistema de refrigeración



Fuente: Autores

*Termómetro.* Es un instrumento de medición de temperatura los cuales que, valiéndose de dispositivos transductores utiliza circuitos electrónicos para convertir en números las pequeñas variaciones de tensión obtenidas, mostrando finalmente la temperatura en un visualizador o pantalla.

Una de sus principales ventajas es que por no utilizar mercurio no contaminan el medio ambiente cuando son desechados.

Figura 73. Termómetros digitales



Fuente: Autores

*Termostato de refrigeración.* El termostato es un dispositivo que se emplea para mantener la temperatura de la cámara en un punto determinado de un ambiente o sistema.

Un termostato es el componente de un sistema de control, tan simple como un interruptor o conmutador eléctrico que funciona por temperatura.

Figura 74. Termostato eléctrico



Fuente: Autores

## 5.2 Tabulación de resultados

Se pudo visualizar la puesta en marcha del banco de pruebas, tanto como el principio de funcionamiento del intercambiador de calor tipo Baudelot como el sistema de refrigeración.

Los datos disponibles para las pruebas se detallan en la Tabla 15:

Tabla 15. Datos iniciales para la prueba

|                              |                      |
|------------------------------|----------------------|
| Lugar de prueba              | Riobamba             |
| Fecha de la prueba           | 21 de marzo 2013     |
| Hora de la prueba            | 10h 12 min           |
| Temperatura de aire          | 20,1 °C              |
| Temperatura inicial del agua | 17,3 °C              |
| Volumen agua a enfriar       | 0,009 m <sup>3</sup> |

Fuente: Autores

Tabla 16. Presiones antes de encender el equipo.

| Presión de baja | Presión de alta |
|-----------------|-----------------|
| 67 psi          | 126 psi         |

Fuente: Autores

Tabla 17. Presiones en pleno trabajo.

| <b>Presión de baja</b>                      | <b>Presión de alta</b> |
|---|------------------------|
| 40 psi                                      | 170 psi                |
| <b>Temperatura de refrigeración del R22</b> | -8°C                   |

Fuente: Autores

*Temperaturas obtenidas.* Los resultados que se obtuvieron en las pruebas del intercambiador de calor tipo Baudelot se detallan en la Tabla 18.

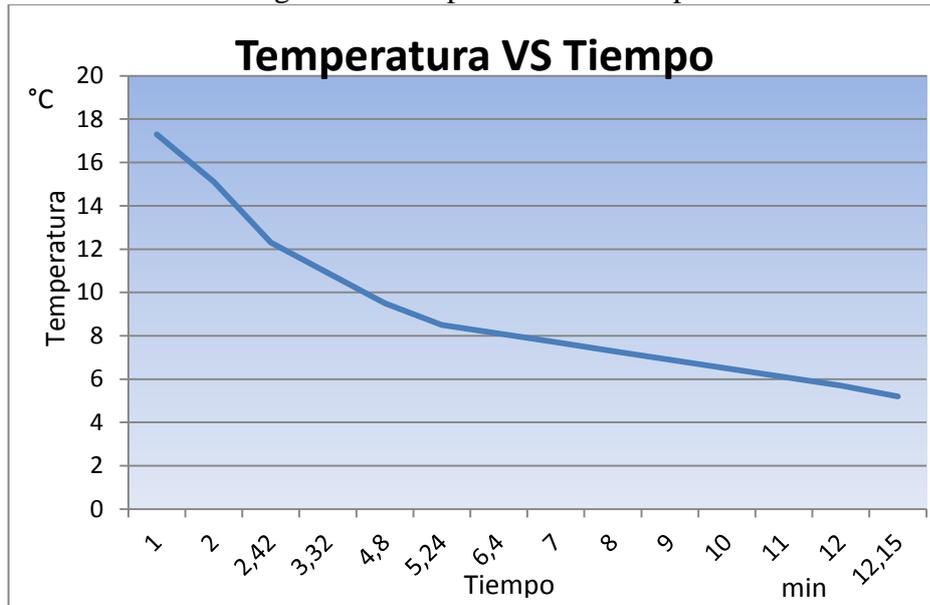
En este proceso se marca 4,5 amperios de corriente durante el funcionamiento del sistema de refrigeración.

Tabla 18. Resultado de temperaturas en función del tiempo

| <b>Tiempo transcurrido<br/>(min)</b> | <b>Temperatura del agua<br/>( °C)</b> |
|--------------------------------------|---------------------------------------|
| 0                                    | 17,3                                  |
| 1,15                                 | 15,1                                  |
| 2                                    | 12,3                                  |
| 2,42                                 | 10,9                                  |
| 3,32                                 | 9,5                                   |
| 4,8                                  | 8,5                                   |
| 5,24                                 | 8,1                                   |
| 6,4                                  | 7,7                                   |
| 7                                    | 7,3                                   |
| 8                                    | 6,9                                   |
| 9                                    | 6,5                                   |
| 10                                   | 6,1                                   |
| 11                                   | 5,7                                   |
| 12                                   | 5,2                                   |
| 12,15                                | 5                                     |

Fuente: Autores

Figura 75. Temperatura vs. Tiempo



Fuente: Autores

En la Tabla 18 y Figura 75 se indica los resultados de temperatura en función del tiempo. El equipo se demora 12,15 min para obtener una temperatura de 5°C en el agua.

### 5.2.1 Coeficiente global de transferencia de calor experimental

Igualando el calor sensible del agua con el calor del método del LMTD se tiene:

$$\dot{m}_a C_p (T_{a2} - T_{a1}) = AU(LMTD)$$

Despejando U:

$$U = \frac{\dot{m}_a C_p (T_{a2} - T_{a1})}{A(LMTD)}$$

Dónde:

Temperatura de evaporación  $R_{22} = -8^{\circ}\text{C}$  o  $16^{\circ}\text{F}$

Temperatura del agua a la entrada de la placa:  $T_{a1} = 17^{\circ}\text{C}$  o  $62,6^{\circ}\text{F}$

Temperatura del agua a la que se desea llegar:  $T_{a2} = 5^{\circ}\text{C}$  o  $41^{\circ}\text{F}$

$$\Delta T_1 = T_{a,1} - T_r = 17 - (-8)^\circ\text{C} = 25^\circ\text{C}$$

$$\Delta T_2 = T_{a,2} - T_r = 5 - (-8)^\circ\text{C} = 13^\circ\text{C}$$

$$LMTD = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}}$$

Al reemplazar los valores en la ecuación se tiene:

$$LMTD = \frac{25 - 13}{\ln \frac{25}{13}}$$

$$LMTD = 18,35^\circ\text{C}$$

$$V = (0,6 * 0,1 * 0,15)m = 0,009 m^3$$

Tiempo de enfriamiento del agua en las pruebas = 12,15 min

$$\delta = \frac{m}{V} \rightarrow m = \delta * V$$

$$m = 999,1 \frac{kg}{m^3} * 0,009m^3$$

$$m = 8,992 kg$$

$$\dot{m}_a = \frac{m}{t} = \frac{8.992kg}{12,15 min} * \frac{min}{60s}$$

$$\dot{m}_a = 0,0123 \frac{kg}{s}$$

$$Cp_a = 4191 \frac{J}{kg^\circ\text{C}}$$

$$T_{a_2} = 17^\circ\text{C}$$

$$T_{a_1} = 5^\circ\text{C}$$

Se considera un área de transferencia mediante la Figura 76 que posee nuestra placa.

Figura 76. Foto de la placa-vista posterior (prueba)



Fuente: Autores

Figura 77. Foto de la placa-vista frontal (prueba)



Fuente: Autores

En pleno funcionamiento del intercambiador de calor tipo Baudelot se puede notar varios puntos de vista:

*El agua no cubre en su totalidad la placa*

Esto se debe al método que se escogió para el flujo del agua en el exterior de la placa ya que implica una mala distribución.

Se realiza una estimación en cuanto al área de transferencia en ambas caras de la placa. Esta estimación es del 30 al 40 % del área total en base a la Figura 76 y a la Figura 77.

$$A = (0,275 * 0,3)m^2 = 0,0825 m^2$$

$$U = \frac{0,0123 \frac{kg}{s} * 4191 \frac{J}{kg^{\circ}C} * (17 - 5)^{\circ}C}{0,0825m^2 * 18,35^{\circ}C}$$

$$U = 408,615 \frac{W}{m^2^{\circ}C}$$

En comparación con el coeficiente global de transferencia de calor teórico.

$$U = 618,796 \frac{W}{m^2^{\circ}C}$$

En los valores presentados existe una aproximación tanto del coeficiente global de transferencia de calor teórico como del experimental sin olvidar los inconvenientes antes mencionados.

### 5.3 Seguridad

**5.3.1 Manual de reglas de seguridad.** En la operación y en el funcionamiento del banco de pruebas se debe tomar en cuenta los daños que pueden causar en el caso de un accidente, daños que pueden sufrir la misma máquina así como los daños a los usuarios.

Este capítulo ofrece medidas generales para el correcto funcionamiento del banco de pruebas y menciona además los peligros que pueden presentarse.

Uno de los riesgos importantes en los dispositivos a presión como son los evaporadores y las unidades condensadores, es la salida brusca de presión así como las fugas de gas refrigerante hacia el ambiente. Para evitar cualquier riesgo inminente que puede causar daños o que ponga en peligro la integridad del operario, usuarios o la del equipo se recomienda seguir los puntos de seguridad.

Este capítulo contiene información y normas obligatorias importantes que están relacionadas a la salud del operario y al correcto funcionamiento del intercambiador de calor tipo Baudelot.

**5.3.2 Puntos de seguridad.** El intercambiador de calor debe ser observado e inspeccionado continuamente para detectar fallas que puedan ocasionar algún accidente. Hay que realizar una inspección visual de toda la máquina y verificar su buen estado del equipo tomando en cuenta los siguientes puntos de seguridad:

Con la seguridad no se juega, hay que comprobar previo al arranque y después del paro total de la máquina que no existe ningún tipo de fugas. Además hay que verificar que todos los elementos del sistema funcionen correctamente. Hay que tomar en cuenta que durante la operación no se debe exceder de la presión y temperatura máxima de diseño. Cualquier modificación realizada debe ser registrada para no poner en riesgo la integridad de la máquina y a sus alrededores.

**5.3.2.1 Capacidad suficiente.** El sistema debería tener suficiente capacidad para llevar a cabo las funciones previstas y proporcionar un alto grado de confianza en que no se excederán los límites de diseño.

**5.3.2.2 Suministro de energía eléctrica de emergencia.** Debería disponerse el suministro apropiado de energía eléctrica de emergencia (CA) que requieran los componentes necesarios para la activación o el funcionamiento de los sistemas.

**5.3.2.3 Protección contra sucesos externos y contra riesgos internos.** El sistema debería diseñarse e instalarse de forma que ningún suceso externo ni riesgo interno considerado en el diseño (como una rotura de tubería o una inundación) tenga posibilidad de impedir que realice las funciones de seguridad previstas.

**5.3.3 Precauciones.** Bajo ningún concepto se debe sustituir los refrigerantes por alternativas provisionales sin consultar previamente al fabricante.

**5.3.3.1 Acciones necesarias.** Servirse de dispositivos duales de descompresión con piezas de recambio para facilitar la reparación o el cambio de las válvulas de presión sin afectar a la seguridad de la máquina.

Asegurarse de que no se puede exceder la presión máxima de funcionamiento.

Instalar sistemas de seguridad para detectar el exceso de presión en la maquinaria durante la interrupción del equipo.

**5.3.3.2 Acciones no permitidas.** Sobrepasar la carga límite de los contenedores de refrigerante, tanques, tambores, unidades de recuperación, recipientes, otros.

Superar la presión recomendada por el fabricante o la que se aplica habitualmente en las pruebas de resistencia del sistema para detectar posibles fugas.

Intentar dar servicio a un equipo si se carece de la capacitación y de la implementación a las herramientas y equipos pertinentes para manipular el refrigerante con seguridad.

Manipular refrigerantes en un sitio cerrado y sin ventilación.

Soplar tuberías con aire u oxígeno para retirar residuos de soldadura, limaduras y demás impurezas, ya que se puede contaminar el sistema.

**5.3.4 Usuarios u operarios del intercambiador de calor tipo Baudelot.** El usuario u operario es el responsable del funcionamiento seguro del intercambiador de calor tipo Baudelot.

Se debe prestar atención a los siguientes aspectos:

- Tenga siempre en cuenta las normativas de seguridad generales como por ejemplo de llevar siempre gafas de protección, ropa protectora ajustada, zapatos de seguridad, etc.
- El intercambiador de calor Baudelot deberá ser usado únicamente en perfectas condiciones. Toda modificación que se realice en la misma deberá ser informada a la persona responsable más cercana.
- Antes de comenzar a usar el intercambiador de calor tipo Baudelot, el usuario debe informarse acerca de los posibles peligros.

- Antes de poner en marcha se debe tener la certeza de que todas las piezas y partes del intercambiador de calor tipo Baudelot se encuentran en buen estado y funcionan correctamente.

**5.3.4.1** *Condiciones de servicio no autorizadas.* Se prohíbe usar el intercambiador de calor Baudelot cuando:

Existen averías o daños considerables.

No se efectúan los correspondientes trabajos de mantenimiento periódicamente.

**5.3.4.2** *Usuarios autorizados.* Todo personal que utilice el intercambiador de calor tipo Baudelot debe tener en cuenta lo siguiente:

- Haber sido instruido adecuadamente según la tarea que vaya a efectuar.
- Haber sido familiarizado con las normas de seguridad laboral y prevención de accidentes.
- Haber sido formado en el uso del intercambiador de calor tipo Baudelot.
- Haber leído detenidamente y entendido estas instrucciones de uso.
- El personal encargado de la instalación, el montaje, puesta en marcha, mantenimiento, o el desmontaje del intercambiador de calor tipo Baudelot debe de disponer de conocimientos necesarios para ello.

**5.3.4.3** *Restos de peligros.* No se puede nunca excluir por completo el resto de peligros. Solo se pueden evitar estos peligros con disciplina y comportamiento adecuado.

- *¡Peligro de lesiones!*

Las placas del intercambiador de calor tipo Baudelot tienen cantos filudos. Para manipular las placas del equipo póngase siempre guantes protectores.

- *Para el exterior del intercambiador de calor tipo Baudelot*

Existe peligro en sufrir cortos circuitos en la máquina. Para trabajar con seguridad en la parte exterior del intercambiador se recomienda desconectar por completo la energía eléctrica.

Para cualquier cambio de elementos eléctricos asegúrese que la máquina se encuentre desconectada de la fuente de energía.

Tome precaución que la fuente sea del voltaje que necesite la máquina.

- *Trasporte del intercambiador de calor tipo Baudelot*

Antes de trasportar el intercambiador de calor tipo Baudelot asegure que todos los elementos se encuentren bien ajustados y verifique que no exista ninguna fuga por movimientos bruscos.

#### **5.4 Operación del equipo**

El uso del banco de pruebas o equipo no es complejo ni laborioso tan solo se requiere seguir una secuencia de pasos ordenados y determinados por el diseñador o constructor para una correcta operación del equipo los mismos que son los siguientes.

Todos los comandos de accionamiento de falla y de pare están en el panel de control como los distintos termómetros que indican las diferentes temperaturas que vamos a tomar mientras que los manómetros de las presiones, el presostato de la unidad condensadora y el sensor de temperatura que debemos setear está en la parte frontal del equipo.

Figura 78. Tablero de control del equipo



Fuente: Autores

#### 5.4.1 Pasos para la puesta en marcha del equipo

1. Conectar el Equipo a una corriente alterna de 110 V y subir el interruptor que está en la pata izquierda del mismo.

Figura 79. Interruptor que alimenta corriente de 110V al equipo



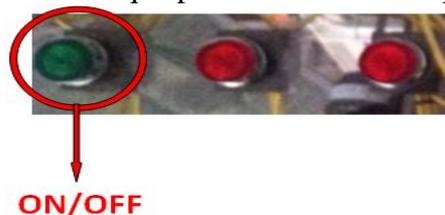
Fuente: Autores

Asegurarse que contenga agua suficiente en el tanque según sus niveles de agua representados.

Este tanque se encuentra en el lado izquierdo del equipo.

2. Pulsar el botón (ON) que se encuentra en el tablero de control del equipo. Este botón pondrá en funcionamiento a todo el equipo hasta que cumpla la función asignada la cual es de enfriar al líquido a una temperatura deseada. Después de cumplir el trabajo asignado el botón se apagará automáticamente.

Figura 80. Pulsador que pone en marcha el equipo



Fuente: Autores

**Nota.** Tener muy en cuenta en el funcionamiento del equipo que cuando es pulsado el botón ON, el ciclo del enfriamiento del fluido se hará automáticamente sin necesidad de pulsar los demás botones.

Ya pulsado el botón ON pondrá a funcionar el sistema de refrigeración por 1 minuto sin flujo del fluido en la placa esto se lo realiza para tener la placa fría antes comenzar el ciclo de enfriamiento.

En todo este proceso se mantendrá encendido el foco que nos indica que la unidad condensadora está en funcionamiento.

Figura 81. Foco que muestra que la unidad condensadora está en funcionamiento



Fuente: Autores

El PLC puesto en el panel de control automatiza a todo el equipo y da el accionamiento a todos nuestros elementos eléctricos.

Figura 82. Controlador lógico programable (PLC), controla todo el funcionamiento del equipo

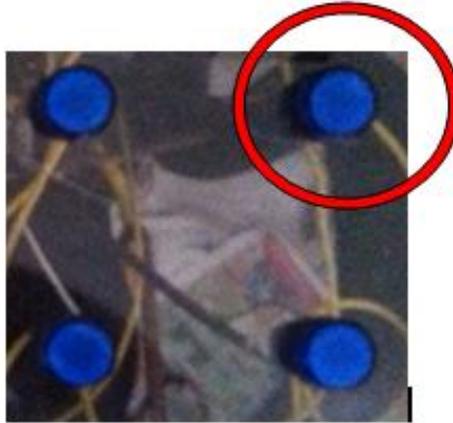


Fuente: Autores

El PLC ordena al equipo encender la bomba 1 la cual lleva el fluido al tanque central para su enfriamiento.

Se encenderá el foco de la bomba 1 para el llenado de agua del tanque central.

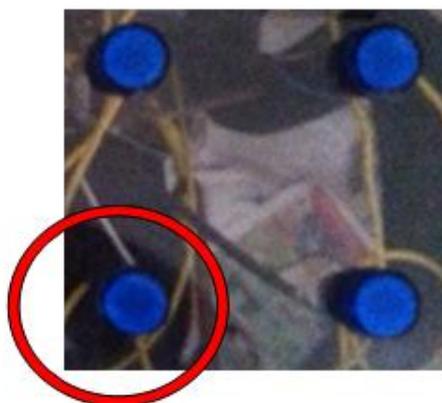
Figura 83. Foco que muestra el funcionamiento de la bomba 1, la que pasa el fluido al tanque central



Fuente: Autores

Después de 2.20 minutos de funcionamiento de la bomba 1 automáticamente se encenderá la bomba 2 la cual ayuda para la recirculación del agua en el tanque central hasta la temperatura deseada.

Figura 84. Foco que muestra el funcionamiento de la bomba 2



Fuente: Autores

Cuando llega el agua a la temperatura deseada el sensor de temperatura envía una señal al PLC para apagar la bomba 2 y manda a apagar la unidad condensadora ya que ha concluido su trabajo.

Figura 85. Sensor de temperatura seteada al valor requerido por el operario



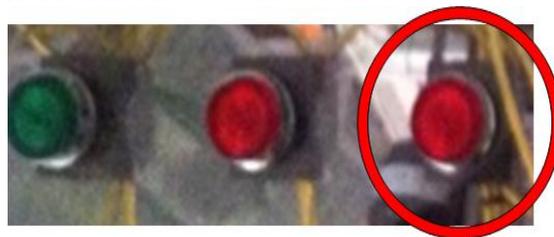
Fuente: Autores

Ya concluido el ciclo de enfriado del fluido podemos tomar notas de las distintas temperaturas obtenidas, las cuales son:

- Temperatura inicial
- Temperatura final
- Temperatura superficial de la placa

3. Con el pulsador de recirculación podemos enviar el fluido del tanque central hacia el tanque de almacenamiento para la realización de un ciclo de enfriamiento nuevo. Esto se lo realiza manteniendo presionado este pulsador hasta cuando nosotros creamos conveniente, asegurarse de no hacer trabajar en vacío a las bombas.

Figura 86. Pulsador de recirculación del fluido enfriado al tanque de almacenamiento

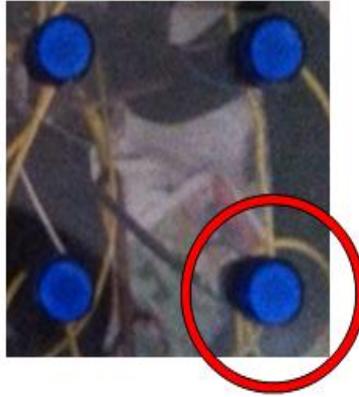


**RECIRCULACIÓN**

Fuente: Autores

Mientras mantenemos presionado el botón de recirculación en el panel de control se prendera el foco de bomba 3, el que nos indica que esta bomba está en funcionamiento.

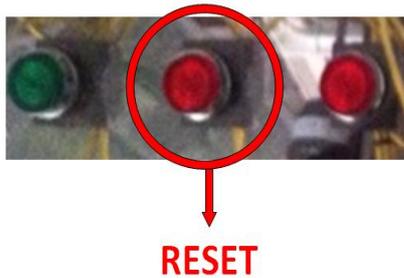
Figura 87. Foco que muestra el funcionamiento de la bomba 3, indica la recirculación del fluido



Fuente: Autores

Cuando el sistema presenta alguna falla encenderá el pulsador de FALLA el cual no dejará de estar iluminado hasta que hayamos solucionado el problema.

Figura 88. Pulsador que muestra si presenta una falla en el equipo



Fuente: Autores

Las fallas posibles que puede tener todo el sistema pueden ser:

- Problemas con la presión del refrigerante tanto en el lado de alta como en el de baja.

Este problema y el más común en el equipo sin decir que puede ser el único se soluciona seteando manualmente el presostato a la presión de trabajo de nuestra unidad condensadora.

Este se realiza destapando la carcasa del presostato y con un desarmador ajustar o desajustar los tornillos de alta y de baja fijando bien en los visores que muestra la presión.

Figura 89. Presostato de la unidad condensadora



Fuente: Autores

- Problemas con una obstrucción en las bombas
- Problemas con suciedad

**5.4.1.1** *Importante saber.* Tener muy en cuenta que cuando presionamos tanto la falla como la recirculación estamos haciendo funcionar la bomba 3 lo cual produce que se encienda el foco de la bomba en los dos casos mencionados.

Todas las operaciones y equipos que están en funcionamiento se indican con el encendido de focos los cuales se encuentran en el panel de control.

## 5.5 Plan de Mantenimiento

El mantenimiento del banco de pruebas no es nada complejo pero para la mejor conservación y funcionamiento del mismo se deberá realizar un buen mantenimiento de tipo preventivo.

Los problemas del equipo construido no siempre vienen acompañados de los síntomas obvios, como fugas o mezcla de gases o fluidos. Algunos problemas son menores pero progresivos, lo que ocasiona mayor consumo de energía, variabilidad de rendimiento del equipo y mala toma de datos. La suciedad, los depósitos, el sarro de la tubería y otros tipos de contaminación perjudican a los intercambiadores de calor de placas tipo Baudelot, ya que les restan eficiencia y, además, pueden dañar la superficie de la placa o equipos costosos tales como son los equipos eléctricos.

Los datos relacionados con la presión, la velocidad de flujo y la temperatura de las entradas y salidas del fluido pueden variar si existe un problema en el equipo.

Es necesario gastar en los costos de instalación relacionados con la instrumentación, cargada de refrigerante y soldadura de la tubería con un especialista a más de tener conocimientos más amplios su instrumentación es mejor a la de un taller común.

**5.5.1 Generalidades.** Para todo equipo o banco de pruebas construido en que está constituido de partes móviles, sistemas eléctricos uno de los aspectos más importantes es conservar la maquinaria y herramientas en condiciones de funcionamiento adecuados y óptimos, que permitan un buen funcionamiento y en este caso puntual una buena toma de datos.

Su función debe estar claramente orientada hacia el aseguramiento de la fiabilidad del equipo o banco de pruebas gracias a un adecuado programa de mantenimiento.

**5.5.2 Mantenimiento preventivo.** El mantenimiento preventivo es conocer el estado de la maquinaria o equipo para planear y programar las actividades, para eliminar las fallas que causan paros imprevistos de la utilización de equipo para un laboratorio.

La labor de mantenimiento se facilita cuando se posee el manual del fabricante de la maquinaria o equipo el cual nos ayuda a establecer mantenimientos según lo recomendado, por lo que presentaremos a continuación aclaraciones del mantenimiento de este equipo.

Con el mantenimiento preventivo se busca minimizar la probabilidad de falla, esto se realiza por medio de cuatro actividades básicas:

- 1. Visitas o inspecciones.** Sirven para verificar el estado del equipo o instalación a través de inspecciones rápidas, periódicas y planificadas que no requieren acción de desmontaje alguno.
- 2. Revisiones o ajustes.** Son inspecciones periódicas con la diferencia que en éstas si se hacen operaciones de desmontaje ya sea: radiador, ventilador, tornillos, conexiones

eléctricas etc. En este tipo de inspecciones es necesario realizar un paro total del equipo.

**3. Lubricación.** Es un punto primordial en el mantenimiento preventivo y consiste en la aplicación periódica de aceites y grasas en el compresor para evitar fallas debido al desgaste prematuro de las piezas a causa de la fricción.

**4. Limpieza.** La limpieza de maquinaria o equipo es una parte vital para la aplicación del mantenimiento preventivo en cualquier tipo de industria, ya que permite detectar de una mejor forma las averías o fallas en el equipo, facilita la labor del personal de mantenimiento y da una buena presencia al equipo.

**5.5.2.1 Bitácora de mantenimiento.** Es la recopilación de datos de los equipos tales como:

- Marca
- Modelo
- Posible proveedor

Estos datos nos facilita la tarea de llevar un mejor control del mantenimiento.

La documentación de las fallas, sus soluciones y refacciones utilizadas nos permite en caso de que se repita, resolverlo con mayor rapidez y deducir los métodos de prevención necesarios para evitar que vuelva a suceder.

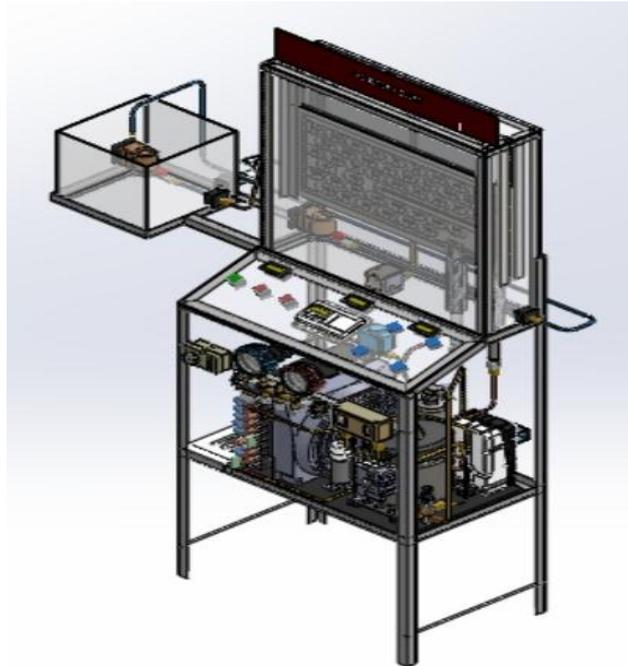
En el caso de que se tenga que hacer alguna modificación al equipo aquí también se documenta la forma en que se realizó.

*Datos que contiene una bitácora:*

- Datos generales: nombre del equipo, marca, serie, modelo, representante, capacidad de diseño, observaciones generales, imagen del equipo.

- Componentes principales: Por facilidad dividimos el equipo en componentes eléctricos, mecánicos, etc.
- Equipo armado.
- Intercambiador de calor tipo Baudelot.

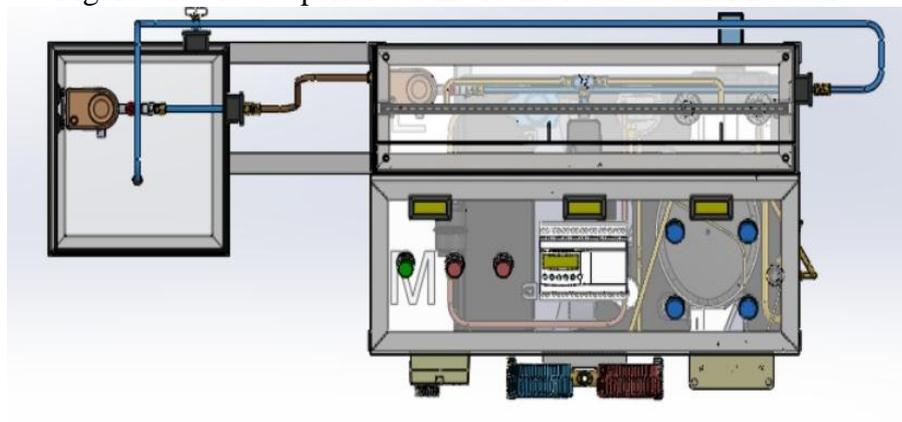
Figura 90. Intercambiador de calor Baudelot en SolidWorks



Fuente: Autores

- *Vista superior.*

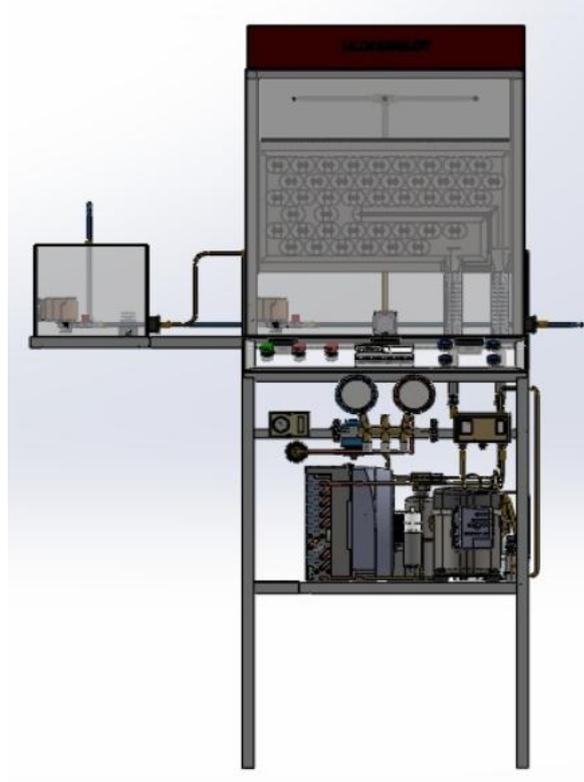
Figura 91. Vista superior del intercambiador de calor Baudelot



Fuente: Autores

- *Vista frontal.*

Figura 92. Vista frontal de intercambiador de calor Baudelot



Fuente: Autores

### **5.5.3** *Procedimientos operativos estándar del mantenimiento del intercambiador.*

**5.5.3.1** *Parte mecánica.* Como la estructura metálica y equipos mecánicos son el corazón del equipo, deben ser revisados para asegurar que están bien soldados, instalados y funcionando correctamente. Como todo equipo mecánico y eléctrico, estos controles se desgastan y deben ser reemplazados.

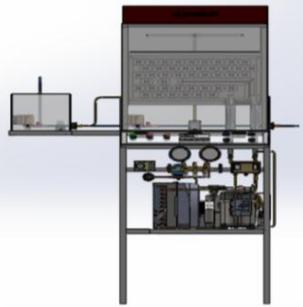
*Estructura.* Después de ideas sobre cómo se vería el equipo se decidió construirlo con planchas de acrílico ya que como es un equipo para laboratorio sería mejor que el estudiante vea como se produce el proceso de enfriado de agua.

El diseño se basó en demostrar un proceso claro aplicado para un banco de pruebas. Ya que nuestro equipo está conteniendo agua en sus tanques y su construcción se hizo entre dos materiales distintos como es un perfil de acero y planchas de acrílico, todo el

equipo está sometido a vibraciones en su funcionamiento debido al trabajo de la unidad condensadora. Este puede provocar fugas de agua en sus tanques o tuberías por sus acoples, el mantenimiento de todo el equipo se deberá hacer de forma visual cada cierto tiempo el cual puede ser de meses.

Para eliminar las fugas que se puede provocar en el equipo deberemos encontrar estas fugas y taparlas, una buena opción es ocupar una pega industrial resistente al agua un producto que nos ayudó para eliminar este problema con eficiencia fue el silicón industrial, se sugiere comprar uno de calidad que sirva para pegar acrílico.

Tabla 19. Bitácora de la estructura del equipo

| <b>Datos generales del equipo</b>  |  |                          |                  |
|--|--|--------------------------|------------------|
| <b>Nombre del equipo:</b>  | Estructura del intercambiador de calor |                          |                  |
| <b>Marca:</b>  | ESPOCH                                 |                          |                  |
| <b>Serie:</b>  | 001                                    |                          |                  |
| <b>Representante:</b>  | Ing. Mecánica                          | <b>Modelo:</b>           | Banco de pruebas |
| <b>Capacidad del equipo:</b>   | 2000 cm <sup>3</sup>                   | <b>Número de equipo:</b> | 001              |
| <b>Archivo fotográfico:</b>  |  |                          |                  |
|   |  |                          |                  |
| <b>Observaciones:</b>  |  |                          |                  |
| <p>La estructura del equipo armado se basó para que el estudiante pueda observar lo que pasa en el ciclo de refrigeración por lo que utilizamos una estructura de perfiles en L soldadas y recubiertas en acrílico transparente pegadas con pegamento industrial.<br/>           Plancha de acrílico (1200x1860x2)mm:<br/>           Perfil en L de una 1 plg e=2mm:</p> |  |                          |                  |
| <b>Posible proveedor</b>   |  |                          |                  |
| Kywi (centro ferretero)    Ambato, frente al Mall de los Andes<br>telf.023987900   |  |                          |                  |

Fuente: Autores

*Bombas.* Una bomba hidráulica es una máquina generadora que transforma la energía (generalmente energía mecánica) en energía hidráulica .

Al incrementar la energía del fluido se aumenta su presión, su velocidad o su altura, todas ellas relacionadas según el principio de Bernoulli.

En general, una bomba se utiliza para incrementar la presión de un líquido añadiendo energía al sistema hidráulico, para mover el fluido de una zona de menor presión o altitud a otra de mayor presión o altitud.

Figura 93. Mantenimiento de bomba eléctrica sumergible



Fuente: <http://mascotasdama.com/index.php?cPath=190>

Para el mantenimiento de las bombas eléctricas debemos tener en cuenta lo siguiente:

- El nivel de agua en los tanques para así asegurar que la bomba no funcione en vacío
- Cambiar el agua cada cierto tiempo ya que con esto cuidamos la creación de bacterias
- Sacar de los tanques los desperdicios que contenga el agua a bombear
- Comprobar la instalación eléctrica de bomba
- Cebear las bombas antes de su funcionamiento

Tabla 20. Bitácora bomba eléctrica sumergible

| Datos generales del equipo  |                            |                          |        |
|---|----------------------------|--------------------------|--------|
| <b>Nombre del equipo:</b>   | Bomba eléctrica sumergible |                          |        |
| <b>Marca:</b>   | ESPOCH                     |                          |        |
| <b>Serie:</b>   | 001                        |                          |        |
| <b>Representante:</b>   | Ing. Mecánica              | <b>Modelo:</b>           | Pecera |
| <b>Capacidad del equipo:</b>  | 492 L/h                    | <b>Número de equipo:</b> | 002    |
| <b>Archivo fotográfico:</b>   |                            |                          |        |
|    |                            |                          |        |
| <b>Observaciones:</b>   |                            |                          |        |
| Se utilizó bombas de pecera por ser las que tienen el caudal más bajo y por sus pequeñas dimensiones las que son perfectas para las condiciones que presenta nuestro equipo.<br>Bomba sumergible 120 V 492 L/h h=120 cm 0,19 AC |                            |                          |        |
| <b>Posible proveedor</b>  |                            |                          |        |
| Kywi (centro ferretero) Ambato, frente al Mall de los Andes<br>Telf.023987900   |                            |                          |        |

Fuente: Autores

*Unidad condensadora.* Es el equipo encargado de comprimir y condensar el gas refrigerante proveniente de una unidad evaporadora utilizando agua como medio de condensación.

Figura 94. Mantenimiento de unidad condensadora de ½ HP



Fuente: Autores

*Descripción de las partes de la unidad condensadora.*- Está compuesta por las siguientes partes:

- Compresor reciprocante de tipo hermético o montado sobre bases antivibratorias
- Tablero de control que incluye contactores, relevadores, interruptor de baja y alta presión
- Válvulas de servicio en la succión y descarga del compresor
- Condensador del tipo de casco y tubo para ser enfriado por agua
- Soporte de fierro estructural para alojar el equipo

El mantenimiento de la unidad condensadora es la más extensa y problemática de todas las partes que contiene el equipo pero a continuación mencionaremos pasos que ayudan a disminuir problemas o daños del mismo.

Este equipo contiene piezas bajo tensión eléctrica y móvil las cuales debemos tener muy en cuenta en el cuidado de los mismos.

Como recomendación para el mantenimiento de esta unidad se deberá aislar el equipo antes de realizar cualquier operación de reparación o de mantenimiento.

En esta unidad se tiene acceso al compresor y a la zona del panel de control retirando los tornillos de seguridad de su tapa, a más se tiene acceso al ventilador, su radiador y algunos tramos de tubería.

El mantenimiento de esta unidad se debe realizar cada tres meses lo cual es lo recomendado por el fabricante, pero debemos tener presente que todo el banco de pruebas no estará en constante funcionamiento por lo que el tiempo de la realización del mantenimiento se deberá prologar lo adecuado que verán al ritmo que pasen los días en el laboratorio y el uso del mismo.

Debemos comprobar los siguientes parámetros:

Lectura de presiones del refrigerante en el sistema tanto en la descarga como en la succión y de ser posible a la salida del serpentín condensador.

Temperatura del aire tanto a la entrada como a la salida del serpentín condensador, y de ser posible en la tubería de descarga del compresor y la salida del serpentín condensador con el fin de establecer la diferencia por disipación de calor.

Revisar manchas sospechosas de aceite.

Revisar el nivel de aceite en el compresor, sin importar si el mantenimiento incluye el cambio de aceite.

Se debe realizar una lectura de voltaje en línea de suministro y en la parte de salida de cada uno de los dispositivos de distribución y mando.

Se debe realizar una lectura de consumo o amperaje, carga total y consumo individual de los componentes en funcionamiento del equipo, ventiladores del serpentín tanto del evaporador como del condensador tanto de manera global como individual y del compresor.

Toda esta información debe quedar consignada en el formato de mantenimiento para ser confrontada con una nueva lectura, luego de efectuado el mantenimiento y puesta en marcha del equipo, esto con el fin de establecer diferencias de efectividad en el funcionamiento.

Una recomendación que debemos indicar es la desconexión del breaker, para garantizar el total aislamiento eléctrico del equipo y así evitar accidentes con fluctuaciones de voltaje.

Un paso muy importante de mantenimiento es la operación de limpieza de la unidad ya que con su realización podremos observar fallas o anomalías.

El cambio de aceite del compresor después 200 horas de funcionamiento. El aceite cambiado debe ser recogido en un recipiente limpio con el fin de revisarlo. Esto permite establecer la presencia de elementos sólidos como partículas metálicas que nos pueden indicar una ruptura interna de válvulas o un desgaste en bujes y casquetes lo que debe ser tenido como una señal de alerta para emprender una inspección inmediata de la parte

mecánica del compresor o programar una jornada de mantenimiento, en la cual se incluya la revisión mecánica del equipo.

La revisión de los motores ventiladores, debe incluir revisión del cableado, ajuste de empalmes aislados, ajuste del motor al chasis, conectores, consumo, ajuste de aspas en buen estado, especialmente el balanceo; un aspa descompensada no solo afecta la ventilación, sino que afecta la vida útil del motor. (PADILLA, 2012)

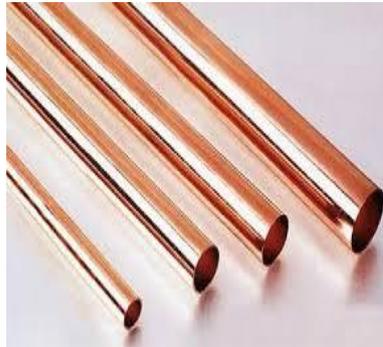
Tabla 21. Bitácora de unidad condensadora

| <b>Datos generales del equipo</b>   |                     |                          |        |
|---|---------------------|--------------------------|--------|
| <b>Nombre del equipo:</b>   | Unidad condensadora |                          |        |
| <b>Marca:</b>   | ESPOCH              |                          |        |
| <b>Serie:</b>   | 001                 |                          |        |
| <b>Representante:</b>   | Ing. Mecánica       | <b>Modelo:</b>           | Normal |
| <b>Capacidad del equipo:</b>  | ½ hp                | <b>Número de equipo:</b> | 003    |
| <b>Archivo fotográfico:</b>   |                     |                          |        |
|    |                     |                          |        |
| <b>Observaciones:</b>   |                     |                          |        |
| Se utilizó esta unidad ya que sus características eran acordes a las necesitadas tanto como para el tipo de refrigerante R-22 como el tipo de placa Baudelot.<br>Unidad Condensadora 1/2 HP R22 110 V .M/ALTA |                     |                          |        |
| <b>Posible proveedor</b>  |                     |                          |        |
| Angloecuatoriana, 9 de Octubre 1717 y José Mascote Esq. Guayaquil:<br>Telf2451900-2451751   |                     |                          |        |

Fuente: Autores

- *Tubería y soldadura.*

Figura 95. Tubería de cobre utilizada en el equipo



Fuente: <https://www.google.com.ec/#q=TUBERIA+DE+COBRE>

Figura 96. Soldadura de plata Harris



Fuente: <https://www.google.com.ec/#q=SOLDADURA+PLATA+HARRIS>

El mantenimiento y cuidado de los tubos y soldadura del equipo se lo realizará de una manera visual de todos de ellos para que no existan grietas o agujeros donde puede escapar el refrigerante cabe señalar que no requieren mantenimiento interno ya que solo fluye refrigerante en su interior y no es corrosivo.

Un método para saber si existe escape del refrigerante por la tubería o la soldadura es la utilización de agua con detergente colocando esta mezcla en las juntas o partes sospechosas de fugas de aire para que por la presión de refrigerante provoca la creación de burbujas debido al detergente lo cual es muy visible a simple vista por el ojo humano.

Tabla 22. Bitácora de tuberías y soldadura

| <b>Datos generales del equipo</b>   |                     |                          |        |
|---|---------------------|--------------------------|--------|
| <b>Nombre del equipo:</b>   | Tubería y soldadura |                          |        |
| <b>Marca:</b>   | ESPOCH              |                          |        |
| <b>Serie:</b>   | 001                 |                          |        |
| <b>Representante:</b>   | Ing. Mecánica       | <b>Modelo:</b>           | Normal |
| <b>Capacidad del equipo:</b>  | ¾ plg               | <b>Número de equipo:</b> | 004    |
| <b>Archivo fotográfico:</b>   |                     |                          |        |
|    |                     |                          |        |
| <b>Observaciones:</b>   |                     |                          |        |
| <p>La tubería comprada fue de cobre por ser un material eficiente en la transferencia de calor y su fácil proceso de moldeo.<br/> Mientras que la soldadura se hizo con una soldadura de plata hecha por un técnico especialista.<br/> Soldadura de plata Harris 15 %<br/> Tubería de cobre ¾ plg</p> |                     |                          |        |
| <b>Posible proveedor</b>  |                     |                          |        |
| <b>Soldadura:</b>   |                     |                          |        |
| Refrigeración y climas del Ecuador. Técnico: Freddy Villacís.<br>Telf.: 2953159 - 087078156 - 093791882.<br>Tubería.<br>Sistemas hidráulicos de alta presión: Romo Bustos<br>Telf.: 2962126   |                     |                          |        |

Fuente: Autores

- *Acoples.* Son elementos mecanizados para facilitar la unión de tuberías sin la necesidad de soldadura.

Figura 97. Mantenimiento de acoples de bronce para la unión de la tubería



Fuente: Autores

Se recomienda la utilización de acoples de acero inoxidable que son de alta duración y no son afectadas por la corrosión, que sean cubiertas con una capa de recubrimiento de algún material en casos precisos y exigentes con respecto a la corrosión.

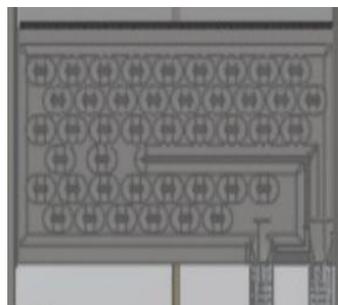
Tabla 23. Bitácora de los acoples

| <b>Datos generales del equipo</b>   |               |                          |        |
|---|---------------|--------------------------|--------|
| <b>Nombre del equipo:</b>   | Acoples       |                          |        |
| <b>Marca:</b>   | ESPOCH        |                          |        |
| <b>Serie:</b>   | 001           |                          |        |
| <b>Representante:</b>   | Ing. Mecánica | <b>Modelo:</b>           | Bronce |
| <b>Capacidad del equipo:</b>  |               | <b>Número de equipo:</b> | 005    |
| <b>Archivo fotográfico:</b>   |               |                          |        |
|    |               |                          |        |
| <b>Observaciones:</b>   |               |                          |        |
| Se instaló acoples para unir tramos de tubería y acoplar a los tanques de almacenamiento de agua. Acople de bronce 1/2 plg. |               |                          |        |
| <b>Posible proveedor</b>  |               |                          |        |
| Sistemas hidráulicos de alta presión: Romo Bustos<br>Telf.: 2962126   |               |                          |        |

Fuente: Autores

- *Placa del Intercambiador de Calor*

Figura 98. Mantenimiento de la placa tipo Baudelot

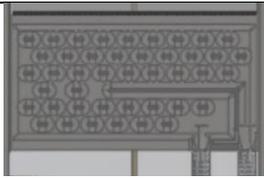


Fuente: Autores

La velocidad de contaminación de la superficie de transferencia de calor se ve afectada por la velocidad y el tipo de fluido que se hace circular por dicha placa. Se recomienda aumentar la velocidad de flujo a intervalos regulares, si es posible y si se utiliza líquidos

para enfriar que tienden a descomponerse es recomendable deshacerse de todo el fluido después de utilizarlo. Tanto en los tanques como en la placa lo podemos hacer con una limpieza utilizando desinfectantes para evitar la descomposición del líquido después de un tiempo.

**Tabla 24. Bitácora de placa tipo Baudelot**

| <b>Datos generales del equipo</b>   |                     |                          |           |
|---|---------------------|--------------------------|-----------|
| <b>Nombre del equipo:</b>   | Placa tipo Baudelot |                          |           |
| <b>Marca:</b>   | ESPOCH              |                          |           |
| <b>Serie:</b>   | 001                 |                          |           |
| <b>Representante:</b>   | Ing. Mecánica       | <b>Modelo:</b>           | ECONOCOIL |
| <b>Capacidad del equipo:</b>  |                     | <b>Número de equipo:</b> | 006       |
| <b>Archivo fotográfico:</b>   |                     |                          |           |
|   |                     |                          |           |
| <b>Observaciones:</b>   |                     |                          |           |
| <p>La placa es importada ya que en el país no construye similares por ser soldada a láser y posee un material inoxidable, se caracteriza por tener mayor transferencia de calor con respecto a otras.<br/>                     Placa Baudelot Econocoil (12x23) plg</p> |                     |                          |           |
| <b>Posible proveedor</b>  |                     |                          |           |
| Tranter Latino América S.A. de C.V.<br>RETABLO, QUERETARO 76154 MEXICO.   |                     |                          |           |

Fuente: Autores

- *Manómetros.* El manómetro es un instrumento utilizado para la medición de la presión en los fluidos o gases que generalmente determinan la diferencia de la presión entre el fluido y la presión local de donde se mide. En la mecánica la presión se define como la fuerza por unidad de superficie que ejerce un líquido o un gas perpendicularmente a dicha superficie.

La presión suele medirse en:

- Atmósferas (atm)

- La presión se expresa en newton por metro cuadrado (un newton por metro cuadrado es un pascal Pa )

Figura 99. Mantenimiento de manómetros de presión



Fuente: Autores

Se debe tener en cuenta lo siguiente:

- Si un manómetro necesita ser sustituido, sólo lo será por otro nuevo

Tabla 25. Bitácora de manómetros

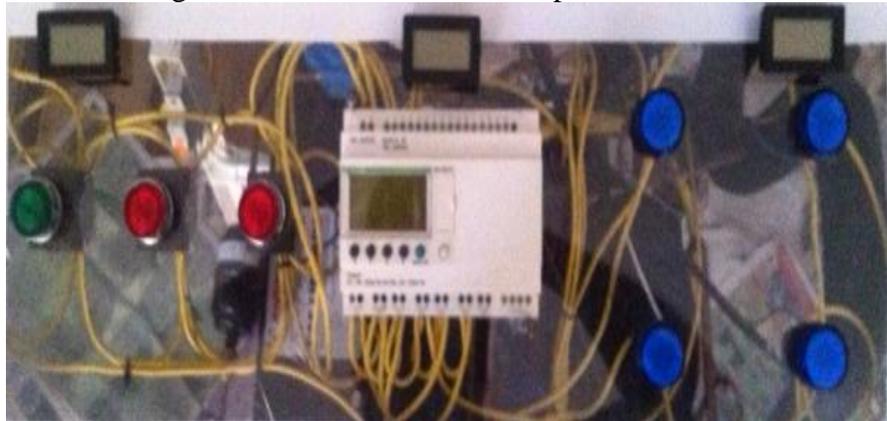
| <b>Datos generales del equipo</b>   |               |                          |          |
|---|---------------|--------------------------|----------|
| <b>Marca:</b>   | ESPOCH        |                          |          |
| <b>Serie:</b>   | 001           |                          |          |
| <b>Representante:</b>   | Ing. Mecánica | <b>Modelo:</b>           | Análogos |
| <b>Capacidad del equipo:</b>  | 250 PSI       | <b>Número de equipo:</b> | 007      |
| <b>Archivo fotográfico:</b>   |               |                          |          |
|    |               |                          |          |
| <b>Observaciones:</b>   |               |                          |          |
| Se compraron manómetros para las conexiones de alta y de baja de nuestro sistema de refrigeración. Manómetros R12-22 con mangueras. |               |                          |          |
| <b>Posible proveedor</b>  |               |                          |          |
| MEGAFRIO S.A. Ambato Ecuador.<br>12 de Noviembre y Montalvo.<br>Telf.: 0322822253 - 0322824465                                      |               |                          |          |

Fuente: Autores

**5.5.3.2 Parte eléctrica.** Para todos los componentes eléctricos utilizados en todo el banco de pruebas, el mantenimiento primordial que deben tener es el correcto empate entre cables y dispositivos.

- *Panel de control.* Ya que en el panel de control se localiza la mayor parte de componentes eléctricos debemos tener muy en cuenta su mantenimiento y funcionamiento.

Figura 100. Mantenimiento del panel de control



Fuente: Autores

Para el panel de control se realizará los siguientes pasos:

- Se observa que no se presenten daños visibles, piezas flojas o sueltas
- Se retira el polvo asentado
- Se ajusta todos los terminales, poniendo atención a cada componente que se esté ajustando para detectar si este presenta señal de recalentamiento
- Se verifica que los conductores de tierra estén bien ajustados y que además tengan continuidad eléctrica con la estructura del tablero
- Se realiza la limpieza de las entradas naturales de ventilación (si es que las hay)
- Se procede a energizar el tablero y se pone en funcionamiento la máquina en condiciones normales

- Se mide la corriente que circula por los elementos que presentaban rastros de calentamiento para determinar si requieren ser cambiados por encontrarse fuera de rango.

Tabla 26. Bitácora del panel de control

| <b>Datos Generales del Equipo</b>   |                  |                          |     |
|---|------------------|--------------------------|-----|
| <b>Nombre del equipo:</b>   | Panel de control |                          |     |
| <b>Marca:</b>   | ESPOCH           |                          |     |
| <b>Serie:</b>   | 001              |                          |     |
| <b>Representante:</b>   | Ing. Mecánica    | <b>Modelo:</b>           |     |
| <b>Capacidad del equipo:</b>  |                  | <b>Número de equipo:</b> | 008 |
| <b>Archivo fotográfico:</b>   |                  |                          |     |
|    |                  |                          |     |
| <b>Observaciones:</b>   |                  |                          |     |
| El panel consta de casi todos los elementos eléctricos que tenemos en el equipo: termómetros - botones - focos - PLC - cableado.  |                  |                          |     |
| <b>Posible proveedor</b>  |                  |                          |     |
| MEGAFRIO S.A. Ambato Ecuador.<br>12 de Noviembre y Montalvo.<br>Telf.: 0322822253 - 0322824465<br>Kywi (centro ferretero) Ambato, frente al Mall de los Andes<br>telf.023987900 |                  |                          |     |

Fuente: Autores

- *Presostato.* También es conocido como interruptor de presión. El presostato es un aparato de seguridad de control que cierra o abre un circuito eléctrico dependiendo de la lectura de presión del fluido o gas que da el sistema a controlar con respecto a la seteadora por seguridad que tiene el sistema.

Figura 101. Mantenimiento de presostato instalado



Fuente: Autores

Este instrumento no requiere de un mantenimiento alguno solo de un buen cuidado e igual manipulación.

Tabla 27. Bitácora del presostato

| <b>Datos generales del equipo</b>   |               |                          |           |
|---|---------------|--------------------------|-----------|
| <b>Nombre del equipo:</b>   | Presostato    |                          |           |
| <b>Marca:</b>   | ESPOCH        |                          |           |
| <b>Serie:</b>   | 001           |                          |           |
| <b>Representante:</b>   | Ing. Mecánica | <b>Modelo:</b>           | Económico |
| <b>Capacidad del equipo:</b>  |               | <b>Número de equipo:</b> | 009       |
| <b>Archivo fotográfico:</b>   |               |                          |           |
|   |               |                          |           |
| <b>Observaciones:</b>   |               |                          |           |
| El presostato mencionado vino adjunto a la unidad condensadora ya que su dimensionamiento se basa en la carga de la unidad condensadora que se va a adquirir. |               |                          |           |
| <b>Posible proveedor</b>  |               |                          |           |
| Angloecuatoriana, 9 de Octubre 1717 y José Mascote Esq. Guayaquil:<br>Telf2451900-2451751   |               |                          |           |

Fuente: Autores

- *PLC*. Es un controlador lógico programable el cual es una computadora utilizada en la ingeniería automática o automatización industrial, para automatizar procesos electromecánicos, tales como el control de la maquinaria de la fábrica en líneas de montaje, atracciones mecánicas o un equipo cualquiera que contenga elementos de control.

Cuando hablamos de mantenimiento de PLC, en realidad se está hablando de dar un chequeo al sistema.

Figura 102. Mantenimiento de controlador lógico programable (PLC)



Fuente: Autores

A los controladores lógicos programables (PLC) se realiza los chequeos normales y periódicos que son:

- Limpieza de hardware (se elimina polvillo), se verifica funcionamiento de ventiladores (si es que tiene provisto)
- Instalación del PLC
- Montaje del chasis del PLC
- Fuentes de alimentación y conexiones
- Circuito de alta de emergencia
- Cableado de entrada/salida
- Conexiones de red
- Configuración inicial

Tabla 28. Bitácora del PLC

| Datos generales del equipo   |               |                          |       |
|--|---------------|--------------------------|-------|
| <b>Nombre del equipo:</b>  | PLC           |                          |       |
| <b>Marca:</b>  | ESPOCH        |                          |       |
| <b>Serie:</b>  | 001           |                          |       |
| <b>Representante:</b>  | Ing. Mecánica | <b>Modelo:</b>           | Zelio |
| <b>Capacidad del equipo:</b>   |               | <b>Número de equipo:</b> | 010   |
| <b>Archivo fotográfico:</b>  |               |                          |       |
|   |               |                          |       |
| <b>Observaciones:</b>  |               |                          |       |
| <p>El PLC controla todo nuestro equipo, nos ayuda a ejecutar todas las acciones; de esta forma automatizamos el ciclo de enfriamiento.</p> <p>PLC Zelio Soft 2 110 V</p> |               |                          |       |
| <b>Posible proveedor</b>   |               |                          |       |
| <p>Angloecuatoriana, 9 de Octubre 1717 y José Mascote Esq. Guayaquil:<br/>Telf2451900-2451751</p>  |               |                          |       |

Fuente: Autores

- *Sensor de temperatura.* Un sensor es un dispositivo capaz de detectar magnitudes físicas o químicas, llamadas variables de instrumentación y transformarlas en variables eléctricas.

Figura 103. Mantenimiento de sensor de temperatura



Fuente: Autores

No existe un plan de mantenimiento para dicho sensor por su especial construcción y sus materiales ocupados. Pero si podemos alargar su funcionamiento con una correcta ubicación en el banco de pruebas, mejorando la ubicación del hilo conductor de información ya que si se rompe no habrá solución alguna solo la compra de otro.

Tabla 29. Bitácora del sensor de temperatura

| <b>Datos generales del equipo</b>  |                       |                          |         |
|--|-----------------------|--------------------------|---------|
| <b>Nombre del equipo:</b>  | Sensor de temperatura |                          |         |
| <b>Marca:</b>  | ESPOCH                |                          |         |
| <b>Serie:</b>  | 001                   |                          |         |
| <b>Representante:</b>  | Ing. Mecánica         | <b>Modelo:</b>           | Quality |
| <b>Capacidad del equipo:</b>   | (-22 - +98)° F        | <b>Número de equipo:</b> | 011     |
| <b>Archivo fotográfico:</b>  |                       |                          |         |
|   |                       |                          |         |
| <b>Observaciones:</b>  |                       |                          |         |
| El sensor de temperatura colocado en el equipo es de fuerte material pero se debe tener mucho cuidado con el bulbo de temperatura. |                       |                          |         |
| Sensor de temperatura QTH-102 (-22 - +98)° F   |                       |                          |         |
| <b>Posible proveedor</b>   |                       |                          |         |
| MEGAFRIO S.A. Ambato Ecuador.<br>12 de Noviembre y Montalvo.<br>Telf.: 0322822253 - 0322824465                                     |                       |                          |         |

Fuente: Autores

- *Termómetros digitales, pulsadores, focos.* Los siguientes equipos eléctricos existen de varias formas y tamaños, su costo no representa un problema para el equipo como el abastecimiento de los mismos.

Figura 104. Mantenimiento de termómetros digitales



Fuente: Autores

Figura 105. Mantenimiento de pulsadores con luz



Fuente: Autores

Figura 106. Mantenimiento de foco piloto



Fuente: Autores

No existe un plan de mantenimiento para estos componentes eléctricos pero podemos asegurar su buen funcionamiento para alargar su vida útil tratando de alejar cualquier tipo de golpe que puede sufrir y de fluidos los cuales pueden provocar un corto circuito.

Tabla 30. Bitácora de dispositivos eléctricos

| <b>Datos generales del equipo</b>   |                         |                          |     |
|---|-------------------------|--------------------------|-----|
| <b>Nombre del equipo:</b>   | Dispositivos eléctricos |                          |     |
| <b>Marca:</b>   | ESPOCH                  |                          |     |
| <b>Serie:</b>   | 001                     |                          |     |
| <b>Representante:</b>   | Ing. Mecánica           | <b>Modelo:</b>           |     |
| <b>Capacidad del equipo:</b>  |                         | <b>Número de equipo:</b> | 012 |
| <b>Archivo fotográfico:</b>   |                         |                          |     |
|   |                         |                          |     |
| <b>Observaciones:</b>   |                         |                          |     |
| <p>Todos los elementos eléctrico son de construcción sencilla y de fácil funcionamiento, se puede conseguir sin problema en cualquier electrónica del país como son:</p> <p>Termómetro de bolsillo análogo</p> <p>Termómetro digital-30°+30°</p> <p>Luz piloto estándar solido corta</p> <p>Pulsador 22mm SASSINBW3465PUL</p> |                         |                          |     |
| <b>Posible proveedor</b>  |                         |                          |     |
| <p>MEGAFRIO S.A. Ambato Ecuador.</p> <p>12 de Noviembre y Montalvo.</p> <p>Telf.: 0322822253 - 0322824465</p> <p>Kywi (centro ferretero) Ambato, frente al mal de los Andes</p> <p>telf.023987900</p>   |                         |                          |     |

Fuente: Autores

**5.5.4 Ventajas del programa de mantenimiento.** Como consecuencia de la aplicación de un programa de mantenimiento preventivo se tiene las ventajas siguientes:

- Prolongación de la vida útil de la maquinaria y equipo.

- Mejores condiciones de operación y seguridad de la maquinaria y equipo, ya que se conoce el estado físico de los mismos.
- El equipo permanece menos tiempo fuera de servicio.
- Disminución de los costos de reparación ya que se evitan al máximo los costos por reparaciones imprevistas.
- Lista de refacciones. Refacciones que consideramos críticas y su cantidad en almacén, así como posible proveedor.
- Historia. Anotación de fallas, trabajos, modificaciones, etc. Anotando fecha, falla, solución, si es correctivo o preventivo, tiempo, refacciones utilizadas y encargado.

## CAPÍTULO VI

### 6. COSTOS

#### 6.1 Generalidades

En este capítulo se realiza un detallado análisis de los costos de construcción, instalación y compra de equipo para la construcción y puesta en marcha de nuestro banco de pruebas de un intercambiador de calor tipo Baudelot.

##### 6.1.1 Costos directos

Se debe considerar costos de materiales, equipos, herramientas, mano de obra y transporte los cuales están detallados a continuación.

*Costos por materiales y equipos*

*Costos de la estructura metálica del banco de pruebas*

Tabla 31. Costos de la estructura metálica del banco de pruebas

| Descripción                        | Unidad | Cant. | P unit.<br>[USD] | Subtotal<br>[USD] |
|------------------------------------|--------|-------|------------------|-------------------|
| Perfil en L de una 1 plg e=2mm     | m      | 1     | 8,60             | 8,60              |
| Perfil en L de una 1 1/2 plg e=2mm | m      | 1     | 8,90             | 8,90              |
| Barrilla de 1/4 plg                | m      | 1     | 1,00             | 1,00              |
| Electrodos de unión                | lb     | 1     | 1,95             | 1,95              |
| Pintura spray esmalte blanco       | Unidad | 4     | 2,48             | 9,92              |
| <b>Sub total</b>                   |        |       |                  | <b>30,37</b>      |

Fuente: Autores

*Costos de los tanques de agua*

Tabla 32. Costos de tanques de agua

| <b>Descripción</b>                  | <b>Unidad</b> | <b>Cant.</b> | <b>P unit. [USD]</b> | <b>Subtotal [USD]</b> |
|-------------------------------------|---------------|--------------|----------------------|-----------------------|
| Plancha de acrílico 1200x1860x2)mm  |               | 2            | 70                   | 140,00                |
| Cortador de acrílico                | Unidad        | 1            | 0,88                 | 0,88                  |
| Adhesivo sellador Polymax 290 ml    | Unidad        | 5            | 11,54                | 57,70                 |
| Pistola metálica de silicón liviana | Unidad        | 1            | 2,12                 | 2,12                  |
| Pega industrial de alta eficiencia  | Unidad        | 2            | 6,75                 | 13,50                 |
| <b>Sub total</b>                    |               |              |                      | <b>214,20</b>         |

Fuente: Autores

*Costos de la instalación de las cañerías*

Tabla 33. Costos de la instalación de las cañerías

| <b>Descripción</b>                                | <b>Unidad</b> | <b>Cant.</b> | <b>P unit. [USD]</b> | <b>Subtotal [USD]</b> |
|---|---------------|--------------|----------------------|-----------------------|
| Cañería de cobre 3/8 plg                          | m             | 1            | 5,50                 | 5,50                  |
| Cañería de cobre 1/2 plg                          | m             | 3            | 6,50                 | 19,50                 |
| Neplo de bronce 1/2 plg                           | Unidad        | 5            | 4,50                 | 22,50                 |
| T de bronce de 1/2 plg a 3/8 plg NPT              | Unidad        | 1            | 6,00                 | 6,00                  |
| Bombas sumergible 120 V 492 Lt/h h=120 cm 0,19 AC | Componente    | 4            | 35,76                | 143,04                |
| Pega industrial                                   | Unidad        | 1            | 6,70                 | 6,70                  |
| <b>Sub total</b>                                  |               |              |                      | <b>203,24</b>         |

Fuente: Autores

*Costos del sistema de refrigeración*

Tabla 34. Costos del sistema de refrigeración

| Descripción                                 | Unidad     | Cant. | P unit.<br>[USD] | Subtotal<br>[USD] |
|---|------------|-------|------------------|-------------------|
| Unidad condensadora 1/2 HP R22 110 V M/ALTA | Componente | 1     | 456,62           | 456,62            |
| Placa Baudelot Econocoil (12x23) plg        | Componente | 1     | 475,00           | 475,00            |
| Refrigerante R-22                           | lb         | 1,1   | 15,00            | 15,00             |
| Manómetros R12-22 con mangueras             | Componente | 1     | 25,95            | 25,95             |
| Sensor de temperatura                       | Componente | 1     | 17,00            | 17,00             |
| Filtro secador tuerca 1/4 plg               | Componente | 1     | 7,50             | 7,50              |
| Orificio de la válvula de expansión         | Componente | 1     | 15,00            | 15,00             |
| Válvula solenoide                           | Componente | 1     | 92,00            | 92,00             |
| Válvula de expansión                        | Componente | 1     | 75,00            | 75,00             |
| Soldadura de plata Harris 15%               | lb         | 1     | 8,70             | 43,50             |
| Acoples                                     | Componente | 2     | 7,65             | 15,30             |
| Aislante Rubatex                            | m          | 1     | 10,00            | 10,00             |
| <b>Sub total</b>                            |            |       |                  | <b>1247,87</b>    |

Fuente: Autores

*Costos del sistema eléctrico y control*

Tabla 35. Costos del sistema eléctrico y control

| Descripción                            | Unidad     | Cant. | P unit.<br>[USD] | Subtotal<br>[USD] |
|--|------------|-------|------------------|-------------------|
| PLC Zelio Soft 2 110 V                 | Componente | 1     | 250,00           | 250,00            |
| Termómetro de bolsillo análogo         | Componente | 1     | 2,30             | 2,30              |
| Termómetro digital-30°+30°             | Componente | 3     | 6,80             | 40,40             |
| Pulsador 22mm SASSINBW3465PUL          | Componente | 3     | 3,07             | 9,21              |
| Luz piloto estándar                    | Componente | 4     | 1,50             | 6,00              |
| Cable Electro sólido con recubrimiento | m          | 20    | 1,25             | 25,00             |
| Amarras plásticas                      | Unidad     | 50    | 0,05             | 2,50              |
| Relé                                   | Componente | 1     | 8,55             | 8,55              |
| Caja de breaker                        | Unidad     | 1     | 2,56             | 2,56              |
| Breaker                                | Unidad     | 1     | 2,80             | 2,80              |
| <b>Sub total</b>                       |            |       |                  | <b>349,32</b>     |

Fuente: Autores

*Costo total de materiales y equipos*

Tabla 36. Costo total de materiales y equipos

|  |                |
|--|----------------|
| Costos de la estructura del banco de pruebas [USD] | 30,37          |
| Costos de tanques de agua [USD]                    | 214,20         |
| Costos de la instalación de las cañerías [USD]     | 203,24         |
| Costos del sistema de refrigeración [USD]          | 1247,87        |
| Costos del sistema eléctrico y control [USD]       | 349,32         |
| <b>Costo total de materiales y equipos [USD]</b>   | <b>2045,00</b> |

Fuente: Autores

*Costos de máquinas – herramientas*

Tabla 37. Costos de máquinas - herramientas

| <b>Operaciones</b>         | <b>Horas-equipos</b> | <b>Costo-hora [USD]</b> | <b>Subtotal [USD]</b> |
|----------------------------|----------------------|-------------------------|-----------------------|
| Corte del acrílico (láser) | 1                    | 87,00                   | 87,00                 |
| Corte (cizalla)            | 0,5                  | 1,00                    | 0,50                  |
| Corte (moladora)           | 1                    | 3,00                    | 3,00                  |
| Soldadura General          | 2                    | 15,00                   | 30,00                 |
| Otros                      |                      |                         | 40,00                 |
|                            |                      | <b>Sub total</b>        | <b>160,50</b>         |

Fuente: Autores

*Costo de mano de obra*

Tabla 38. Costo de mano de obra

| <b>Operador</b>          | <b>Hora/hombre</b> | <b>Sal.real/hora [USD]</b> | <b>Subtotal [USD]</b> |
|--------------------------|--------------------|----------------------------|-----------------------|
| Técnico soldador         | 4                  | 1,50                       | 6,00                  |
| Técnico de refrigeración | 3                  | 20,00                      | 60,00                 |
| Otros                    |                    |                            | 40,00                 |
|                          |                    | <b>Sub total</b>           | <b>106,00</b>         |

Fuente: Autores

*Costo de transporte*

Tabla 39. Costo de transporte

|                         |               |
|-------------------------|---------------|
| <b>Transporte [USD]</b> | 356,00        |
| <b>Sub total [USD]</b>  | <b>356,00</b> |

Fuente: Autores

*Total costos directos*

Tabla 40. Costos directos

|  |                |
|--|----------------|
| Costos por materiales y equipos [USD]    | 2045,00        |
| Costos por máquinas y herramientas [USD] | 160,50         |
| Costo por mano de obra [USD]             | 106,00         |
| Costo por transporte [USD]               | 356,00         |
| <b>Total costos directos [USD]</b>       | <b>2667,50</b> |

Fuente: Autores

**6.1.2 Costos indirectos de fabricación**

*Costos de ingeniería*

Se le puede considerar el 10% del equipo:

Tabla 41. Costos de ingeniería

| <b>Costos de la máquina [USD]</b> | <b>Costos por ingeniería [USD]</b> |
|-----------------------------------|------------------------------------|
| 2667,50                           | 266,75                             |

Fuente: Autores

*Costos por utilidad*

Se le considera 0 debido que el trabajo de tesis se trata de un trabajo particular.

Tabla 42. Costos por utilidad

|                                  |          |
|----------------------------------|----------|
| <b>Costos por utilidad [USD]</b> | <b>0</b> |
|----------------------------------|----------|

El equipo no tiene una ganancia monetaria

Fuente: Autores

*Total de costos indirectos*

Tabla 43. Costos indirectos

|   |               |
|---|---------------|
| Costos por ingeniería [USD]             | 266,75        |
| Costo por imprevistos [USD]             | 200           |
| Costos por utilidades [USD]             | 0             |
| <b>Total de costos indirectos [USD]</b> | <b>466,75</b> |

Fuente: Autores

### 6.1.3 Costo total de fabricación

Tabla 44. Costo total de fabricación

|   |                |
|---|----------------|
| Costos directos [USD]                     | 2667,50        |
| Costos indirectos [USD]                   | 466,75         |
| <b>Costo total de la maquinaria [USD]</b> | <b>3134,25</b> |

Fuente: Autores

El costo total del equipo es de \$ 3134,25 (TRES MIL CIENTO TREINTA Y CUATRO PUNTO VEINTICINCO).

## CAPÍTULO VII

### 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 7.1 Conclusiones

La información sobre el tema fue muy escasa: ya que se tomó como punto de partida bases teóricas relacionadas con nuestro caso y que al final resultaron aplicables.

Para el diseño del intercambiador de calor tipo Baudelot se aplicó básicamente su principio de funcionamiento.

Para la parte de construcción del intercambiador de calor tipo Baudelot fue indispensable esquemas o planos tanto para el funcionamiento como para el sistema de refrigeración.

En el diseño térmico se determinó el coeficiente global de transferencia de calor en forma teórica y se comparó con el experimental cuyos resultados son semejantes.

Con la elaboración del presente trabajo se deja como precedente a los estudiantes la prueba del desarrollo de la tecnología con relación a intercambiadores de calor ya que se busca a futuro máquinas más eficientes con menor contaminación ambiental.

La velocidad tanto del agua como la del refrigerante fueron factores esenciales y predominantes; ya que de ellos influyen directamente con los coeficientes convectivos.

Se logró determinar los coeficientes convectivos tanto del agua como la del refrigerante por medio de un análisis térmico.

En las pruebas las gráficas Temperatura vs Tiempo se observa que el  $\Delta_T$  del evaporador va disminuyendo a medida que se va acercando a la temperatura deseada.

El control del sistema de refrigeración se ha realizado en función de la temperatura y presión es decir mediante estos parámetros se controla el encendido y apagado del compresor.

## **7.2 Recomendaciones**

Tener en cuenta que las bombas que se utilizó en el banco de pruebas son las llamadas bombas de pileta y que alguna de ella no eran autocebantes.

Manipular con precaución el banco de pruebas debido a los cables de elementos eléctricos ya que son susceptibles a la rotura.

Tomar precaución de no derramar fluidos en el PLC por ser un dispositivo eléctrico. Es el cerebro del banco de pruebas.

Tener presente que el equipo debe ser conectado a una línea de alimentación de 110 V.

Evitar mover el banco de pruebas para no tener problemas de fugas en un futuro.

Tener precaución del lugar en donde se vaya a instalar el banco de pruebas ya que este debe una buena ventilación.

## BIBLIOGRAFÍA

- ALARCÓN CREUS, José. 1998.** Tratado práctico de refrigeración automática. [En línea] Marcombo, 1998. [Citado el: 10 de 09 de 2012.]  
<http://books.google.com.ec/books?id=Qy0RlXo1blsC&pg=PA119&dq=%20temperatura+de+condensacion&hl=es&sa=X&ei=F3rXUPmdKYk8ATVrYC4Cg&ved=0CDMQ6AEwAA#v=onepage&q=temperatura%20de%20condensacion&f=true>.
- Albert1891. 2012.** Buenas Tareas. [En línea] 05 de 2012. [Citado el: 15 de 04 de 2012.]  
<http://www.buenastareas.com/ensayos/Conveccion-Natural/4355599.html>.
- DANFOSS. 2012.** Notas del instalador. [En línea] 26 de 07 de 2012. [Citado el: 19 de 09 de 2012.]  
<http://www.danfoss.com/Spain/BusinessAreas/Refrigeration+and+Air+Conditioning/News/Fitters-Notes-%E2%80%93-The-Essential-and-Ever-Expanding-Handbook/7A00E6F1-C205-4A4F-81FC-DB57064E3286.html>.
- E-THERM. 2012.** Chiller tipo Baudelot. [En línea] 15 de 08 de 2012. [Citado el: 01 de 09 de 2012.] <http://www.e-therm.com.ar/productos/chillers.html>.
- GUTI, Victor. 2009.** Intercambiadores de calor 2. [En línea] Scribd, 10 de 07 de 2009. [Citado el: 18 de 08 de 2012.] <http://es.scribd.com/doc/17247350/intercambiadores-de-calor2>.
- HOLMAN, J. P. 1998.** *Trasferencia de calor*. Octava. Madrid : Madrid Concepción Fernández, 1998. págs. 2,164. 007-844785-2.
- INCROPERA, F. P. 1999.** *Fundamentos de transferencia de calor*. Cuarta. México : Prentice Hall, 1999. págs. 377, 381.
- KANDLIKAR, Satish G. 1990.** *A General Correlation For Predicting the Two – Phase Flow Boiling Heat Transfer Coefficient Inside Horizontal and vertical Tubes*. 02 : s.n., 1990. págs. 219-228.
- Lotto45. 2010.** Intercambiadores de calor. [En línea] Scribd, 30 de 08 de 2010. [Citado el: 25 de 08 de 2012.] <http://es.scribd.com/doc/36597332/Intercambiadores-de-Calor>.
- PADILLA, Rafael. 2012.** Instrucciones de instalación y mantenimiento. [En línea] 27 de 03 de 2012. [Citado el: 08 de 01 de 2013.] <http://es.scribd.com/doc/86925087/unidad-condensadora-mantenimiento>.

**SolidWorks. 1995.** Coeficiente de transferencia de calor por convección. [En línea] Dassault Systèmes SolidWorks, 1995. [Citado el: 05 de 03 de 2012.]

[http://help.solidworks.com/2011/spanish/SolidWorks/cworks/LegacyHelp/Simulation/Analysis/Background/ThermalAnalysis/Convection\\_Topics/Convection\\_Heat\\_Coefficient.htm](http://help.solidworks.com/2011/spanish/SolidWorks/cworks/LegacyHelp/Simulation/Analysis/Background/ThermalAnalysis/Convection_Topics/Convection_Heat_Coefficient.htm).

**TABÓAS, Francisco.** Coeficiente de transferencia de calor para flujo bifásico en evaporación. [En línea] [Citado el: 16 de 05 de 2012.]

<http://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/8491/12ANEXOITRANSFERENCIADECALORENEBULLICION.pdf?sequence=11..978-84-690-7588-3>.

**TRANter. 2013.** Intercambiadores de calor de superficie. [En línea] 2013. [Citado el: 07 de 09 de 2012.] <http://www.tranter.com/Pages/contact/rapid-service/contact-us.aspx>.

**Universidad Nacional de la Plata. 2011.** Convección forzada. [En línea] 27 de 11 de 2011. [Citado el: 27 de 04 de 2012.] <http://catedras.quimica.unlp.edu.ar/ftransporte/clase14.pdf>.

**USAL. 2009.** Intercambiadores de calor. [En línea] Usal, 2009. [Citado el: 28 de 08 de 2012.] [http://web.usal.es/~tonidm/DEI\\_07\\_comp.pdf](http://web.usal.es/~tonidm/DEI_07_comp.pdf).

**VALENZUELA, M. R. 2003.** *Apuntes de transferencia de calor*. Riobamba : s.n., 2003. pág. 61.

**Wikipedia. 2013.** Coeficiente de película. [En línea] 13 de 03 de 2013. [Citado el: 06 de 03 de 2012.] [http://es.wikipedia.org/wiki/Coeficiente\\_de\\_pel%C3%ADcula](http://es.wikipedia.org/wiki/Coeficiente_de_pel%C3%ADcula).

—. **2013.** Conducción de calor. [En línea] 06 de 12 de 2013. [Citado el: 13 de 02 de 2012.] [http://es.wikipedia.org/wiki/Conducci%C3%B3n\\_de\\_calor](http://es.wikipedia.org/wiki/Conducci%C3%B3n_de_calor).

—. **2013.** Convección. [En línea] 18 de 12 de 2013. [Citado el: 02 de 03 de 2012.] <http://es.wikipedia.org/wiki/Convecci%C3%B3n>.

—. **2013.** Evaporadores. [En línea] 21 de 03 de 2013. [Citado el: 29 de 08 de 2012.] <http://es.wikipedia.org/wiki/Evaporador>.

—. **2013.** Ingeniería Mecánica. [En línea] 04 de 12 de 2013. [Citado el: 07 de 02 de 2012.] [http://es.wikipedia.org/wiki/Ingenier%C3%ADa\\_mec%C3%A1nica](http://es.wikipedia.org/wiki/Ingenier%C3%ADa_mec%C3%A1nica).

—. **2013.** Intercambiadores de calor. [En línea] 22 de 11 de 2013. [Citado el: 22 de 06 de 2012.] [http://es.wikipedia.org/wiki/Intercambiador\\_de\\_calor](http://es.wikipedia.org/wiki/Intercambiador_de_calor).

—. **2013**. Número de Nusselt. [En línea] 24 de 10 de 2013. [Citado el: 11 de 03 de 2012.] [http://es.wikipedia.org/wiki/N%C3%BAmero\\_de\\_Nusselt](http://es.wikipedia.org/wiki/N%C3%BAmero_de_Nusselt).

—. **2013**. Número de Prandtl. [En línea] 20 de 03 de 2013. [Citado el: 13 de 03 de 2012.] [http://es.wikipedia.org/wiki/N%C3%BAmero\\_de\\_Prandtl](http://es.wikipedia.org/wiki/N%C3%BAmero_de_Prandtl).

—. **2013**. Nusselt. [En línea] 29 de 08 de 2013. [Citado el: 08 de 03 de 2012.] [http://es.wikipedia.org/wiki/Wilhelm\\_Nusselt](http://es.wikipedia.org/wiki/Wilhelm_Nusselt).

—. **2013**. Segundo principio de la termodinámica. [En línea] 08 de 11 de 2013. [Citado el: 20 de 02 de 2012.] [http://es.wikipedia.org/wiki/Segundo\\_principio\\_de\\_la\\_termin%C3%A1mica](http://es.wikipedia.org/wiki/Segundo_principio_de_la_termin%C3%A1mica).