

**DISEÑO BÁSICO DE UN BANCO DE PRUEBAS PARA BOMBAS DE CALOR AGUA-AIRE DE BAJA POTENCIA A ESCALA DE LABORATORIO**

**AUTORES:  
DAVID BUILES VILLEGAS  
SANTIAGO LEON MARULANDA**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA  
ESCUELA DE INGENIERIA  
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA  
MEDELLIN, ANTIOQUIA  
2014**

**DISEÑO BÁSICO DE UN BANCO DE PRUEBAS PARA BOMBAS DE CALOR AGUA-AIRE DE BAJA POTENCIA A ESCALA DE LABORATORIO**

**AUTORES:  
DAVID BUILES VILLEGAS  
SANTIAGO LEON MARULANDA**

**TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR POR EL TITULO DE INGENIERO MECÁNICO**

**ASESOR:  
IM. CESAR ALEJANDRO ISAZA ROLDAR, PHD**

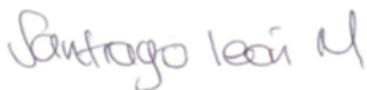
**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA  
ESCUELA DE INGENIERIA  
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA  
MEDELLIN, ANTIOQUIA  
2014**

## **DECLARACIÓN DE ORIGINALIDAD**

Octubre 30 de 2014

David Builes Villegas  
Santiago León Marulanda

“Declaramos que esta tesis (o trabajo de grado) no ha sido presentada para optar a un título, ya sea en igual forma o con variaciones, en esta o cualquier otra universidad”  
Art 82 Régimen Discente de Formación Avanzada.



**DAVID BUILES**  
**C.C. 1.037.583.469**



**SANTIAGO LEON**  
**C.C. 1.110.509.528**

## TABLA DE CONTENIDOS

LISTA DE FIGURAS.....	7
LISTA DE TABLAS .....	8
RESUMEN.....	9
INTRODUCCIÓN.....	10
OBJETIVOS .....	12
<b>1. CAPITULO I. CONCEPTOS Y GENERALIDADES DE LA BOMBA DE CALOR.....</b>	<b>13</b>
<b>1.1. BOMBA DE CALOR .....</b>	<b>13</b>
<b>1.1.1. CLASIFICACIÓN DE BOMBAS DE CALOR .....</b>	<b>13</b>
<b>1.1.1.1. BOMBA DE CALOR DE FUENTE DE AIRE .....</b>	<b>14</b>
<b>1.1.1.2. BOMBA DE CALOR DE FUENTE DE AGUA .....</b>	<b>14</b>
<b>1.1.1.3. BOMBA DE CALOR DE FUENTE GEOTÉRMICA .....</b>	<b>15</b>
<b>1.1.2. SUBCLASES DE BOMBAS DE CALOR .....</b>	<b>15</b>
<b>1.1.2.1. BOMBA DE CALOR AGUA-AGUA.....</b>	<b>15</b>
<b>1.1.2.2. BOMBA DE CALOR AIRE-AIRE .....</b>	<b>16</b>
<b>1.1.2.3. BOMBA DE CALOR AIRE-AGUA .....</b>	<b>16</b>
<b>1.1.2.4. BOMBA DE CALOR AGUA-AIRE .....</b>	<b>16</b>
<b>1.1.3. COMPONENTES DE LA BOMBA DE CALOR .....</b>	<b>16</b>
<b>1.1.3.1. COMPRESOR.....</b>	<b>17</b>
<b>1.1.3.2. CONDENSADOR .....</b>	<b>17</b>
<b>1.1.3.3. EVAPORADOR.....</b>	<b>18</b>
<b>1.1.3.4. DISPOSITIVOS DE EXPANSIÓN.....</b>	<b>19</b>
<b>1.1.3.5. ÓRGANOS DE SEGURIDAD Y CONTROL.....</b>	<b>19</b>
<b>1.1.3.6. EQUIPOS AUXILIARES.....</b>	<b>20</b>
<b>1.1.3.7. REGULADOR DE POTENCIA.....</b>	<b>20</b>
<b>1.2. REFRIGERANTES .....</b>	<b>21</b>
<b>1.3. COEFICIENTE DE DESEMPEÑO (COP).....</b>	<b>21</b>
<b>1.4. REFRIGERACION.....</b>	<b>22</b>
<b>1.4.1. EL CICLO IDEAL DE REFRIGERACIÓN POR COMPRESIÓN DE VAPOR ..</b>	<b>22</b>
<b>1.4.2. EL CICLO REAL DE REFRIGERACIÓN POR COMPRESIÓN DE VAPOR....</b>	<b>23</b>
<b>1.5. USO DE LAS BOMBAS DE CALOR EN COLOMBIA.....</b>	<b>24</b>
<b>1.6. VENTAJAS DE LAS BOMBAS DE CALOR AGUA-AIRE .....</b>	<b>26</b>
<b>2. CAPITULO II POLITICAS Y NORMATIVA.....</b>	<b>29</b>
<b>2.1. POLITICA .....</b>	<b>29</b>
<b>2.1.1. POLÍTICAS DE EFICIENCIA ENERGÉTICA EN COLOMBIA .....</b>	<b>29</b>
<b>2.1.1.1. LEY 697 DE 2001 (LEY URE).....</b>	<b>29</b>
<b>2.1.1.2. LEY 508 DE 1999 .....</b>	<b>30</b>
<b>2.1.1.3. DECRETO 2501 DE 2007 (PROMOCIÓN URE).....</b>	<b>30</b>

2.1.1.4. RESOLUCIÓN 180919 DE 2010 (PLAN DE ACCIÓN INDICATIVO DEL PROURE).....	30
2.1.2. ETIQUETADO DE EFICIENCIA ENERGÉTICA.....	30
2.1.2.1. REGLAMENTO TÉCNICO DE ETIQUETADO. RETIQ.....	30
2.2. NORMATIVA.....	31
2.2.1. IMPORTANCIAS DE EVALUAR LOS EQUIPOS DE PRODUCCIÓN DE FRIO.....	31
2.2.2. CONDICIONES DE ENSAYO ESTANDAR NTC 5380.....	32
2.2.3. NORMAS DE LABORATORIOS ISO 17025.....	33
2.2.4. CONDICIONES DE CARACTERIZACIÓN ESTÁNDAR ANSI/ARI 320.....	34
2.2.4.1. ENSAYO DE CONDICIONES MÁXIMAS DE OPERACIÓN.....	34
2.2.4.2. ENSAYO DE FUNCIONAMIENTO A BAJA TEMPERATURA.....	34
2.2.4.3. CONDICIONES ELÉCTRICAS.....	35
2.2.4.4. ESPECIFICACIONES DE EVALUACIÓN.....	35
2.2.4.5. PROCEDIMIENTO DE ENSAYO.....	35
2.2.4.6. REQUERIMIENTOS.....	36
2.2.4.7. ADQUISICIÓN DE DATOS.....	36
3. CAPITULO III. DISEÑO CONCEPTUAL.....	37
3.1. SISTEMA DE CONTROL Y ADQUISICIÓN DE DATOS.....	39
3.2. TEMPERATURA.....	39
3.2.1. INSTRUMENTOS PARA EL CONTROL DE LA TEMPERATURA.....	39
3.2.2. INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN PARA LA TEMPERATURA.....	40
3.3. FLUJO.....	41
3.3.1. FLUJO DE AGUA.....	41
3.3.2. FLUJO DE AIRE.....	42
3.4. HUMEDAD.....	42
3.4.1. INSTRUMENTOS PARA EL CONTROL DE LA HUMEDAD.....	43
3.4.2. INSTRUMENTOS PARA LA MEDICIÓN DE LA HUMEDAD.....	43
3.5. PRESIÓN.....	44
3.6. PROCESO DE ENSAYOS EN EL BANCO DE PRUEBAS.....	45
4. CAPITULO IV DISEÑO BÁSICO.....	47
4.1. CONCEPTOS GENERALES.....	47
4.2. DISTRIBUCIÓN DE PLANTA.....	50
4.3. EQUIPOS REQUERIDOS.....	54
4.3.1. SISTEMA DE DISIPACIÓN DE CALOR.....	55
4.3.1.1. TORRE DE ENFRIAMIENTO.....	55
4.3.1.2. BOMBA HIDRÁULICA.....	55
4.3.1.3. VÁLVULA ESTRANDGULADORA.....	56
4.3.1.4. VARIADOR DE VELOCIDAD.....	57
4.3.2. SISTEMA DE GENERACIÓN DE CALOR.....	57
4.3.2.1. RESISTENCIA SUMERGIDA.....	57
4.3.2.2. RESISTENCIA ALETEADA.....	58
4.3.2.3. UNIDAD DE TRATAMIENTO DE AIRE.....	58

4.3.2.4. SISTEMA DE CONTROL Y ADQUISICIÓN DE DATOS .....	59
4.3.2.5. SENSOR DE FLUJO DE AGUA.....	59
4.3.2.6. SENSOR DE FLUJO DE AIRE .....	60
4.3.2.7. SENSOR DE HUMEDAD.....	60
4.3.2.8. SENSOR DE TEMPERATURA. ....	61
4.3.2.9. SENSOR DE PRESIÓN .....	61
4.3.2.10. TARJETA DE ADQUISICIÓN DE DATOS .....	62
4.3.2.11. VARIADOR DE VOLTAJE .....	62
4.3.2.12. VATÍMETRO.....	63
<b>5. CAPITULO V. PROCEDIMIENTOS PARA EL ENSAYO DE BOMBAS DE CALOR EN EL BANCO DE PRUEBAS .....</b>	<b>65</b>
5.1. SOLICITUD PARA EL ENSAYO DE UN EQUIPO .....	66
5.2. ESTUDIO DE SOLICITUD DE ENSAYO .....	68
5.3. APROBACIÓN DE LA SOLICITUD ENSAYO .....	68
5.4. TRASLADO DEL EQUIPO .....	68
5.5. MONTAJE DEL EQUIPO AL BANCO DE PRUEBAS.....	68
5.6. REALIZACION DE ENSAYO .....	69
5.7. ADQUISICIÓN DE DATOS .....	70
5.8. CONSOLIDACION DE RESULTADOS.....	71
5.9. DOCUMENTACIÓN DEL ENSAYO .....	71
5.10. ENTREGA DE EQUIPO Y RESULTADOS.....	71
5.11. SISTEMA DE GESTIÓN DE CALIDAD PARA LABORATORIOS DE PRUEBAS Y ENSAYO .....	71
5.11.1. GESTIÓN DOCUMENTAL .....	71
5.11.2. CALIBRACION DE LOS EQUIPOS.....	72
5.11.3. CONFIDENCIALIDAD .....	72
5.11.4. CAPACITACIÓN .....	73
<b>6. CONCLUSIONES .....</b>	<b>74</b>
<b>7. FUENTES BIBLIOGRAFICAS .....</b>	<b>75</b>
<b>8. ANEXOS.....</b>	<b>78</b>

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. BOMBA DE CALOR AIRE-AIRE .....	13
FIGURA 2. BOMBA DE CALOR DE FUENTE DE AIRE .....	14
FIGURA 3. BOMBA DE CALOR DE FUENTE GEOTÉRMICA.....	15
FIGURA 4. CICLO DE REFRIGERACIÓN REAL .....	23
FIGURA 5. EQUIPO EMPRESA FORMEX S.A.S .....	26
FIGURA 6. BOMBAS DE CALOR ES ENERGÍA SOLAR LTDA.....	26
FIGURA 7. CONFIGURACIÓN BANCO DE PRUEBAS AIRES ACONDICIONADOS .....	33
FIGURA 8. CICLO DE REFRIGERACIÓN BÁSICO POR COMPRESIÓN.....	37
FIGURA 9. CONDICIONES REQUERIDAS .....	38
FIGURA 10. ESQUEMA DISEÑO CONCEPTUAL BANCO DE PRUEBAS. ....	38
FIGURA 11. CAMPUS UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA .....	47
FIGURA 12. BLOQUE 8. LABORATORIOS INGENIERÍA.....	48
FIGURA 13. DISTRIBUCIÓN ACTUAL LABORATORIO DE REFRIGERACIÓN Y CLIMATIZACIÓN .....	49
FIGURA 14. DISTRIBUCIÓN DE PLANTA CON ESPACIOS A TRABAJAR. ....	50
FIGURA 15. DISTRIBUCIÓN ESQUEMÁTICA DE LOS EQUIPOS UBICADOS EN CUARTO DE PRUEBAS Y CUARTO DE MAQUINAS. ....	51
FIGURA 16. VISTA FRONTAL DEL CUARTO DE PRUEBAS .....	53
FIGURA 17. VISTA SUPERIOR CUARTO DE PRUEBAS.....	54
FIGURA 18. TORRE DE ENFRIAMIENTO .....	55
FIGURA 19. BOMBA HIDRÁULICA .....	56
FIGURA 20. VÁLVULAS ESTRANGULADORA.....	56
FIGURA 21. VARIADOR DE VELOCIDAD .....	57
FIGURA 22. RESISTENCIA SUMERGIDA .....	58
FIGURA 23. RESISTENCIA ALETADA .....	58
FIGURA 24. HUMIDIFICADOR.....	59
FIGURA 25. MEDIDOR DE FLUJO.....	60
FIGURA 26. SENSOR DE FLUJO DE AIRE .....	60
FIGURA 27. SENSOR DE HUMEDAD .....	61
FIGURA 28. SENSOR DE TEMPERATURA .....	61
FIGURA 29. SENSOR DE PRESIÓN.....	62
FIGURA 30. TARJETA DE ADQUISICIÓN DE DATOS.....	62
FIGURA 31. VARIADOR DE VOLTAJE .....	63
FIGURA 32. VATÍMETRO .....	64

## LISTA DE TABLAS

<b>TABLA 1. COMERCIALIZADORES DE BOMBAS DE CALOR.....</b>	<b>25</b>
<b>TABLA 2. PRINCIPALES FABRICANTES BOMBAS DE CALOR UTILIZADAS EN EL PAÍS .....</b>	<b>25</b>
<b>TABLA 3. RECOPIACIÓN DE TESTIMONIOS INVESTIGACIÓN REALIZADA .....</b>	<b>27</b>
<b>TABLA 4. . NORMAS PARA EVALUACIÓN DE EQUIPOS DE PRODUCCIÓN DE FRIO .....</b>	<b>32</b>
<b>TABLA 5. MATRIZ DE SELECCIÓN PARA EL EQUIPO DE GENERACIÓN DE CALOR.....</b>	<b>40</b>
<b>TABLA 6. MATRIZ DE SELECCIÓN INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN TEMPERATURA .....</b>	<b>41</b>
<b>TABLA 7. MATRIZ DE SELECCIÓN PARA INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN DE FLUJO .....</b>	<b>42</b>
<b>TABLA 8. MATRIZ DE SELECCIÓN PARA LA FUENTE DE HUMEDAD. ....</b>	<b>43</b>
<b>TABLA 9. MATRIZ DE SELECCIÓN INSTRUMENTOS MEDICIÓN HUMEDAD .....</b>	<b>44</b>
<b>TABLA 10. MATRIZ DE SELECCIÓN MEDICIÓN PRESIÓN .....</b>	<b>44</b>

## **RESUMEN**

Este trabajo está dividido en cinco capítulos que explican brevemente los pasos necesarios para la realización de diseño básico del banco de pruebas para el banco de pruebas para bombas de calor de baja potencia (1 a 10kW) a escala de laboratorio. El primero capítulo habla de los conceptos teóricos relacionados con la bomba de calor y sus usos, tales como su funcionamiento y componentes, el ciclo de refrigeración, el COP, y finalmente los usos que se le dan a estos dispositivos en Colombia. El segundo capítulo consta de la política y normativa nacional e internacional alrededor de estos equipos, en especial sobre las condiciones sobre las cuales se deben de realizar las pruebas a ellos. El tercer capítulo es el diseño conceptual del banco de pruebas, en este capítulo se muestra el análisis teórico realizado sobre el funcionamiento del dispositivo y las variables esenciales que lo componen que irían directamente relacionadas a los ensayos en el banco. El cuarto capítulo es el diseño básico del banco de pruebas en cual se muestran planos del banco de pruebas con los instrumentos necesarios, y posteriormente se muestran los elementos seleccionados que harán parte del banco de pruebas. Finalmente el quinto capítulo lo compone una detallada explicación de cada uno de los pasos que se seguirán para la realización de los ensayos en el banco de pruebas.

## INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el consumo energético tiene una tendencia al incremento acelerando las emisiones de gases y residuos contaminantes generando así un impacto ambiental negativo, además la gran demanda energética en los sectores industriales, comerciales y residencial generan un constante agotamiento de las fuentes de energía, incrementando significativamente el costo de la energía debido a su poca oferta y su alta demanda.

La bomba de calor es una de las tecnologías más adecuadas para la recuperación de energía de baja calidad, que en la mayoría de los casos no es utilizada y es expulsada al ambiente. En la actualidad, las empresas manufactureras de bombas de calor alrededor del mundo ofrecen una muy amplia gama de productos, cada uno con sus respectivas especificaciones y fluidos de operación para satisfacer las necesidades del mercado. A nivel nacional se ha presentado un incremento de comercializadores de bombas de calor, pero al no ser un producto utilizado a gran escala, su comercialización se está realizando sin las normas adecuadas que garanticen las especificaciones o el desempeño de estos equipos. Por lo tanto, los usuarios muchas veces se ven sorprendidos por que las bombas de calor no alcanzan las capacidades especificadas o por sus bajos desempeños.

Las bombas de calor son equipos térmicos cuya capacidad o eficiencia se ve afectada por las condiciones climáticas. Debido a esto, es necesario realizar evaluaciones de estos equipos a diferentes condiciones de operación para establecer curvas de capacidad o desempeño. De tal manera, se hace necesario ofrecer a los comercializadores o fabricantes de bombas de calor, un laboratorio donde se pueda evaluar y especificar las características de los equipos en las condiciones que requiera el mercado.

En el caso del mercado en Colombia, las condiciones climáticas son particulares y dependen sustancialmente del piso térmico de la ciudad donde se pretenda operar la bomba de calor. Existen ciudades a nivel del mar, tales como Barranquilla, Cartagena o Santa Marta, donde las temperaturas promedio en el año puede ser de alrededor de 27 °C. Entre tanto, ciudades ubicadas por encima de los 2000 metros sobre el nivel del mar, tales como Bogotá, Tunja, Pasto, entre otras; las temperaturas promedio en el año pueden oscilar alrededor los 15° C.

Un usuario desearía conocer con relativa precisión cual debe ser la capacidad o la eficiencia en el lugar donde instalará una bomba de calor. Sin embargo, los fabricantes y comercializadores generalmente no entregan la información suficiente o la que está disponible no corresponde a las condiciones reales de utilización.

En Colombia no existen laboratorios para evaluar el desempeño de las bombas de calor. Las bombas de calor importadas poseen información a condiciones específicas para normas internacionales. Entre tanto, los fabricantes nacionales, estiman la capacidad basados en las características de los equipos individuales, tales como el compresor, condensador y evaporador; sin hacer evaluaciones del equipo como un conjunto, lo que no ofrece una información precisa del desempeño.

Mediante el diseño de un banco de pruebas para la caracterización de bombas de calor de baja potencia (1 a 10kW) a escala de laboratorio, se busca presentar las herramientas necesarias, las cuales, permitirán y facilitarán la estandarización de las bombas de calor de baja potencia por medio de una serie de procedimientos.

En un laboratorio adecuadamente acondicionado se puede evaluar el desempeño de las bombas de calor a diferentes condiciones climáticas, con el fin generar información de interés para el usuario que le permita tomar una decisión acertada en la selección de la bomba de calor más apropiada para su instalación.

La realización de este trabajo ofrecerá ventajas a diferentes niveles, tales como el industrial, ambiental y académico. Para los usuarios de las bombas de calor a nivel industrial, será posible la optimización de los procesos basándose en los datos presentes en los estudios realizados en el banco de pruebas previamente diseñado, y de este modo se facilitará la selección de la bomba que se necesita para un proceso en específico y se disminuirá el consumo de energía gracias a la buena utilización de la bomba debido a la caracterización realizada en el banco de pruebas. En cuanto al impacto ambiental en torno a la utilización las bombas de calor, se podrá ver afectado de manera positiva gracias a la caracterización de las bombas que se le realizará en el banco para que estas puedan ser utilizadas adecuadamente bajo la normativa que se presente. Finalmente en el ámbito académico, el diseño del banco de pruebas será un gran aporte para todo tipo de estudios que se fueran a realizar a futuro sobre las bombas de calor a escala de laboratorio, ya que gracias a este se podrá profundizar con mayor facilidad en las futuras investigaciones de estos dispositivos.

Mediante la elaboración de este diseño básico se pretende conseguir un banco de pruebas que permita realizarle ensayos a bomba de calor con el fin de determinar los usos de las bombas de calor en Colombia, la normativa nacional e internacional que rige a estos dispositivos, plantear un procedimiento para la evaluación de los equipos el cual permita la adquisición de datos para posteriormente realizar un análisis sobre el desempeño de la bomba de calor en cuestión.

## **OBJETIVOS**

### **Objetivo General**

- Realizar un diseño básico de un banco de pruebas para la caracterización de bombas de calor de baja potencia (1 a 10kW).

### **Objetivos Específicos**

- Determinar la normativa ambiental nacional e internacional relacionada con el uso de las bombas de calor.
- Determinar el de uso de las bombas de calor en Colombia como suministro de agua caliente en el sector residencial, comercial e industrial.
- Plantear un procedimiento para la caracterización a partir de los estándares internacionales.
- Elaborar un diseño básico de los subsistemas de generación de calor, sumidero de calor, producción de frío, control y adquisición de datos en el banco de calor.

## 1. CAPITULO I. CONCEPTOS Y GENERALIDADES DE LA BOMBA DE CALOR

Para comprender muchos de los términos que se utilizaran en este trabajo es necesario hacer referencia a muchos conceptos que estén ya sea directa o indirectamente relacionados con la bomba de calor tales como: La bomba de calor, el ciclo de refrigeración, el uso de las bombas de calor, entre otros.

### 1.1. BOMBA DE CALOR

La bomba de calor es una maquina térmica capaz de transferir calor de una fuente fría a otra fuente caliente o viceversa, para lograr esta acción, es necesario un aporte de trabajo, acorde a la segunda ley de la termodinámica, según la cual el calor se dirige de una forma espontánea de un foco caliente a otro frío [1].

Este fenómeno de transferencia de energía calorífica se realiza principalmente por medio de un sistema de refrigeración por compresión de gas refrigerante, cuya particularidad radica en una válvula inversora del ciclo que forma parte del sistema, la cual puede invertir el sentido del flujo del refrigerante, transformando el condensador en evaporador y viceversa. Tal como se observa en la Figura 1. [1]

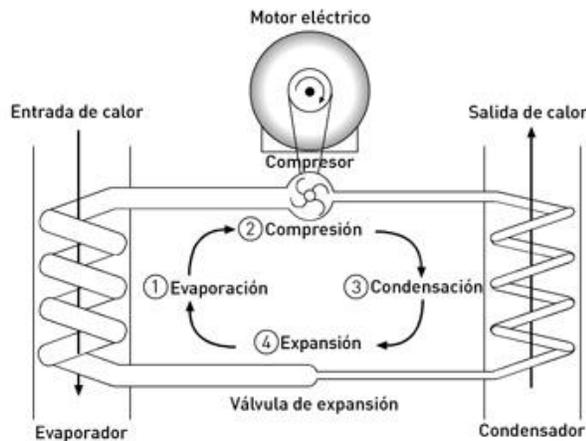


Figura 1. Bomba de calor aire-aire

Fuente: <http://www.empresaeiciente.com/es/catalogo-de-tecnologias/bomba-de-calor-industrial#ancla>

#### 1.1.1. CLASIFICACIÓN DE BOMBAS DE CALOR

A continuación se encuentra la clasificación de las bombas de calor de acuerdo con su fuente de funcionamiento extraídas de la tesis de maestría de Daniel Ospina [2].

Las bombas de calor se pueden clasificar teniendo en cuenta la naturaleza de las fuentes y el ciclo termodinámico. De acuerdo con la naturaleza de los fluidos las

bombas de calor pueden ser de aprovechamiento de aire caliente, de agua y geotérmicas (que aprovechan el calor presente en el interior de la tierra).

### 1.1.1.1. BOMBA DE CALOR DE FUENTE DE AIRE

Este equipo térmico aprovecha el aire de afuera de la bomba de calor como fuente de energía y la temperatura del aire interior, la bomba de calor puede aprovechar energía del aire a temperatura desde  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ , pero no con una alta eficiencia. Este tipo bombas requieren de calentadores eléctricos, por lo que no es un equipo que se fabrique a gran escala. El esquema de funcionamiento se muestra en la Figura 2.

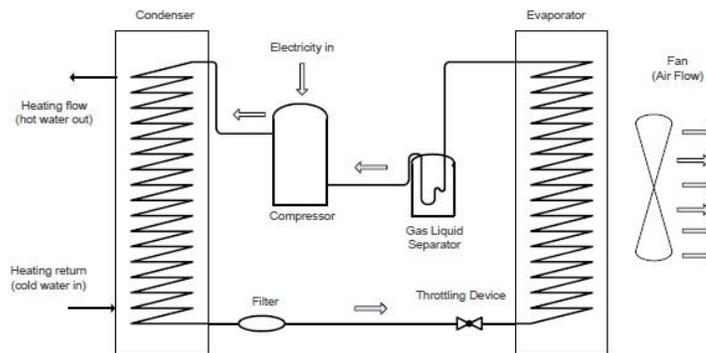


Figura 2. Bomba de calor de fuente de aire

Fuente: [http://www.ecoairpump.co.uk/images/air-source-heat-pump-images/Air\\_source\\_heat\\_pump\\_operating\\_principle.jpg](http://www.ecoairpump.co.uk/images/air-source-heat-pump-images/Air_source_heat_pump_operating_principle.jpg)

En la mayoría de los casos, el intercambio de calor se da forzando el aire a pasar por las serpentinas del evaporador, lo que aumenta notoriamente la eficiencia del proceso, y en la que muchos casos se utiliza como secador y a su vez se aprovecha para el proceso de la bomba de calor.

### 1.1.1.2. BOMBA DE CALOR DE FUENTE DE AGUA

Esta bomba de calor aprovecha la energía del agua, haciendo un intercambio de calor entre el agua o en muchos casos energía residual de las empresas, este tipo de bombas de calor normalmente se utilizan en edificios residenciales.

La principal configuración de este tipo de bomba es en lazo abierto, en el que la fuente de calor fluye por el evaporador suministrándole energía al refrigerante, y en cuanto al condensador se encuentra en un recinto cerrado suministrándole energía a un tanque de acumulación de agua para ser utilizada posteriormente. [3]

### 1.1.1.3. BOMBA DE CALOR DE FUENTE GEOTÉRMICA

La bomba de calor de fuente geotérmica capta calor acumulado en la corteza terrestre, las prestaciones y el funcionamiento de la bomba, van a depender en cada caso del medio ambiente en el que estén operando (focos fríos y calientes), en la mayoría de los casos el aprovechamiento de la energía térmica se hace por medio de agua como fluido refrigerante, el cual es bombeado hasta el evaporador de la bomba de calor la cual utiliza esta energía para el proceso. El esquema de funcionamiento se muestra en la Figura 3.

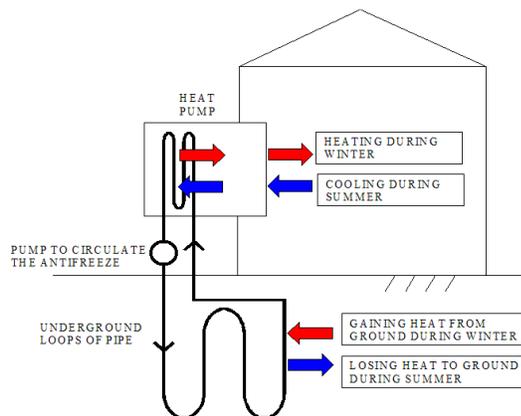


Figura 3. Bomba de calor de fuente geotérmica.

Fuente: [http://newenergydirection.com/blog/wp-content/uploads/2008/10/geothermal\\_heat\\_pump\\_schematic\\_figure1\\_gif.gif](http://newenergydirection.com/blog/wp-content/uploads/2008/10/geothermal_heat_pump_schematic_figure1_gif.gif)

la bomba de calor de fuente térmica es principalmente utilizadas en regiones donde hay estaciones , debido a que los cambios de temperatura bajo tierra no son muy drásticos como los del medio ambiente, lo que hace que la maquina tenga una eficiencia casi constante en el transcurso del año.

### 1.1.2. SUBCLASES DE BOMBAS DE CALOR

En la actualidad existen 4 tipos de subclases de bombas de calor. Estas subclases dividen a las bombas de calor según el fluido que ingresa el calor a la bomba y el fluido por el cual sale el calor como se puede observar en la figura 1.

#### 1.1.2.1. BOMBA DE CALOR AGUA-AGUA

La bomba de calor agua-agua manipula en su interior refrigerante, el mismo será adulterado en su presión y temperatura, la manipulación de estas variables en sus estados le permitirán al químico retirar calor del elemento que se encuentra en contacto con el mismo y liberarlo cuando se dé un cambio drástico de su estado. En

este caso el refrigerante tomara el calor del agua de manantial, rio o arroyo y la devolverá al sistema de agua de la casa, estos dos torrentes de agua no se relacionaran entre sí en el interior de la bomba solo tendrán conectando con el refrigerante que se encargara de retirar o entregar calor según se disponga.

#### **1.1.2.2. BOMBA DE CALOR AIRE-AIRE**

Una bomba de calor aire-aire, como su nombre lo indica, los dos elementos circulantes dentro del circuito de la bomba serán aire tomado y aire liberado, estos sistemas son capaces de enfriar como de calentar un ambiente y son ideales para aclimatar los espacios durante todo el año, las bombas de calor aire-aire son comercializadas diariamente y de gran aceptación en el medio, es decir, los aires acondicionados y aclimatadores que puede encontrar en las tiendas.

#### **1.1.2.3. BOMBA DE CALOR AIRE-AGUA**

El funcionamiento se basa en la obtención de calor del ambiente necesariamente del aire, y su traslado al agua. El aire es absorbido hacia la bomba por medio de sistemas de succión y trasladado al interior de la misma, allí el sistema implementado por la bomba de calor absorberá el mismo entregándolo al agua que también circula por la misma, utilizando como vehículo conductor el refrigerante. En el interior de la bomba el refrigerante cambiara de estado mediante un evaporador y un condensador, mientras su presión varía y se mantiene constante, controlando la liberación o entrega de calor al agua circulante. Este sistema es controlado y redirigido por válvulas espacialmente diseñadas convierten a la bomba de calor aire-agua en la opción ideal a la hora de aclimatar piscinas y calentar el agua de nuestra casa.

#### **1.1.2.4. BOMBA DE CALOR AGUA-AIRE**

Este tipo de bombas de calor tienen el mismo funcionamiento de las bombas aire-agua pero con los fluidos de entrada y salida están intercambiados, es decir, Permiten aprovechar la energía contenida en el agua de los ríos, mares, aguas residuales, etc. Y finalmente transferir esta energía a una fuente de aire para finalmente liberarlo a ambiente. Estas bombas de calor en particular producen unos rendimientos energéticos mejores que las que utilizan aire exterior.

### **1.1.3. COMPONENTES DE LA BOMBA DE CALOR**

Casi la totalidad de las bombas de calor actualmente utilizadas en los diversos sectores, terciario o industrial, son máquinas frigoríficas de compresión de vapor condensable. Sin embargo, para la elaboración de este trabajo se tendrá en cuenta la bomba de calor de fuente de agua, la cual está compuesta de los siguientes elementos extraídos del libro *La bomba de calor* [3]:

### **1.1.3.1. COMPRESOR**

La función específica de un compresor en una instalación frigorífica consiste en extraer todo el refrigerante evaporado del evaporador (a la presión de baja), y comprimirlo a una presión tal (presión alta), a la que pueda ser condensado por agentes normales (aire, agua, etc.) [3]

La bomba de calor de fuente de agua trabaja con un compresor alternativo el cual tiene un funcionamiento muy similar al motor de explosión de un automóvil: un motor, generalmente eléctrico, el cual acciona el cigüeñal al que van unidas unas bielas que dan un movimiento alternativo a los pistones, este movimiento alternativo permite realizar las diferentes fases de compresión. Constan de los siguientes elementos: Cáster, cigüeñal, pistones, bielas y válvulas. [3]

Los compresores alternativos se pueden clasificar de la siguiente forma:

- Horizontales: disposición horizontal de los pistones.
- Verticales: disposición vertical de los pistones.
- De simple efecto: una sola cara del pistón es activa, es decir, una vuelta del cigüeñal equivale a una aspiración más compresión.
- De doble efecto: las dos caras del pistón son activas, es decir, una revolución del cigüeñal equivale a dos aspiraciones más dos compresiones.
- Abiertos (o de carácter abierto): presentan la ventaja de poder ser accionados por cualquier tipo de motor (eléctrico, de gas, diésel, turbinas, etc.).
- Semi-herméticos.
- De simple escalón: la compresión se realiza en una sola etapa. Son los más utilizados.
- De múltiple escalón: la compresión se realiza en más de una etapa (dos, cuatro, ...)

### **1.1.3.2. CONDENSADOR**

El condensador de la bomba de calor es donde se recoge el efecto útil de la máquina, por el cual circula el fluido que se desea calentar, aire o agua, que a su vez posteriormente pueden ceder su calor a otro medio. [3]

La cantidad de calor evacuada en el condensador es:

- El calor sensible del vapor recalentado a la salida del compresor.
- El calor latente de condensación.
- El calor sensible de subenfriamiento del líquido.

Para la bomba de calor de fuente de agua se utilizan condensadores de agua, los cuales se dividen en dos tipos:

- De doble tubo a contracorriente:

En general son dos tubos de cobre, uno dentro del otro. El agua circula por el tubo interior y el refrigerante se condensa en el espacio intermedio. El tubo interior puede ser liso o aleteado en el exterior.

Este tipo de condensadores es muy utilizado en máquinas compactas hasta de 100kW de potencia térmica en el condensador. Da problemas de mantenimiento por la dificultad de limpieza.

- Multitubulares horizontales:

Los tubos están situados horizontalmente dentro de una virola; los tubos están unidos a dos placas laterales, con sendas tapas que forman las cajas de agua. El agua circula por el exterior de los tubos y el refrigerante se condensa en el interior.

Los tubos suelen ser de cobre, la envolvente de acero y las tapas de fundición, cuando el agua a calentar lo requiera, los tubos pueden ser inoxidable, cuproníquel, etc. [3]

### **1.1.3.3. EVAPORADOR**

La función del evaporador en una bomba de calor es tomar el calor de la fuente fría de que se dispone. El calor se extrae del fluido exterior que puede ser aire o agua. [3]

Los evaporadores usados en las bombas de calor, pueden ser:

- De expansión seca
- Inundados

En un evaporador de expansión seca, todo el líquido admitido es vaporizado y sale del evaporador ligeramente recalentado. Los vapores aspirados por el compresor son secos y el calor se absorbe de dos maneras:

- Por ebullición del líquido.
- Por recalentamiento del vapor.

En un evaporador inundado, éste está casi totalmente lleno de líquido y los vapores que salen son saturados e incluso pueden arrastrar algo de líquido.

En bombas de calor, solo se usan para muy grandes potencias.

En las bombas de calor, los tipos de evaporadores enfriadores de agua ms habituales son:

- Coaxiales a contracorriente.
- Multitubular a expansión seca.

- Multitubular inundado

*Coaxiales a contra corriente:* son semejantes a los condensadores a contracorriente. En los evaporadores, el fluido refrigerante circula por el tubo interior, y el agua circula por el espacio anular.

*Multitubulares a expansión seca:* Se componen de una virola de acero, que cuyo interior hay un haz de tubos. El refrigerante circula por el interior de los tubos, el agua por fuera. En el circuito del agua, existen unas placas deflectoras para obligar al agua a hacer un recorrido sinuoso.

*Multitubulares inundados:* En estos casos, el agua circula por el interior de los tubos y el refrigerante se evapora en el interior, dentro de la virola, la cual se encuentra casi llena de líquido. Para evitar arrastres de líquido, se introduce un dispositivo separador. [3]

#### **1.1.3.4. DISPOSITIVOS DE EXPANSIÓN**

Reducen la presión de condensación a la de evaporación. La operación se realiza por laminación del fluido, al pasar por un estrangulamiento: esta operación se realiza sin intercambio de calor ni realización de trabajo, y por consiguiente es a entalpía constante.

Los elementos más comúnmente utilizados en bombas de calor son: [3]

- Tubo capilar: son tubos de sección interior pequeña y calibrada.
- Válvula de expansión termostática: es un órgano de expansión automático, de manera que en realidad, cumple con las funciones de efectuar la expansión y de regular automáticamente la alimentación del líquido al evaporador.

#### **1.1.3.5. ÓRGANOS DE SEGURIDAD Y CONTROL**

Son los encargados de activar una señal o para el compresor en caso de que la máquina se encuentre trabajando fuera de las condiciones normales de funcionamiento. Los elementos más comúnmente utilizados son:

- Presostato de alta presión para detener el compresor cuando se alcanza una presión de condensación elevada.
- Presostato de baja presión para detener el funcionamiento de compresor también cuando esté presente una presión de aspiración muy por debajo de los estándares de funcionamiento.
- Presostato de aceite para detener el compresor cuando se encuentre muy baja la presión del aceite de engrase.

- Termostato de descarga que corta al compresor cuando la temperatura de descarga se encuentra muy alta.

#### **1.1.3.6. EQUIPOS AUXILIARES**

Los siguientes son equipos extras que pueden encontrarse en la actualidad:

- Válvula de inversión del ciclo o válvula de cuatro vías: estas válvulas tiene como misión invertir las funciones de los intercambiadores de calor exterior e interior. Son utilizadas para la inversión del ciclo y el desescarchado del evaporador.
- Válvulas solenoides. Es una válvula electromagnética que cierra el paso de líquido al evaporador, cuando el compresor se para, con el fin de evitar que el evaporador se inunde.
- Separador de aceite.
- Filtros deshidratador.
- Otros.

#### **1.1.3.7. REGULADOR DE POTENCIA**

Cuando las necesidades de calor son menores que la potencia que puede suministrar la bomba de calor, es necesario disponer de algún procedimiento de parcializar la potencia.

Existen varios tipos de reguladores de potencia, los principales son: [3]

- Todo-nada: la regulación más sencilla es por parada y puesta en marcha alternativamente.
- Todo-poco: se puede fraccionar la potencia total de la bomba en varios compresores. El mantenimiento de la temperatura se obtiene actuando todo o nada sobre los compresores.
- Variación de la velocidad del compresor: es poco usado en razón a su gran costo.
- By-pass de gas caliente: a través de una válvula se derivan gases caliente de la descarga a la aspiración. El consumo del compresor es el mismo que a plena potencia. Se usa en sistemas pequeños.
- Anulación de cilindros: Es un sistema muy utilizado para la regulación de potencia en compresores de pistón. Fundamentalmente consiste en facilitar el escape de los gases del cilindro de manera que éstos no se comprimen.
- Laminado de gas en aspiración: se origina una disminución de la presión de aspiración que da origen al aumento de la relación de compresión y la disminución del peso específico de los vapores. La potencia absorbida disminuye menos que la potencia calorífica.

- Corredera: es un dispositivo que se usa en los compresores de tornillo. La corredera se desplaza axialmente y descubre así una lumbrera en la pared interna del cilindro, de forma que una parte del gas aspirado retorna a la aspiración sin ser comprimido. [3]

## 1.2. REFRIGERANTES

Un refrigerante es cualquier cuerpo o sustancia que actúa como agente enfriador, absorbiendo calor de otro cuerpo o sustancia.

Aquellos que absorben calor al evaporador a baja temperatura y lo ceden al condensador a alta temperatura y presión, son llamados refrigerantes primarios; los refrigerantes secundarios, son cualquier líquido enfriado mediante un refrigerante y que circula como fluido de transferencia de calor [1].

Las características y propiedades termodinámicas de un refrigerante:

- Alto calor latente de vaporización, permite reducir el caudal másico circulante de refrigerante y tamaño de los equipos (compresor y tubería).
- Presión de trabajo moderada, evita la descomposición del lubricante y el asociado daño para el compresor.
- Tasa de compresión y exponente isoentrópico, al tener un menor exponente isoentrópico, el trabajo del compresor disminuye, siendo un ahorro energético.

## 1.3. COEFICIENTE DE DESEMPEÑO (COP)

El desempeño de refrigerantes y bombas de calor se expresa en términos del coeficiente de desempeño (COP), por sus siglas en inglés (coefficient of performance), el cual es definido de la siguiente manera: [1]

COP enfriamiento:

$$COP_R = \frac{\text{Salida deseada}}{\text{Entrada requerida}} = \frac{\text{Efecto de enfriamiento}}{\text{Entrada de trabajo}} = \frac{Q_L}{W_{\text{neto entrada}}} \quad (1)$$

COP calentamiento:

$$COP_{BC} = \frac{\text{Salida deseada}}{\text{Entrada requerida}} = \frac{\text{Efecto de calentamiento}}{\text{Entrada de trabajo}} = \frac{Q_H}{W_{\text{neto entrada}}} \quad (2)$$

Estas relaciones también pueden ser expresadas en forma de tasa sustituyendo las cantidades de  $Q_L$ ,  $Q_H$  y  $W_{\text{neto entrada}}$  por  $\dot{Q}_L$ ,  $\dot{Q}_H$  y  $\dot{W}_{\text{neto entrada}}$ . Ambas cantidades de  $COP_R$  y  $COP_{BC}$  pueden ser mayores que 1.

Adicionalmente, basándose en las ecuaciones 1 y 2 se puede obtener la ecuación 3:

$$COP_{BC} = COP_R + 1 \quad (3)$$

De la anterior ecuación podemos ver que  $COP_{BC} > 1$  puesto que  $COP_R$  es una cantidad positiva.

El COP para el calentamiento y para el enfriamiento es diferente, cuando es necesario calcular el COP de un equipo que enfría, es la relación entre el calor removido de la fuente fría y el trabajo aplicado. Sin embargo, para un equipo que calienta, el COP se calcula

#### 1.4. REFRIGERACION

Es necesario hacer hincapié en el proceso de refrigeración, y para esto se basa en el libro de termodinámica de Cengel [1].

La refrigeración es un proceso que consiste en bajar o mantener el nivel de calor de un cuerpo o un espacio. Refrigerar es un proceso termodinámico en el que se extrae calor del objeto considerado (reduciendo su nivel térmico), y se lleva a otro lugar capaz de admitir esa energía térmica sin problemas o con muy reducidos problemas, como en el caso de la bomba de calor esta energía es aprovechable.

##### 1.4.1. EL CICLO IDEAL DE REFRIGERACIÓN POR COMPRESIÓN DE VAPOR

Muchos de los aspectos imprácticos asociados con el ciclo de refrigeración pueden ser eliminados al evaporar el refrigerante por completo antes de que se comprima, ya al sustituir la turbina por un dispositivo de estrangulamiento, tal como una válvula de expansión o tubo capilar. El ciclo que resulta se denomina ciclo ideal de refrigeración por compresión de vapor, y se muestra de manera esquemática y en un diagrama  $T$ - $s$  en la figura 3. [1]

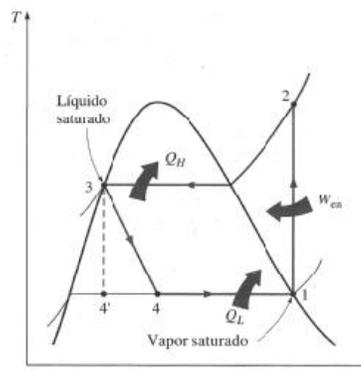


Figura 3. Ciclo de refrigeración ideal

Fuente: [http://www.unet.edu.ve/~fenomeno/F\\_DE\\_T-152.htm](http://www.unet.edu.ve/~fenomeno/F_DE_T-152.htm)

1-2 Compresión isoentrópico en el compresor. El refrigerante entra al compresor como vapor saturado y se comprime isoentropicamente hasta la presión del condensador. La temperatura del refrigerante aumenta mediante el proceso de compresión isoentrópico.

2-3 Rechazo de calor a presión constante en el condensador. El refrigerante entra en el condensador como vapor sobre calentado y sale como liquido saturado como resultado de rechazo de calor hacia los alrededores (energía útil), en el cual no se tiene en cuenta caídas de presión en el condensador.

3-4 Estrangulación en un dispositivo de expansión. El refrigerante como liquido saturado después del condensador se estrangula hasta la presión del evaporador al pasar por una válvula de expansión o por un tubo capilar. La temperatura del refrigerante desciende por debajo de la temperatura de la fuente de energía.

4-1 Absorción de calor a presión constante en el evaporador. El refrigerante entra al evaporador como un vapor húmedo de baja calidad, y se evapora por completo absorbiendo calor de la fuente de energía. El refrigerante sale del evaporador como vapor satura para ingresar nuevamente al compresor para volverse a realizar el ciclo. [1]

#### 1.4.2. EL CICLO REAL DE REFRIGERACIÓN POR COMPRESIÓN DE VAPOR

Un ciclo real de refrigeración por compresión de vapor se diferencia de uno ideal en varios aspectos, principalmente, debido a las irreversibilidades que ocurren en varios componentes. Cuando se habla de irreversibilidad se dice de aquella energía que se pierde en el proceso, la cual no se puede aprovechar y es inherente al proceso como lo es la fricción del fluido (caídas de presión) y la transferencia de calor hacia o desde los alrededores. El ciclo real de refrigeración por compresión de vapor se muestra en un diagrama T-s en la figura 6. [1]

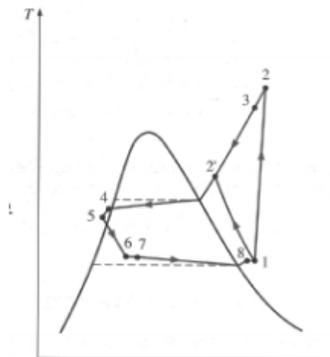


Figura 4. Ciclo de refrigeración real

El proceso de compresión real incluirá efecto de fricción, lo cual la entropía puede incrementar (1-2) o disminuir (1-2') y aumentar la transferencia de calor.

El refrigerante ingresa al condensador (2-5) como vapor sobre calentado, cuando el refrigerante está en el proceso de condensación hay una disminución de la temperatura debido a que no es un proceso a presión constante.

La válvula de expansión (5-6) es un equipo el cual estrangula el refrigerante para tumbarle la presión y a su vez la temperatura para las condiciones de funcionamiento del evaporador.

El refrigerante entra al evaporador (6-1) en donde el fluido gana energía de la fuente de energía. En la que se tiene que asegurar que el refrigerante sale como vapor sobre calentado para garantizar el funcionamiento del compresor. [1]

### **1.5. USO DE LAS BOMBAS DE CALOR EN COLOMBIA**

A pesar de que Colombia se encuentra en una zona tórrida, los climas presentes en el territorio colombiano son de gran variedad. Se encuentran ciudades con climas muy cálidos y tropicales como Santa Marta y Cartagena, y de igual manera también se encuentran ciudades con climas muy fríos tales como Bogotá, Tunja y Pasto.

Se realizó una investigación en las tres principales ciudades del país con el fin de conocer sobre los equipos que se utilizan, donde se fabrican y el uso que se les da. Dicha investigación consistió en la una recopilación de información mediante llamadas telefónicas a compañías que se encargan de la comercialización de las bombas de calor en el país, principalmente se consultaron compañías en Bogotá, Medellín y Calí.

A continuación en la tabla 1 se encuentran las empresas con las que se realizó la investigación.

**Tabla 1. Comercializadores de bombas de calor**

<b>Empresa</b>	<b>Ciudad</b>
<b>CALORCOL S.A.S</b>	Medellín
<b>AIR SHOP</b>	Bogotá
<b>SERÍN LTDA</b>	Bogotá
<b>DRI DE COLOMBIA S.A.S</b>	Medellín
<b>TECNISERVICIO</b>	Medellín
<b>ACONDICIONAR INGENIEROS</b>	Cali
<b>MTC LTDA</b>	Cali
<b>INVERPRIMOS</b>	Medellín
<b>AIRE CONFORT JC S.A.S</b>	Cali
<b>ES ENERGÍA SOLAR LTDA</b>	Medellín
<b>FORMEX S.A.S</b>	Medellín
<b>JVTEL</b>	Bogotá

Con la investigación realizada, se puede afirmar que los equipos principalmente utilizados en el país son provenientes de Estados Unidos, presentan la configuración aire-agua (explicada anteriormente) y los usos principales que se les da son: climatización de piscinas y de uso diario como duchas y cocina, también son utilizadas a nivel nacional como otras alternativas de aires acondicionados.

A continuación en la tabla 2 se encuentran recopilados los fabricantes cuyos equipos son los más usados con los fines anteriormente mencionados en Colombia de acuerdo con la investigación realizada:

**Tabla 2. Principales fabricantes bombas de calor utilizadas en el país**

<b>Fabricante</b>	<b>Potencia</b>	<b>Refrigerante</b>	<b>COP</b>
<b>CARRIER</b>	0.5-6 TR (2-21 Kwh)	R-410A	3.8
<b>DUNHAM BUSH</b>	7-127 TR (25-447 Kwh)	R-22	5.6
<b>TRANE</b>	1-7 TR (4-25 Kwh)	R-410A	5

Adicionalmente, en la investigación realizada se encontraron dos fabricantes de bombas de calor en la ciudad de Medellín: FORMEX S.A.S y ES ENERGÍA SOLAR LTDA.

FORMEX S.A.S [4] es una compañía que está en el mercado desde 1992 y tiene como razón de ser la fabricación y comercialización de bombas de calor a nivel nacional. El uso principal de su producto es el calentamiento de agua, ya sea a nivel industrial o residencial. Sus principales clientes. Entre sus productos ofrecen bombas de calor con potencias desde 1TR a 100TR con fluidos de trabajo R22, R134, R410-A.

A continuación se encuentran varias de las bombas calor, también conocidas en el medio como unidades de condensación por paquetes, de la empresa FORMEX S.A.S



Figura 5. Equipo empresa FORMEX S.A.S

ES ENERGÍA SOLAR LTDA [5] es una compañía que desde 1998 también se dedica a la fabricación y comercialización de bombas de calor para el uso nacional. Sus productos son principalmente utilizados para el calentamiento de agua de piscinas. Las potencias de sus equipos oscilan entre 5TR-120TR y utilizan principalmente como fluidos refrigerantes R22 y R410-A.



Figura 6. Bombas de calor ES Energía Solar LTDA.

La figura 6 ilustra una bomba de calor que es utilizada para la climatización de una piscina en una unidad residencial de Medellín (izquierda). Bomba de calor para el calentamiento de agua de uso residencial (derecha).

### **1.6. VENTAJAS DE LAS BOMBAS DE CALOR AGUA-AIRE**

Al realizar la investigación se recolectaron varios testimonios tanto de los fabricantes locales como de los comercializadores, entre ellos FORMEX S.A.S., ES ENERGÍA SOLAR

LTDA. E INVERPRIMOS, dichos testimonios afirman que las bombas de calor tipo agua-aire presentan varias ventajas sobre los demás tipos de bombas de calor.

A continuación en la tabla 3 se encuentran recopilados los testimonios de algunas de las compañías a quienes se consultó durante la investigación sobre las bombas de calor, más específicamente, se encuentran consignados los testimonios sobre las ventajas de las bombas de calor agua-aire sobre los demás tipos existentes.

**Tabla 3. Recopilación de testimonios investigación realizada**

<b>Fecha</b>	<b>Compañía</b>	<b>Cargo de quien proporciona testimonio</b>	<b>Testimonio</b>	<b>Función con respecto a la bomba de calor</b>
<b>29-Jun</b>	INVERPRIMOS	Asesor de ventas	"El agua como fuente para obtener es mucho más conveniente que muchos otros medios"	Comercializadores
<b>29-Jun</b>	ACONDICIONAR INGENIEROS	Representante de ventas	"Los paquetes agua-aire son los más comercializados a los demás que ofrecemos"	Comercializadores
<b>29-Jun</b>	AIR SHOP	Atención al cliente	"El consumo de energía de estas bombas es mucho menor a las demás que ofrecemos"	Comercializadores
<b>30-Jun</b>	FORMEX	Supervisor de planta	"Es muy fácil alcanzar temperaturas bajas y altas con estas bombas de calor"	Fabricantes y comercializadores
<b>30-Jun</b>	ENERGIA SOLAR ES	Gerente de planta	"Este tipo de bombas de calor son muy fáciles de acondicionar a fuentes de agua calientes para aprovechar esa energía"	Fabricantes y comercializadores

Desde un punto de vista más ingenieril, las bombas de calor agua-aire presentan las siguientes ventajas:

- Para el enfriamiento, se puede alcanzar temperaturas aún más bajas en el condensador gracias al excelente intercambio de calor que existe entre el agua y el refrigerante de trabajo.

- En cuanto al calentamiento, este tipo de bombas de calor presenta dos ventajas sobre las demás. La primera es la facilidad con la que se puede aprovechar los calores residuales de fuentes de agua para de este modo utilizar esta energía. La segunda ventaja consiste en el buen intercambio de calor que hay entre el agua y el refrigerante que contribuye enormemente en el condensador para alcanzar temperaturas más altas lo cual conlleva a un mejor COP.

Adicionalmente, entre las bombas de calor utilizadas para el enfriamiento, es decir, las que se utilizan como aires acondicionados, las bombas de calor agua-aire resultan más rentables como una inversión a largo plazo a comparación de las demás bombas. Esto es porque a pesar de que estos equipos son más costosos que los demás, su consumo energético es mucho menor. Por lo tanto, estas bombas resultan siendo una mejor alternativa a largo plazo económicamente hablando que las demás bombas de calor.

De acuerdo con lo mencionado anteriormente, es válido mencionar que el uso de estos dispositivos es variado y teniendo su principio de funcionamiento permite partir al análisis de la política y normativa que giran en torno a estos equipos.

## **2. CAPITULO II POLITICAS Y NORMATIVA**

En la actualidad existe gran variedad de normas que rigen a las bombas de calor. A continuación se presenta la normativa existente relacionada con las bombas de calor.

En este caso, es de vital importancia basarse en la normativa existente que rige y regula las bombas de calor nacional e internacionalmente. Adicionalmente, es necesario hacer hincapié en la normativa existente sobre los ensayos que se le realizan a estos dispositivos para que de este modo pueda realizarse un diseño consecuente con lo existente.

### **2.1. POLITICA**

#### **2.1.1. POLÍTICAS DE EFICIENCIA ENERGÉTICA EN COLOMBIA**

El incremento en la demanda mundial de recursos energéticos es consecuencia del estándar de vida deseado por la sociedad y del crecimiento del sector productivo. Nuestro país no es ajeno a este comportamiento. La energía en Colombia tiene una influencia significativa en la economía nacional, tanto como fuente generadora de divisas, como insumo importante en los procesos productivos.

El estado Colombiano ha tenido que crear y adoptar normas y leyes para un adecuado uso de la energía, para tener un control del consumo y la explotación de los recursos energéticos. También en las que se quiere promover el máximo aprovechamiento de los recursos, evitando desechos y uso innecesario de energía, con el fin de formar empresas más competitivas y mejorar la calidad del medio ambiente.

A continuación se presenta una recopilación de la normatividad vigente que está relacionada con la necesidad de promover una cultura más consciente a través de la promoción del uso racional y eficiente de la energía y el desarrollo de fuente no convencionales de energía. [6]

##### **2.1.1.1. LEY 697 DE 2001 (LEY URE)**

La ley 697 de 2001, declara que el uso racional y eficiente de la energía es un asunto de interés social, público y de conveniencia nacional, con el fin de garantizar un suministro energético, pleno y oportuno, competitividad en la economía nacional, protección al consumidor y promoción de la fuentes no convencionales de energía. También se establecen lineamientos y políticas, estrategias y herramientas, mediante la creación del programa de Uso Racional y Eficiente de la Energía y demás formas de energía no convencional –PROURE, para fomentar la divulgación y promoción del uso racional y eficiente de la energía. [6]

### **2.1.1.2. LEY 508 DE 1999**

Propende por el uso eficiente de la energía en el país, el remplazo de fuentes ineficientes y la optimización de convertidores de energía. [6]

### **2.1.1.3. DECRETO 2501 DE 2007 (PROMOCIÓN URE)**

Este decreto propicia el Uso Racional y Eficiente de la Energía, mediante la expedición de reglamentos técnicos orientados al etiquetado de eficiencia energética para equipos de uso final de energía eléctrica y al mejoramiento de la eficiencia energética en viviendas, alumbrado público, instalaciones de iluminación y sistemas de semaforización asignando a los Ministerios de Minas y Energía, de Comercio, Industria y Turismo, de Ambiente y Desarrollo Sostenible y de Vivienda Ciudad y Territorio. [6]

### **2.1.1.4. RESOLUCIÓN 180919 DE 2010 (PLAN DE ACCIÓN INDICATIVO DEL PROURE)**

Mediante esta resolución el Ministerio de Minas y Energía adopta el Plan de Acción Indicativo 2010 – 2015 para desarrollar el PROURE, este Plan de Acción tiene como objetivo general el contenido en la Ley 697 de 2001, es decir, contribuir a garantizar el abastecimiento energético pleno y oportuno, la competitividad de la economía, la protección al consumidor y la promoción del uso de fuentes no convencionales de energía.

[4]

### **2.1.2. ETIQUETADO DE EFICIENCIA ENERGÉTICA.**

El etiquetado de eficiencia energética es un mecanismo de información para el consumidor, el cual tiene como objetivo brindar conocimiento de la eficiencia energética de los equipos. Permitiendo al consumidor identificar los productos que tienen menor impacto ambiental en su vida de útil. [7]

Cada vez las empresas tienen una mayor participación en la responsabilidad ambiental, creando una rápida adaptación a las diferentes normativas y tendencias ambientales mundiales.

En Colombia se ha optado por la implementación del mecanismo de etiquetado de eficiencia energética de aparatos de uso final de energía eléctrica y gas combustible con el reglamento RETIQ. [8]

### **2.1.2.1. REGLAMENTO TÉCNICO DE ETIQUETADO. RETIQ**

La finalidad del reglamento técnico de etiquetado RETIQ es fomentar el uso racional y eficiente de energía en equipos que usan energía eléctrica y gas combustible, mediante el etiquetado de los equipos con información de desempeño y consumos

energético. Garantizando que los consumidores dispongan de toda la información necesaria y crear cultura del uso adecuado de energía.

El reglamento tiene todas las herramientas para la creación del etiquetado, desde los rangos de eficiencia de clasificación, hasta el procedimiento para evaluar los equipos.

En el caso de equipos de aires acondicionados el procedimiento debe aplicar el método de ensayo adaptado de la norma NTC 5380:2005-10-26 “Acondicionadores de aire y bombas de calor sin conductos. Ensayo y determinación de características de desempeño”, la cual corresponde con la adopción idéntica por traducción de la norma ISO 5151. En la que se muestra las condiciones que se tienen que generar para el ensayo, las variables a medir y el procedimiento a efectuar para permitir una adecuada clasificación.

## **2.2. NORMATIVA**

### **2.2.1. IMPORTANCIAS DE EVALUAR LOS EQUIPOS DE PRODUCCIÓN DE FRIO**

El gran incremento en la demanda de equipos de producción de frío a nivel nacional, ha ocasionado un crecimiento de empresas fabricantes y comercializadoras de aires acondicionados. Con la amplia variedad de dispositivos que ofrece el mercado, es complicado decidir que opción es la más adecuada para cada necesidad. Por esta razón, es importante tener datos fiables para garantizar el cumplimiento de los datos especificados por el fabricante.

Para poder garantizar el desempeño especificado en la ficha técnica de los equipos, es necesario evaluarlos. Para ello es conveniente disponer de normas que indiquen como deben realizarse los ensayos, para asegura que las pruebas se realicen siempre a las mismas condiciones.

En bombas de calor y aire acondicionado con accionamiento eléctrico, pueden ser evaluados y clasificados con las siguientes normas contenidas en la tabla, aunque existen muchas otras.

**Tabla 4. . Normas para evaluación de equipos de producción de frío**

NORMA	TITULO
<b>ARI 340/360</b>	PERFORMANCE RATING OF COMMERCIAL AND INDUSTRIAL UNITARY AIR- CONDITIONING AND HEAT PUMP EQUIPMENT [9]
<b>ARI 320</b>	WATER- SOURCE HEAT PUMPS [10]
<b>NT VVS 076</b>	LARGE HEAT PUMPS: FIELD TESTING AND PRESENTATION OF PERFORMANCE [11]
<b>NBN EN 14511-2</b>	AIR CONDITIONERS, LIQUID CHILLING PACKAGES AND HEAT PUMPS WITH ELECTRICALLY DRIVEN COMPRESSORS FOR SPACE HEATING AND COOLING - PART 2: TEST CONDITIONS [12]
<b>ARI 290</b>	AIR-CONDITIONING AND HEAT PUMP EQUIPMENT INCORPORATING POTABLE WATER HEATING DEVICES [13]
<b>ARI 390</b>	PERFORMANCE RATING OF SINGLE PACKAGE VERTICAL AIR- CONDITIONERS AND HEAT PUMPS [14]
<b>ARI 1160</b>	PERFORMANCE RATING OF HEAT PUMP POOL HEATERS [15]
<b>ARI 210/240</b>	PERFORMANCE RATING OF UNITARY AIR- CONDITIONING AND AIR- SOURCE HEAT PUMP EQUIPMENT [16]
<b>ARI 310/380</b>	STANDARD FOR PACKAGED TERMINAL AIR-CONDITIONERS AND HEAT PUMPS [17]
<b>NTC 5380</b>	ACONDICIONADORES DE AIRE Y BOMBAS DE CALOR SIN CONDUCTOS. ENSAYO Y DETERMINACIÓN DE CARACTERÍSTICAS DE DESEMPEÑO

Las bombas de calor y aires acondicionados accionados por compresor eléctrico y condensados por agua pueden ser evaluado por diversas normas, pero la norma americana ANSI/ARI 320 es el estándar es más apropiado para la evaluación y caracterización de estos equipos, debido a que contiene procesos de evaluación de normas mencionadas en la tabla anterior. También nos permite emplear otras normas con pequeñas modificaciones en el proceso.

### **2.2.2. CONDICIONES DE ENSAYO ESTANDAR NTC 5380**

Para la prueba de desempeño de los equipos se deben garantizar a las siguientes condiciones:

- Las condiciones de entrada del aire al equipo deben ser de 26.6°C de bulbo seco y 19.5°C de bulbo húmedo.
- La temperatura alrededor de los equipos tiene que ser la misma temperatura al ingreso del mismo.
- La presión para la realización del ensayo es de 101,325 KPa.
- La velocidad del aire no puede exceder los 2.5 m/s.

En el siguiente esquema se muestra la configuración del banco de prueba para los equipos de aire acondicionado. En donde hay una recirculación del aire del recinto, midiendo la temperatura del aire a la entrada y salida del equipo a prueba, consumo eléctrico y humedad para garantizar las condiciones del aire.

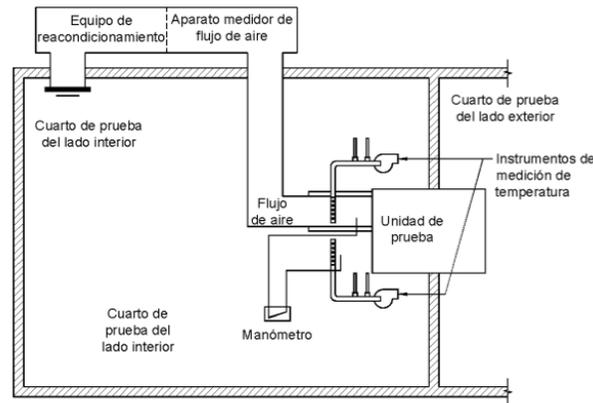


Figura 7. Configuración banco de pruebas aires acondicionados

Las mediciones tienen que ser tomadas después de 12 minutos de funcionamiento del compresor.

El cálculo de la eficiencia energética se realiza mediante el método de entalpía, mediante un balance de energía, obteniendo los datos mediante la medición de la temperatura del bulbo seco y húmedo de entrada y de salida, y la razón de flujo de aire asociado. [18]

### 2.2.3. NORMAS DE LABORATORIOS ISO 17025

Es una normativa internacional que se establecen los requisitos que deben cumplir los laboratorios de ensayo y calibración. Se trata de una norma de Calidad, cubre los ensayos y calibraciones que se realizan utilizando métodos normalizados, métodos no normalizados y métodos desarrollados por el propio laboratorio.

Esta norma es aplicada a todos los laboratorios, independiente de la cantidad de empleados o de la extensión del alcance que tengan las actividades de ensayos o calibración. [19]

## **2.2.4. CONDICIONES DE CARACTERIZACIÓN ESTÁNDAR ANSI/ARI 320**

Condiciones de evaluación para producción de frío

### **Evaporador**

- Temperatura del aire a la entrada de unidad evaporadora 80°F [26.7°C] bulbo seco y 67°F [19.4°C] bulbo húmedo.

### **Condensador**

- Temperatura del agua ingresando al circuito condensador 85°F [29.4°C].
- Temperatura del agua abandonando circuito condensador 95°F [35.0°C].
- El flujo másico de agua en el condensador tiene que ser el adecuado para que garantice las condiciones de temperatura a la entrada y la salida del condensador.

### **2.2.4.1. ENSAYO DE CONDICIONES MÁXIMAS DE OPERACIÓN**

#### **Evaporador**

- Temperatura del aire a la entrada de unidad evaporadora 95°F [35.0°C] bulbo seco y 71°F [21.7°C] bulbo húmedo.

#### **Condensador**

- Temperatura del agua ingresando al circuito condensador 95°F [35.0°C].
- El caudal volumétrico de agua tiene que a las mismas condiciones del ensayo Condiciones de caracterización estándar.

### **2.2.4.2. ENSAYO DE FUNCIONAMIENTO A BAJA TEMPERATURA**

#### **Evaporador**

- Temperatura del aire a la entrada de unidad evaporadora 67°F [19.4°C] bulbo seco y 57°F [13.9°C] bulbo húmedo.

#### **Condensador**

- Temperatura del agua ingresando al circuito condensador 65°F [18.3°C].

- El caudal volumétrico de agua tiene que a las mismas condiciones del ensayo Condiciones de caracterización estándar.

### **2.2.4.3. CONDICIONES ELÉCTRICAS**

La evaluación de los equipos se realiza de acuerdo con lo especificado en la placa del equipo por el fabricante en voltaje y frecuencia.

En caso de que la placa del equipo tenga diferentes valores de funcionamiento, será probado con los diferentes valores o con el valor menor.

#### **Voltaje**

- El ensayo deberá ser realizado a un 90% y un 110% del voltaje especificado en por la placa del equipo y se trabaja a la frecuencia a la que se recibe el voltaje.
- Habrá un corte de energía hasta que el compresor este estático, el cual no debe de exceder los 5s. Luego se restaurará el flujo de la energía para continuar con la prueba.
- Entre un minuto después de que el equipo esté en funcionamiento, el voltaje será restaurado al especificado por la placa del equipo.

### **2.2.4.4. ESPECIFICACIONES DE EVALUACIÓN**

Antes de poder iniciar los ensayos para la evaluación de las prestaciones de cualquier equipo, es preciso cumplir los siguientes requisitos:

- La unidad a ensayarse debe ser instalada de acuerdo a las instrucciones indicadas por el fabricante.
- Los circuitos conectados a los equipos deben limpiarse de acuerdo a lo indicado por el fabricante, con el fin de garantizar que la superficie de transferencia de calor este completamente limpia.
- La variación máxima en la medición del aire (bulbo húmedo y bulbo seco) permitida  $\pm 1.0^{\circ}\text{F}$  [ $\pm 0.6^{\circ}\text{C}$ ].
- La tolerancia permitida para la temperatura del agua es  $\pm 0.5^{\circ}\text{F}$  [ $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ ].
- El máximo error estipulado es del  $\pm 1\%$  para el voltaje.
- El caudal del equipo es el especificado por el fabricante.

### **2.2.4.5. PROCEDIMIENTO DE ENSAYO**

El equipo deberá está en funcionamiento por dos horas a las condiciones de temperatura y voltaje especificado.

Todo el equipo deberá tener un desabastecimiento de energía hasta observar el compresor inmóvil y posteriormente restaurar el suministro de energía.

#### **2.2.4.6. REQUERIMIENTOS**

Durante el ensayo el equipo deberá funcionar sin ningún tipo de falla de cualquier tipo.

Los equipos deberán operar sin ningún tipo de interrupción por ninguna razón por un periodo de dos horas antes del corte de energía.

Posteriormente al corte de energía, se debe restaurar el suministro de energía y dejar en operación durante 2 horas.

#### **2.2.4.7. ADQUISICIÓN DE DATOS**

El análisis térmico para los equipos a evaluar precisa de los siguientes datos:

- Temperatura a la entrada del evaporador.
- Temperatura a la salida del evaporador.
- Temperatura a la entrada del condensador.
- Temperatura a la salida del condensador.
- Caudal de agua al ingreso del condensador.
- Flujo de aire al ingreso del evaporador.
- Humedad del aire a la entrada del evaporador.

Finalmente, en base a todo lo mencionado anteriormente sobre la política y la normativa que existe en la actualidad, ya se puede plantear un diseño conceptual sobre lo que sería el banco de pruebas bajo criterios establecidos por la norma ARI 320, ya que para efectos del diseño del banco de pruebas, este estándar presenta claramente unos parámetros bajo los que se podrían evaluar las bombas de calor para de este modo obtener resultados coherentes.

### 3. CAPITULO III. DISEÑO CONCEPTUAL

A continuación se presenta, conceptualmente, lo correspondiente al diseño del banco de las pruebas para bombas de calor en base a criterios establecidos previamente por normativa anteriormente mencionada. El diseño conceptual que se presenta a continuación es en base al estándar ARI 320 presentado en el capítulo anterior.

Los equipos de producción de frío convencionales trabajan generalmente con tres fuente de energía: la fuente de energía de activación, empleada para el funcionamiento del compresor, la de disipación de calor a una temperatura próxima a la temperatura ambiente y la de la carga refrigerante cuya temperatura depende de la aplicación.

El ciclo básico de refrigeración por compresión se muestra en la figura 8:

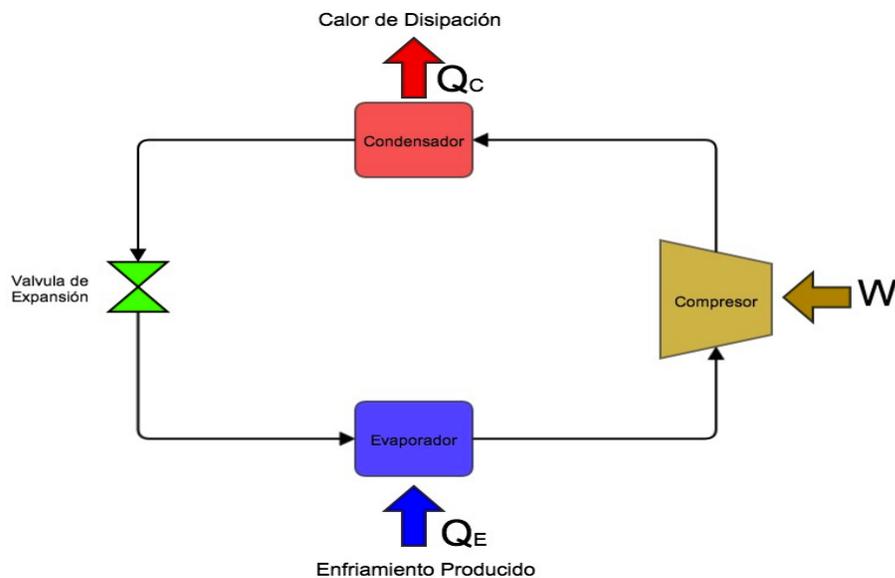


Figura 8. Ciclo de refrigeración básico por compresión.

En la figura 9 se muestran las condiciones de temperatura requeridas. El calor que el equipo tiene evacuar y la energía de activación ( $W$ ). El calor que extrae el equipo del área a refrigerar o climatizar ( $Q_E$ ), la temperatura  $T_E$  es a la cual se necesita llegar dependiendo de la aplicación y  $Q_C$  es el calor que se debe evacuar para condensar el vapor de refrigerante que sale del compresor. El balance de energía en el equipo, sin tener en cuenta las pérdidas térmicas es la siguiente:

$$Q_E + W = Q_C$$

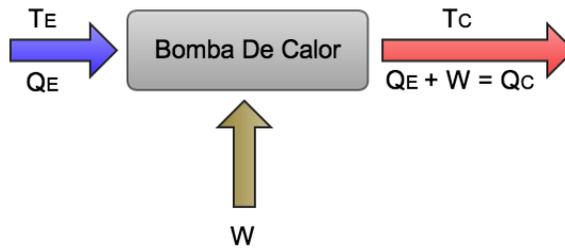


Figura 9. Condiciones requeridas

Para el desarrollo de los ensayos de los equipos de producción de frío por compresión, el banco de pruebas debe tener un suministro de energía eléctrica  $W$  y de este modo activar el compresor, generar la carga térmica requerida para el evaporador  $Q_E$  y evacuar el calor  $Q_C$  del condensador a las condiciones de caudal y temperatura requeridas por el ensayo.

En la Figura 10 se muestra un diseño conceptual del banco de pruebas para bombas de calor agua-aire. En dicho esquema se muestran los diferentes elementos conectados a el equipo a ensayar, estos elementos son los que se utilizaran para garantizar las condiciones que la norma exige para la elaboración de ensayos con equipos de esta naturaleza.

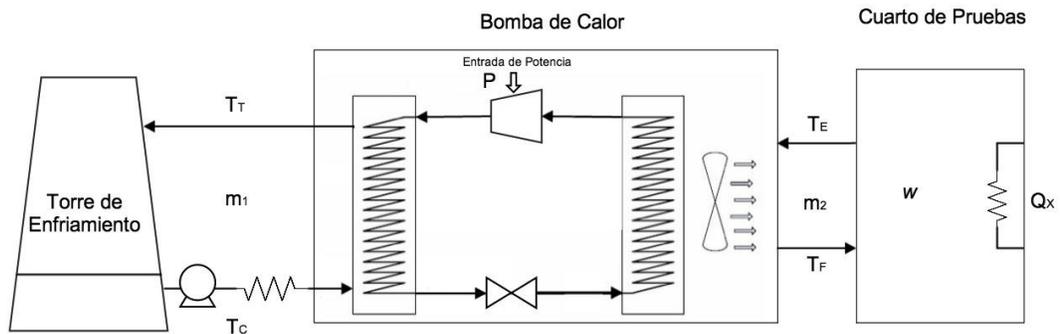


Figura 10. Esquema diseño conceptual banco de pruebas.

El sistema de disipación de calor, el cual va a garantizar la temperatura del agua ( $T_C$ ) hacia el condensador del equipo, inicia con una torre de enfriamiento, la cual entregará el agua a una bomba hidráulica quien se encargara de impulsar a un caudal controlado ( $m_1$ ), exigido por la norma, el fluido hacia el condensador, a su vez el agua pasara por un equipo generador de calor para alcanzar una temperatura controlada  $T_C$ , esta temperatura es obtenida con el fin de cumplir con otro de los parámetros exigidos por la norma. Cuando el fluido finaliza su recorrido por el condensador debe

de salir a una temperatura  $T_T$  parámetro también exigido por la norma, para seguidamente ingresar de nuevo a la torre de enfriamiento, quien se encargará de retirarle el calor al fluido para volver a ingresar al condensador y continuar con el proceso.

Mediante tuberías, se suministrará agua proveniente de la torre de enfriamiento a la bomba de calor, que a su vez se conectará a un suministro de energía (P) para que de este modo el equipo pueda utilizar la energía que el agua trae más la energía eléctrica que se le suministra con el fin de disminuirle la temperatura al aire que se encuentra en el cuarto de pruebas. Adicionalmente, el equipo debe de estar conectado a un instrumento para medir su consumo energético para posteriormente evaluar su desempeño.

En el cuarto de pruebas, se medirá la temperatura de aire proveniente del evaporador del equipo de prueba para garantizar sea  $T_F$ , y el valor de temperatura al que debe de estar el aire que ingresa nuevamente al evaporador debe de ser  $T_E$  el cual será controlado mediante un equipo generador de calor que aportara una energía ( $Q_X$ ) simulando una carga térmica. El flujo de aire ( $m_2$ ) será medido para futuros cálculos sobre la capacidad de enfriamientos del equipo en cuestión. Adicionalmente, la norma exige que el aire entrando y saliendo del evaporador este a bulbo seco y bulbo húmedo respectivamente, para garantizar estos parámetros, se instalara un humidificador para alcanzar los valores de humedad ( $w$ ) requeridos.

### **3.1. SISTEMA DE CONTROL Y ADQUISICIÓN DE DATOS**

Según la norma internacional ANSI/ARI 320, existen varios parámetros de vital importancia en el momento de la realización de pruebas de esta naturaleza dichos parámetros son: temperatura, flujo y humedad. Con el fin de evaluar los equipos sometidos a pruebas, es necesario controlar estos parámetros para garantizar las condiciones requeridas por la norma. Los datos adquiridos durante las pruebas a las bombas de calor evaluadas en el banco de pruebas, serán procesados posteriormente para analizar el desempeño del equipo que se puso a prueba.

### **3.2. TEMPERATURA**

Como uno de los parámetros más importantes, la temperatura juega un papel bastante relevante en la realización de los ensayos. Por lo tanto, la medición y el control de esta son de vital importancia en la evaluación de las bombas de calor. De igual manera, la norma indica el control y la medición de la misma.

#### **3.2.1. INSTRUMENTOS PARA EL CONTROL DE LA TEMPERATURA**

Para la realización de los ensayos con los equipos frigoríficos, la norma exige el control de la temperatura en dos de los puntos del sistema los cuales son la entrada y

salida de agua a la bomba de calor. En la actualidad se pueden encontrar muchas opciones para el calentamiento de agua. Sin embargo, las opciones para considerar para el calentamiento del agua que ingresará a la bomba de calor serían: calentador a gas, caldera o una resistencia eléctrica.

A continuación se presenta en la tabla 5 la matriz de selección para el control en la que se califican las diferentes opciones de 1 a 10 para seleccionar la opción más conveniente para el diseño del banco de pruebas para las bombas de calor

**Tabla 5. Matriz de selección para el equipo de generación de calor**

<b>Fuente de calor</b>				
<b>Criterio</b>	<b>Peso Relativo</b>	<b>Calentador a Gas</b>	<b>Caldera</b>	<b>Resistencia Eléctrica</b>
<b>Precisión</b>	30%	8	9	8
<b>Inversión</b>	50%	2	3	10
<b>Tiempo de Respuesta</b>	20%	5	4	8
<b>Consumo Energético</b>	10%	8	6	1
<b>Total</b>	100%	5.2	5.6	9.1

En la matriz de selección se observa claramente que la opción más adecuada para este caso en particular es la resistencia eléctrica para el control de la temperatura en el banco de pruebas. Principalmente se elige la resistencia eléctrica debido a su precisión y a la inversión inicial que representa, factores de peso que priman sobre las demás opciones.

### **3.2.2. INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN PARA LA TEMPERATURA**

En la figura 8 se pueden observar los cuatro puntos en los que es necesario tomar y documentar la temperatura del sistema para posteriormente analizar el comportamiento de estos durante el ensayo.

Para la toma y el registro de los datos se tienen tres opciones: termopar, termistor y RTD.

A continuación en la tabla 6 se evalúan los instrumentos a incorporar en el banco de pruebas para la medición de la variable de la temperatura para los ensayos de las bombas de calor.

Tabla 6. Matriz de selección instrumentos de medición temperatura

Medición Temperatura				
Criterio	Peso Relativo	Termistor	Termopar	RTD
<b>Rango</b>	20%	2	9	7
<b>Sensibilidad</b>	20%	8	4	2
<b>Velocidad de respuesta</b>	20%	10	5	8
<b>Costo</b>	40%	5	10	1
<b>Total</b>	100%	6	7.6	3.8

Tanto el termistor como el RTD ofrecen unas ventajas bastante importantes a considerar en el momento de elegir un instrumento de medición de temperatura. Sin embargo, el termopar resulta siendo en instrumento a elegir sobre los demás ya que su velocidad de respuesta a los cambios de temperatura es mucho superior, y adicionalmente, el costo del instrumento es bastante bajo.

### 3.3. FLUJO

Debido al funcionamiento del equipo, se deben de considerar dos tipos de flujos, el flujo de agua y el flujo de aire, y para ambos se hace la selección de instrumentos de medición.

#### 3.3.1. FLUJO DE AGUA

Para garantizar el flujo de agua que se requiere según la norma se adaptara una bomba hidráulica para impulsar el agua proveniente de la torre de enfriamiento. El flujo proveniente de la bomba será controlado con una válvula estranguladora.

Para la medición de flujo se tienen tres opciones: rotámetro, hilo caliente y turbina. Cada uno de los instrumentos tiene sus ventajas, y a continuación en la tabla 7 se evalúan cada uno de ellos para encontrar el más adecuado para este uso en particular.

Tabla 7. Matriz de selección para instrumentos de medición de flujo

Medición Flujo				
Criterio	Peso Relativo	Rotámetro	Hilo Caliente	Turbina
<b>Costo</b>	50%	9	4	8
<b>Precisión</b>	20%	5	9	9
<b>Resolución</b>	20%	4	9	8
<b>Comunicación</b>	10%	1	9	10
<b>Total</b>	100%	6.4	6.5	8.4

A pesar del bajo costo del medidor rotámetro y la precisión del medidor hilo caliente por Doppler. De los tres instrumentos para la medición de flujo, el más indicado para ser incorporado en el banco de pruebas es el medidor de turbina. Son su costo y su precisión los que hacen que sea la mejor opción.

### 3.3.2. FLUJO DE AIRE

Ya que el flujo de aire que sale de la bomba de calor no es necesario controlarlo, simplemente será medido. Debido a la naturaleza de este fluido, se ha decidido realizar las mediciones con un medidor de hilo caliente que es el siguiente en la matriz de selección de la tabla 6, ya que es el medidor más conveniente para este uso en particular. El valor del flujo del aire será utilizado posteriormente para el cálculo de la capacidad de enfriamiento del equipo que se esté evaluando en el banco.

### 3.4. HUMEDAD

Finalmente, para la última variable que debe de ser controlada y vigilada tenemos la humedad. De acuerdo con la norma ARI 320 mencionada anteriormente, es necesario garantizar temperaturas tanto de bulbo seco como de bulbo húmedo y debido a la pérdida de humedad que presenta el aire durante todo su recorrido desde que ingresa a la bomba de calor hasta que sale nuevamente al cuarto de pruebas, es necesario medir y controlar la humedad para de este modo cumplir con las condiciones del ensayo exigidas por la norma.

### 3.4.1. INSTRUMENTOS PARA EL CONTROL DE LA HUMEDAD

De igual manera que la temperatura es necesario acondicionar el entorno en el que se realizará el ensayo para que este se pueda llevar a cabo correctamente. Por lo tanto se tienen las siguientes opciones: humidificador de electrodo, atomización y ultrasonido.

Tabla 8. Matriz de selección para la fuente de humedad.

Fuente de Humedad				
Criterio	Peso Relativo	Electrodo	Atomización	Ultrasonido
<b>Inversión</b>	40%	8	6	3
<b>Tiempo de Respuesta</b>	20%	8	8	10
<b>Consumo Energético</b>	20%	3	6	5
<b>Precisión</b>	20%	8	3	10
<b>Total</b>	100%	7	5.8	6.2

De acuerdo con la matriz de selección de la tabla 8 el instrumento que prima sobre los demás es el humidificador por electrodo, el cual presenta una inversión relativamente menor a los otros dos.

### 3.4.2. INSTRUMENTOS PARA LA MEDICIÓN DE LA HUMEDAD

Para medir la humedad presente en el aire del cuarto de pruebas de disponer de las siguientes de opciones: medidor de cabello, medidor de bulbo seco y bulbo húmedo y medidor de polímero.

Tabla 9. Matriz de selección instrumentos medición humedad

Medición de Humedad				
Criterio	Peso Relativo	Cabello	Bulbo Seco y Bulbo Húmedo	Polímero
<b>Costo</b>	40%	7	6	8
<b>Precisión</b>	30%	2	8	7
<b>Rango</b>	20%	8	9	10
<b>Vida Útil</b>	10%	8	2	7
<b>Total</b>	100%	5.8	6.8	8

A pesar de que los medidores de cabello y bulbo seco y bulbo húmedo poseen una excelente vida útil y un rango excepcional, el medidor de polímero resulta siendo mucho más conveniente para este uso en particular.

### 3.5. PRESIÓN

La presión es una de las variables que la norma ARI 320 no menciona en el momento de la realización de los ensayos. Sin embargo, es importante conocer los valores de presión con la que circula el agua por los conductos y es por eso que se decide instalar en el banco de pruebas varios dispositivos que permitan conocerlos. Los instrumentos a evaluar son los siguientes: Tubo Bourdon, transductor resistivo y un medidor neumático.

Tabla 10. Matriz de selección medición presión

Medición de Presión				
Criterio	Peso Relativo	Tubo Bourdon	Neumático	Transductor Resistivo
<b>Estabilidad</b>	25%	2	6	7
<b>Tiempo de Respuesta</b>	25%	5	8	8
<b>Apreciación</b>	25%	6	6	4
<b>Precisión</b>	25%	5	4	9
<b>Total</b>	100%	4.5	6	7

La matriz de selección de la tabla 10 muestra que el elemento más conveniente para el diseño del banco de pruebas es el transductor resistivo.

### 3.6. PROCESO DE ENSAYOS EN EL BANCO DE PRUEBAS

A continuación se presenta el procedimiento que se llevará a cabo para la elaboración de los ensayos con las bombas de calor en el banco de pruebas.

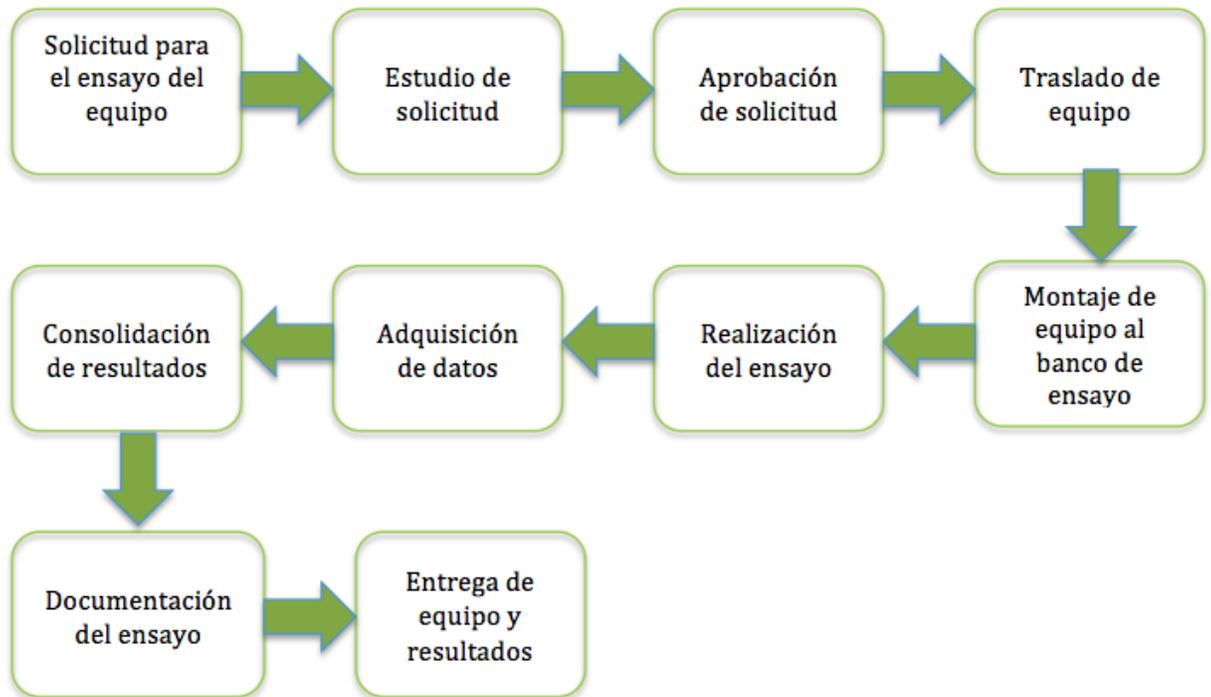


Diagrama 1. Diagrama de ensayo en el banco de pruebas

El diagrama 1 ilustra las etapas para la realización de ensayo de desempeño de las bombas de calor. El proceso de ensayos comienza con la solicitud para el ensayo del equipo por entidades o personas interesadas en el rendimiento, desempeño y capacidad de enfriamiento del equipo en cuestión. Posterior a la solicitud, se realiza un estudio de ella, para garantizar que el banco de ensayo puede generar las condiciones de prueba del equipo y se pueda realizar la prueba adecuadamente. Ya aprobada la solicitud, se procede al traslado del equipo a las instalaciones del laboratorio.

Antes del montaje del equipo al banco de ensayos, se revisan los instrumentos de medición para garantizar la certeza en sus mediciones. Se realiza el montaje del equipo al banco de pruebas. Se da inicio al ensayo del equipo hasta obtener las

condiciones de la prueba estables y después de que las condiciones de prueba son alcanzadas se comienza con la adquisición de datos hasta finalizar el ensayo.

Esta medición se realiza en los equipos para poder medir el consumo eléctrico y calcular el coeficiente de desempeño y capacidad de enfriamiento.

De acuerdo con el diagrama de ensayos del banco de pruebas, posterior al desarrollo del ensayo y la recolección de datos viene el análisis. Dicho análisis consiste en el cálculo de la capacidad de enfriamiento, el coeficiente de desempeño, entre otros indicadores de desempeño del equipo. Culminado el análisis del desempeño del equipo, se realiza un informe con el fin de documentar toda la información del equipo para posteriormente hacerle entrega a quien solicito dicho ensayo, el equipo y sus resultados correspondientes.

Con el diseño conceptual de cómo se llevara a cabo la elaboración del banco de pruebas, la elección los instrumentos de medición y control, el sistema de gestión de calidad y el procedimiento a seguir para la realización de un ensayo, es posible continuar a la elaboración del diseño básico del banco de pruebas para las bombas de calor.

## 4. CAPITULO IV DISEÑO BÁSICO

En este capítulo se tratara más a fondo el diseño del banco de pruebas y todos los temas directamente relacionados con él, tales como: la ubicación, el propósito, la distribución de planta, los equipos requeridos, etc. La finalidad de este apartado es establecer los elementos necesarios para alcanzar las condiciones exigidas por el estándar ARI 320 para garantizar la confiabilidad de los ensayos realizados en el banco.

### 4.1. CONCEPTOS GENERALES

**Ubicación:** La universidad pontificia bolivariana cuenta con un laboratorio de climatización y refrigeración. Laboratorio en el cual se realizan todo tipo de estudios alrededor de las áreas de la climatización y la refrigeración. En la actualidad, el laboratorio cuenta con una gran variedad de equipos e instrumentos para la realización de estudios en estas áreas. Sin embargo, este espacio carece de la indumentaria para evaluar y estudiar bombas de calor.

A continuación en las siguientes imágenes se muestra la ubicación en la cual se piensa hacer la implementación:



Figura 11. Campus Universidad Pontificia Bolivariana

La figura 11 ilustra el campus de la universidad de la universidad pontificia bolivariana, ubicado en Medellín, Antioquía, Colombia. En la imagen se encuentra señalado el bloque 8 de la universidad donde se encuentran los laboratorios de física, ingeniería de materiales y diseño industrial.

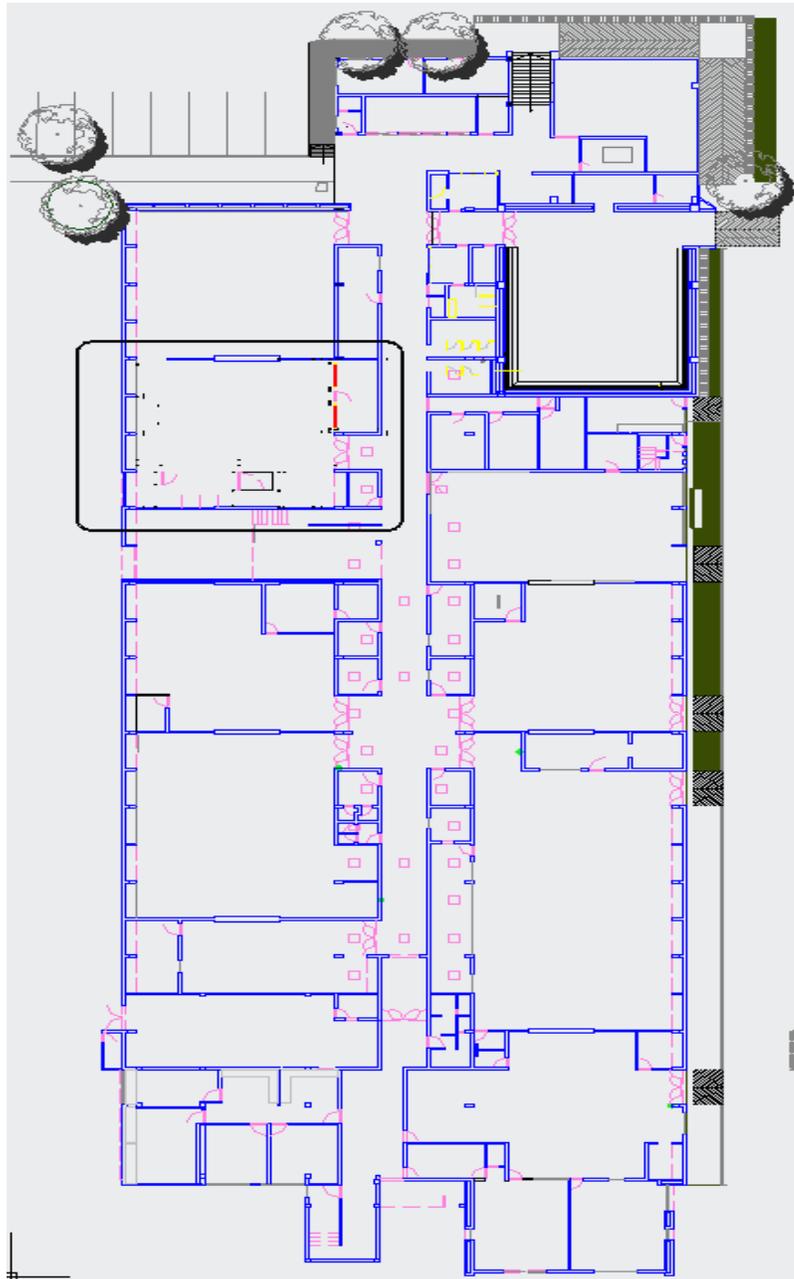


Figura 12. Bloque 8. Laboratorios Ingeniería

La figura 12 muestra la ubicación del laboratorio de refrigeración y climatización en el bloque de los laboratorios de ingeniería, espacio en donde se realizaría la intervención para acondicionar el banco de pruebas.

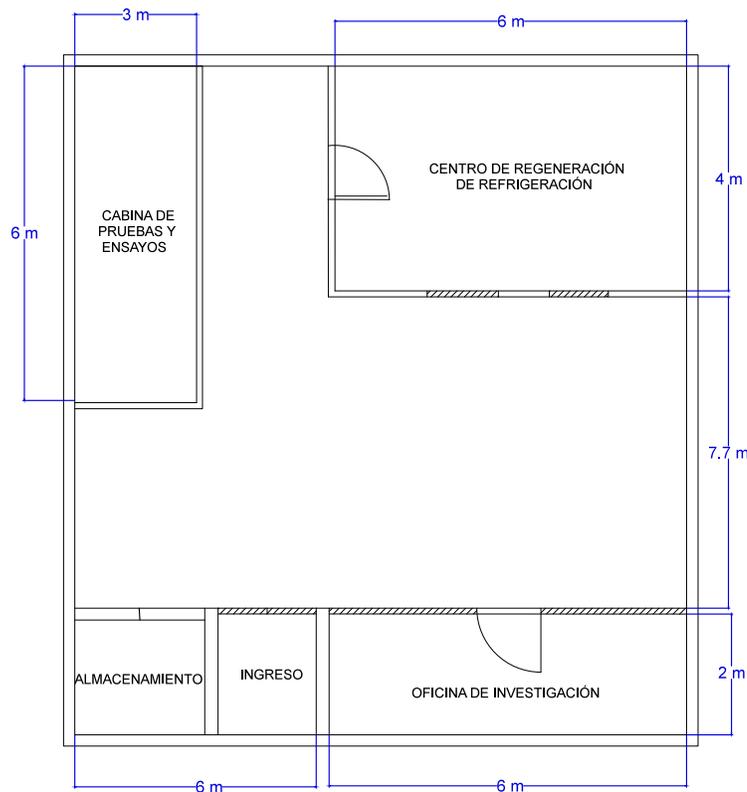


Figura 13. Distribución actual laboratorio de refrigeración y climatización

La imagen 8 ilustra la vista superior de la distribución actual del laboratorio de refrigeración y climatización de la universidad pontificia bolivariana en dicha imagen se puede observar los espacios actualmente ocupados para otros propósitos y de igual manera muestra el espacio libre en el cual se puede implementar el banco de pruebas para las bombas de calor.

**Propósito:** Debido a la creciente demanda de equipos como las bombas de calor a nivel nacional, se vio la necesidad de acondicionar un espacio de las instalaciones del laboratorio para la realización de estudios y pruebas a estos dispositivos. Los estudios en este espacio tienen como propósito analizar el desempeño de la bomba de calor a unas condiciones determinadas previamente establecidas por normativa tanto nacional e internacional como se menciona en capítulos anteriores.

**Fuentes de funcionamiento:** Inicialmente para el diseño propuesto se pretende hacer uso de una torre de enfriamiento que se encuentra actualmente ubicada en las instalaciones del laboratorio. Este equipo será el que proveerá el agua, a una temperatura controlada establecida por la normativa, a la bomba de calor para su funcionamiento. Adicionalmente, dependiendo del voltaje requerido por la bomba de

calor, el equipo será acoplado a una fuente a la cual corresponda para garantizar el correcto funcionamiento del equipo.

#### 4.2. DISTRIBUCIÓN DE PLANTA

Para el diseño del banco de pruebas, se dispondrá de dos áreas, una de las áreas será destinada como sala de máquinas mientras que la otra será utilizada como el cuarto de pruebas donde se realizarán los ensayos a las bombas de calor a evaluar.

A continuación en la figura 14 se observa la distribución propuesta de planta del laboratorio donde se señalan las áreas que serán intervenidas para la realización del banco de ensayos.

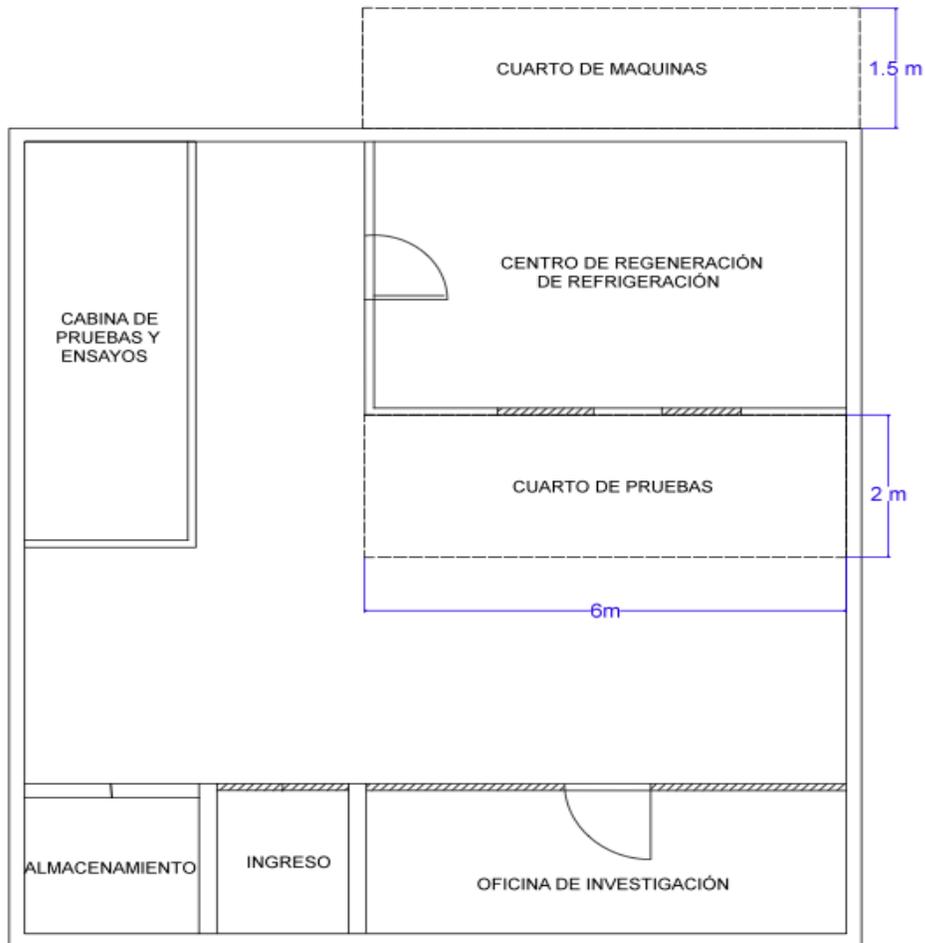


Figura 14. Distribución de planta con espacios a trabajar.

Para el cuarto de máquinas, se destinara un área de  $9\text{m}^2$  ( $6 \times 1.5\text{m}$ ) en el que se ubicaran la torre de enfriamiento que será la que proveerá el agua para la bomba de calor y la bomba hidráulica que se encargará de llevar directamente el agua de la torre

de enfriamiento a la bomba de calor en el banco de pruebas. Esta área para la sala de máquinas se encuentra fuera de las instalaciones del laboratorio, es decir, es necesario modificar el entorno adyacente al laboratorio para acondicionar la sala de máquinas en este espacio.

El área destinada para el cuarto de pruebas es de 12 m<sup>2</sup> (6 x 2m). Este espacio será en el que se efectuarán los ensayos a las bombas de calor. En base a la norma ANSI/ARI 320 se realizará el acondicionamiento

A continuación se muestra la imagen 7 donde se ubican equipos del cuarto de pruebas y de máquinas.

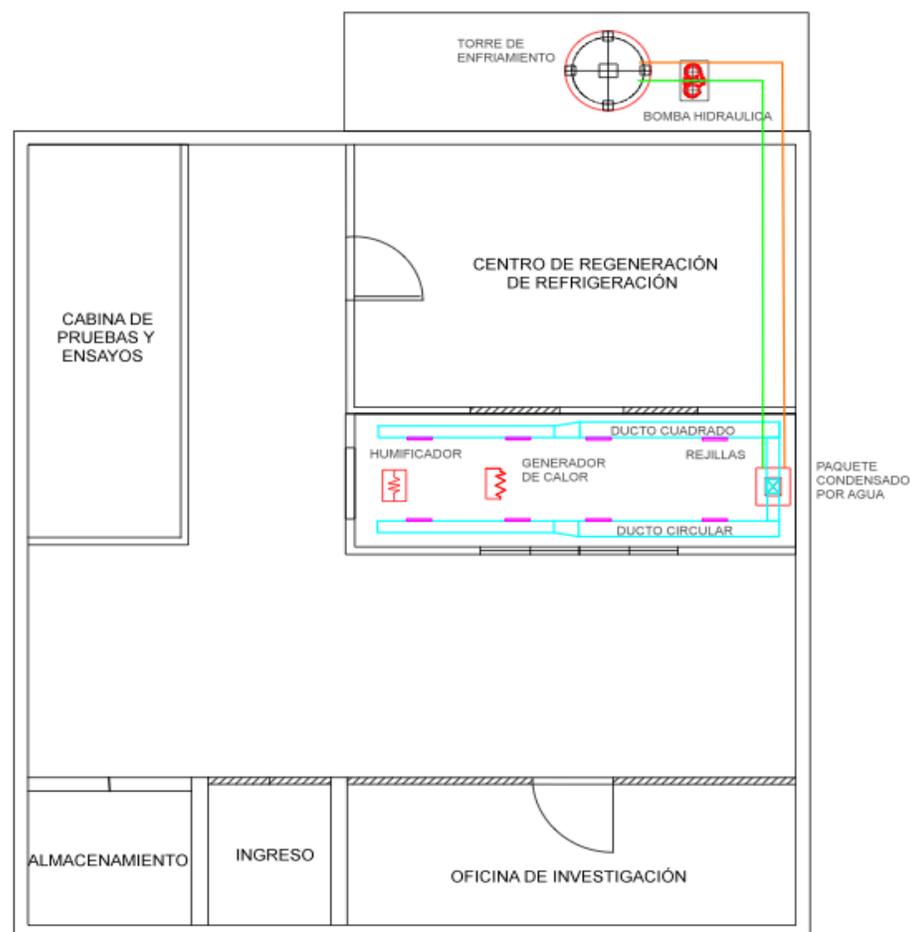


Figura 15. Distribución esquemática de los equipos ubicados en cuarto de pruebas y cuarto de máquinas.

La figura 15 es una vista superior de la distribución de los equipos que se ubicarán tanto en el cuarto de pruebas y el cuarto de máquinas.

En el cuarto de máquinas se ubicarán, como se explica anteriormente, la bomba hidráulica y la torre de enfriamiento. Estas a su vez estarán conectadas entre sí, por

ductos por donde fluirá agua caliente (naranja) y agua fría (verde), los cuales estarán conectados a la bomba de calor.

En el cuarto de pruebas se tienen principalmente 4 elementos: el equipo humidificador, equipo generador de calor, ductos circular y cuadrado, y el equipo al que se le realizaran las pruebas.

El equipo humidificador previamente seleccionado será ubicado en el extremo izquierdo del cuarto para garantizar el bulbo húmedo y seco exigido por la norma.

El equipo generador de calor, es decir, la resistencia eléctrica previamente elegida con para garantizar las temperaturas anteriormente mencionadas que la norma requiere para este tipo de pruebas.

Los ductos circular y cuadrado, necesarios para la circulación adecuada del aire que sale de la bomba de calor, son ubicados a lo largo de cuarto con rejillas a lo largo de los ductos para permitir una salida uniforme del aire. En cuanto los dos tipos de geometrías de los ductos, son establecidas de estos modos con fines académicos posteriores.

Finalmente, la bomba de calor será ubicada en el extremo derecho del cuarto de pruebas donde se le acoplaran los sensores, las tuberías por donde ingresa y sale el agua, y los ductos por donde ingresa y sale el aire.

La figura 16 es la vista frontal del cuarto de pruebas donde indican la distribución de los elementos necesarios para el ensayo.



función dirigir el flujo de aire proveniente de la bomba de calor por una sola sección del ducto, y como se menciona anteriormente, esto se realiza con fines académicos posteriores.

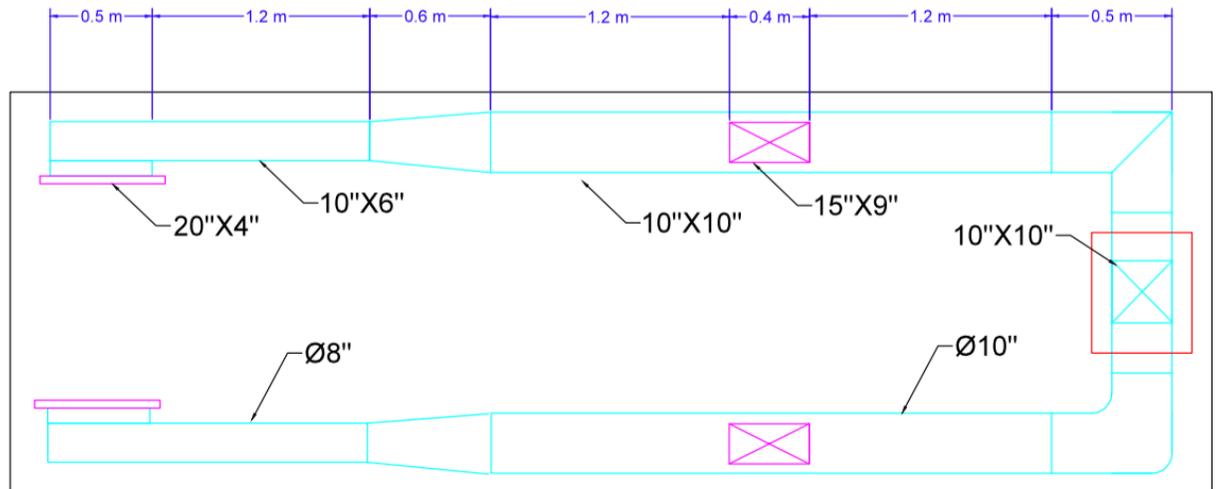


Figura 17. Vista superior cuarto de pruebas

En la figura 17 se observa la vista superior del cuarto de pruebas con las dimensiones de los ductos que se encargaran de repartir el aire que sale del equipo de pruebas basándose en los parámetros recomendados por el nomograma elaborado por el fabricante Greenheck (ver anexos para las instrucciones de la elaboración de los ductos). El ducto cuenta con una configuración inicial de 10 x 10 pulgadas desde que sale del equipo hasta alcanzar la bifurcación en el techo del cuarto de pruebas, ya que de ahí se divide en el ducto circular y cuadrado.

En la parte inferior de la figura tenemos el ducto circular el cual cuenta con un diámetro inicial de 10 pulgadas y en la mitad de la longitud del ducto cuenta con un difusor de 15 x 9 pulgadas. Después de un tramo de 3.3 metros, el ducto tendrá un cambio de diámetro a 8 pulgadas y finalizará con una rejilla.

En ducto cuadrado contara con un sección transversal de 10 x 10 pulgadas y posteriormente, mediante un transición, se reducirá la sección transversal a 10 x 6 pulgadas, y de igual manera que el ducto circular, este ducto contara con una difusor en la sección media y una rejilla en el final.

### 4.3. EQUIPOS REQUERIDOS

Para adaptarse a las exigencias de los ensayos requeridos de la norma para los equipos de producción de frio de baja potencia, el banco de ensayo está formado por varios sistemas. Los cuales son los siguientes:

### 4.3.1. SISTEMA DE DISIPACIÓN DE CALOR

El sistema de disipación de calor dispone de una torre de enfriamiento para acondicionar la temperatura del agua, bomba hidráulica para el flujo del agua y válvula de estrangulación o variador de velocidad en la bomba hidráulica para el control del flujo.

#### 4.3.1.1. TORRE DE ENFRIAMIENTO

Fabricante: AMCOT.

Modelo: ST-8.

Capacidad: 8 TR.

Flujo nominal de agua: 16 GPM.

Diámetro de tubería: 1 1/2 in.

Altura: 56 in.

Diámetro: 36 in.

Motor del ventilador: 1/6 HP.

Volumen de aire: 2620 CFM.



Figura 18. Torre de enfriamiento [20]

#### 4.3.1.2. BOMBA HIDRÁULICA

Marca: IHM.

Modelo: CD1-1/2.

Categoría: Bomba eléctrica.

Tipo: Centrifugado.

Potencia: 0.5 HP

Fases: Monofásico.  
Conexión: 120 V, 60 Hz  
Caudal máximo: 25 GPM (15PSI)  
Diámetro descarga: 1 in.  
Diámetro succión: 1<sup>1</sup>/<sub>4</sub> in.



Figura 19. Bomba hidráulica [21]

#### 4.3.1.3. VÁLVULA ESTRANDGULADORA

Marca: BELIMO  
Modelo: B217B1+TR24-SR-T US, B217B2+TR24-SR-T US  
Característica: CCV 3/4" Cv 4.7 BR.  
Señal de entrada: 2-10 VDC.  
Conexión: 24VAC, 50/60 Hz, 24VDC  
Máximo diferencia de presión: 50 PSI  
Diámetro válvula: 3/4 in.



Figura 20. Válvulas estranguladora [22]

#### 4.3.1.4. VARIADOR DE VELOCIDAD

Marca: SIMENS

Modelo: Sinamics G110.

Rango de potencia: 0.5 – 4 HP.

Conexión: 200 – 240 VAC Monofásico.

Comunicación: Puerto USS.



Figura 21. Variador de velocidad [23]

#### 4.3.2. SISTEMA DE GENERACIÓN DE CALOR

El sistema de generación de calor está conformado por dos resistencias, una resistencia sumergida en la torre de enfriamiento para regular la temperatura del agua y una resistencia aleteada en el cuarto de prueba para garantizar las condiciones de temperatura requeridas.

##### 4.3.2.1. RESISTENCIA SUMERGIDA

Marca: OVELMA.

Modelo: Tubular 05.

Tipo: Resistencia tubular.

Conexión: 220 V.

Potencia: 8 KW.

El fabricante afirma que estas resistencias son fabricadas por pedidos y que pueden ser acomodadas a las condiciones necesarias del cliente. Es decir, la resistencia necesaria será fabricada para cumplir con las tolerancias de temperatura establecidas previamente.



Figura 22. Resistencia sumergida [24]

#### 4.3.2.2. RESISTENCIA ALETEADA

Marca: OVELMA.

Modelo: Tubular 11.

Tipo: Resistencia tubular.

Conexión: 220 V.

Potencia: 3 KW.

De igual manera que la resistencia sumergida, la resistencia aleteada es también fabricada por pedido para garantizar las condiciones requeridas por el cliente.



Figura 23. Resistencia aletada [24]

#### 4.3.2.3. UNIDAD DE TRATAMIENTO DE AIRE.

La unidad de tratamiento de aire, es requerido para garantizar las condiciones de humedad del ambiente para la realización del ensayo.

## **Humidificador**

Marca: Carel

Modelo: KUET2C0000

Conexión: 120 V, 60 Hz

Fases: monofásico

Tasa de modulación de flujo de vapor: 8 kg/h



Figura 24. Humidificador [25]

### **4.3.2.4. SISTEMA DE CONTROL Y ADQUISICIÓN DE DATOS**

El sistema de control y adquisición de datos, consta de los elementos de medición para las variables del sistema como temperatura, humedad, flujos y presión. También la tarjeta de adquisición de datos para la interpretación y obtención de las señales enviadas por los sensores.

### **4.3.2.5. SENSOR DE FLUJO DE AGUA**

Marca: ONICON.

Modelo: F-1300.

Rango de temperaturas:  $-5^{\circ}$  a  $160^{\circ}\text{F}$  ( $-20$  a  $70^{\circ}\text{C}$ ).

Presión de operación máxima: 400 PSI.

Señal de salida: 0 – 17V.

Diámetro:  $\frac{3}{4}$ in.

Conexión:  $24 \pm 4$  V AC/DC at 30 mA

Exactitud: 2%.



Figura 25. Medidor de flujo [26]

#### 4.3.2.6. SENSOR DE FLUJO DE AIRE

Marca: DWYER INSTRUMENTS.  
Tipo: Sensor de flujo de masa caliente.  
Series: 641RM.  
Rango de velocidad: 0 – 75 MPS.  
Exactitud: 3% (0 – 50°C).  
Rango de temperatura: -40 – 100°C.  
Conexión: 10 – 16 VAC.  
Señal de salida: 4 – 20 mA.



Figura 26. Sensor de flujo de aire [27]

#### 4.3.2.7. SENSOR DE HUMEDAD

Marca: TECPEL.  
Modelo: TRH 300.

Rangos de temperatura: 0 – 100°C.  
Rangos de medida: 0 – 100% HR.  
Señal de salida: 4- 20 mA.  
Conexión: 12 – 40 V DC.



Figura 27. Sensor de humedad [28]

#### 4.3.2.8. SENSOR DE TEMPERATURA.

Marca: OMEGA.  
Clase: Termopar.  
Tipo: T.  
Rango de temperatura: -200 y 260°C.  
Rango de señal: -5.28 – 20.80 mV  
Límite de error: 0.75%.



Figura 28. Sensor de temperatura [29]

#### 4.3.2.9. SENSOR DE PRESIÓN

Marca: DWYER INSTRUMENTS.  
Series: DSGT-101.  
Rango de presión: 0 – 300 PSI.  
Exactitud: 0.25%.

Rango de temperatura: -10 – 60°C.  
Conexión: 12 – 36 VDC.  
Señal de salida: 4 – 20 mA.



Figura 29. Sensor de presión [30]

#### 4.3.2.10. TARJETA DE ADQUISICIÓN DE DATOS

Marca: NATIONAL INSTRUMENTS  
Chasis: NI cDAQ 9174  
Módulo de salida: NI 9472  
Módulo de entrada: NI 9203



Figura 30. Tarjeta de adquisición de datos [31]

#### 4.3.2.11. VARIADOR DE VOLTAJE

Marca: CHROMA ATE  
Modelo: 61601  
Conexión Entrada

Rango de voltaje: 90 – 250 V.  
Rango de frecuencia: 47 – 63 Hz.  
Corriente: 10 A Max @ 90 V por fase.  
Conexión Salida por fase  
Rango de voltaje: 150 – 300 V.  
Rango de corriente: 4A /2A (150V/300V).  
Rango de frecuencia: DC. 15 - 1KHz.  
El equipo tiene una exactitud de  $\pm 0.2\%$  del voltaje de operación.



Figura 31. Variador de voltaje [32]

#### 4.3.2.12. VATÍMETRO

Marca: Voltech  
Modelo: PM100+  
Rango de voltaje: 0 - 600V RMS,  $\pm 900$ V Pico  
Rango de frecuencia: DC, 10Hz - 1MHz  
Corriente: 0 to 20A RMS,  $\pm 100$ A Pico  
Factor de potencia: -1.000 a +1.000  
Factor de cresta: 1 a 20  
Potencia: 0 a 90kW  
Potencia aparente: 0 a 90kVA  
Potencia reactiva: 0 to 90kVAr  
Balasto eléctrico de entrada: 50 / 60 / 400Hz hasta 500kHz



**Figura 32. Vatímetro [33]**

Finalmente, después de haber mencionado la ubicación y el propósito del banco de pruebas, la distribución que tendrá en las instalaciones del laboratorio y los equipos a utilizar, es posible continuar con el la elaboración de los ensayos en el mismo.

## 5. CAPITULO V. PROCEDIMIENTOS PARA EL ENSAYO DE BOMBAS DE CALOR EN EL BANCO DE PRUEBAS

En este capítulo se desarrollan los procedimientos a seguir para los ensayos de las bombas de calor en el banco de pruebas trabajando a condiciones nominales. Para dichos ensayos se hará uso de los instrumentos de medición y control mencionados anteriormente con el fin de garantizar las condiciones exigidas por la norma.

En las instalaciones del laboratorio se cuenta con un equipo al cual se pretende someter a ensayos en el banco de pruebas. A continuación se presentan las características de dicho equipo.

Marca: TRANE

Equipo: Paquete de agua

Modelo: GEVE02411E01A0BL0010000100

Serial: 74M459AC

Configuración: paquete de agua vertical.

Fluido de trabajo: R410-A.

Capacidad nominal: 2 Ton.

Conexión: 208 /60/1 (voltaje/Hz/ Fase).

Circuito de refrigeración: Producción de frio y calor.

Configuración de ventilador: estándar.

Configuración de suministro de aire: parte posterior.

Configuración de retorno de aire: costado izquierdo.



Imagen 1. Bomba de calor [34]

### Datos generales.

Dimensiones: 21 1/2 x 39 1/4 x 21 1/2 in (largo x alto x ancho).

Peso: 253 lb.

Tubería agua: 3/4 in.

Ducto salida de aire: 10 x 6 in.  
Presión de trabajo de aire: 650 Psig.  
Presión de trabajo de agua: 780 Psig

**Datos de rendimiento.**

Caudal de agua: 5.6 GPM.  
Flujo de aire: 760 scfm.  
Capacidad de enfriamiento: 24,700 Btu.  
Relación de eficiencia energética: 14.70.  
COP: 4.80

**5.1. SOLICITUD PARA EL ENSAYO DE UN EQUIPO**

Los ensayos para las bombas de calor en el banco de pruebas partirán de la realización de una solicitud cuyo formato se encuentra en la sección de anexos. En este formato se consignaran los datos del solicitante y las especificaciones del equipo como se ilustra a continuación para el equipo con el que se trabajará:



## **5.2. ESTUDIO DE SOLICITUD DE ENSAYO**

Al recibir la solicitud, se realizara el estudio de la misma. Es en esta parte del procedimiento donde se realizará un estudio de las características del equipo consignadas en las solicitudes para conocer la viabilidad de la realización del ensayo a la bomba de calor en cuestión.

Los factores directamente a analizar para la realización del ensayo son los siguientes:

- Las dimensiones del equipo deben de ser consideradas en el momento del estudio de las características del equipo. La altura del equipo no debe de exceder los 2.5 m (98.42 in) que tiene de altura el cuarto de pruebas.
- Caudal requerido de entrada de agua al condensador: este es un factor decisivo en el momento del montaje debido a que es una de las variables que deben de ser controladas. Este caudal no debe de superar los 16 GPM ya que es el caudal máximo que puede entregar la torre de enfriamiento que se instalará en el banco.
- Capacidad de enfriamiento: la capacidad de enfriamiento de la bomba no debe de ser superior a 8 TR ya esa es la capacidad máxima de la torre de enfriamiento con la cual se trabajará.

## **5.3. APROBACIÓN DE LA SOLICITUD ENSAYO**

Al finalizar el estudio de la solicitud de ensayo de la bomba de calor, se toma la decisión si es posible realizarle las pruebas al equipo.

Para este caso en particular, el equipo a evaluar cumple con los requisitos de dimensiones, caudal requerido y capacidad de enfriamiento. Por lo tanto, se puede proceder a la siguiente parte del proceso.

## **5.4. TRASLADO DEL EQUIPO**

Luego de la aprobación de la solicitud, el paso a seguir es realizar el traslado del equipo a las instalaciones del laboratorio de refrigeración y climatización para posteriormente proceder con el montaje al banco de pruebas.

## **5.5. MONTAJE DEL EQUIPO AL BANCO DE PRUEBAS**

Una vez el equipo se encuentra en las instalaciones del laboratorio se procede a realizar el montaje del equipo en el banco de pruebas.

El montaje del equipo debe de llevarse a cabo de acuerdo a las instrucciones establecidas por el fabricante. Adicionalmente, se debe de garantizar que todos los conductos que se vayan a conectar al equipo deben de estar completamente limpios para que la transferencia de calor sea la óptima.

El montaje consiste en las conexiones del equipo las cuales se muestran a continuación:

- El equipo será conectado a la fuente eléctrica y a su vez se le instalaran el regulador de voltaje y el medidor de consumo energético.
- El flujo de agua que ingresa y sale de la bomba de calor se llevará a cabo a través de las tuberías provenientes del cuarto de máquinas las cuales se conectarán al equipo. En la tubería por la cual ingresa el fluido irán instalados el medidor de flujo de turbina, un termopar, un medidor de presión y la válvula estranguladora. Por la tubería por donde sale el agua se ubicarán también un termopar y un medidor de presión.
- Finalmente se instala el ducto por donde saldrá el aire de la bomba de calor. Este ducto tendrá acoplados un termopar y el medidor de flujo de hilo caliente.

Con la bomba de calor en su lugar y todas las conexiones e instalaciones realizadas, se puede proceder al siguiente paso del procedimiento.

## **5.6. REALIZACION DE ENSAYO**

Luego de que se realiza exitosamente la conexión de todos los elementos al equipo que se evaluará, se puede dar inicio al ensayo.

El equipo con el que se trabajará será sometido inicialmente a cuatro pruebas, dos pruebas de enfriamiento y dos pruebas de calentamiento. Si el equipo en cuestión solo esta diseñado para el enfriamiento, se obvian las pruebas de calentamiento. Para cada una de las modalidades (calentamiento y enfriamiento) se realizaran dos ensayos, un primer ensayo se realizara a un 90% del voltaje nominal del equipo, mientras que el segundo se realizara a 110% el voltaje nominal del mismo.

Garantizado el correcto funcionamiento de los instrumentos de medición y elementos de control del banco, se da inicio al ensayo. Poniendo en marcha la torre de enfriamiento y fijando el caudal que la bomba hidráulica entregará, se puede iniciar la bomba de calor a evaluar. Con ayuda del regulador de voltaje, se fija el equipo a uno de los voltajes especificados anteriormente hasta alcanzar unos valores de temperaturas y humedades ya establecidos en el capítulo 2. Si se está realizando la prueba de calentamiento, las condiciones deben de ser las siguientes: la temperatura del aire que ingresa al evaporador debe de ser 80°F [26.7°C] bulbo seco y la temperatura del agua que ingresa al condensador del equipo debe de ser de 90°F [32.3°C]. Si la prueba en

progreso es la de enfriamiento las condiciones deben de ser las siguientes: la temperatura del aire ingresando al evaporador del equipo debe de ser de 95°F [35°C] bulbo seco y 71°F [21.7°C] bulbo húmedo, la temperatura del agua entrando al condensador debe de ser de 95°F [35°C].

Una vez garantizados estas condiciones, el equipo continuará operando bajo las condiciones de voltaje especificadas durante un periodo de dos horas (Periodo I) de manera ininterrumpida sin falla alguna de alguno de sus componentes. Pasadas las dos horas, el flujo de energía será interrumpido hasta que el compresor se detenga totalmente durante un periodo máximo de 5 segundos para posteriormente reiniciar la operación del equipo durante una hora más (Periodo II).

Las tolerancias para los valores de las temperaturas y los voltajes dados son los siguientes:

- La temperatura del agua no debe de estar fuera de  $\pm 0.5^{\circ}\text{F}$  [ $0.3^{\circ}\text{C}$ ]
- La temperatura del aire no debe de exceder los  $\pm 1.0^{\circ}\text{F}$  [ $0.6^{\circ}\text{C}$ ]
- La tolerancia para los voltajes no debe de exceder  $\pm 1.0\%$  de lo mencionado.

El procedimiento para el equipo ya presente en el laboratorio consiste de dos etapas. Al ser diseñado para la producción de frío, el equipo sería sometido a las pruebas de enfriamiento: una a 187.2 V (90% de 208V) y a otra de 228.8 V (110% de 208V).

De manera simultánea al ensayo, la adquisición de datos de las variables del proceso se llevara a cabo.

## **5.7. ADQUISICIÓN DE DATOS**

Para la adquisición de datos se hará uso de la tarjeta de adquisición de datos previamente seleccionada para posteriormente pasar a la consolidación de los resultados.

Congruentes con los instrumentos a instalar en el banco de pruebas, los datos que se pretenden adquirir de los ensayos son los siguientes:

- Presión del agua a la entrada y la salida de la bomba
- Temperatura del aire y agua, tanto de la entrada como de la salida del equipo
- Flujo del agua a la salida del equipo y flujo del agua a entrada del equipo
- Consumo energético del equipo
- El voltaje de operación

## **5.8. CONSOLIDACION DE RESULTADOS**

La consolidación de los resultados se llevará a cabo con los datos obtenidos en los ensayos realizados al equipo en cuestión.

En base a la norma 320, de la cual se tomaron en consideración muchos de los parámetros para el diseño del banco de pruebas, se realiza la consolidación de los resultados obtenidos mediante el ensayo. Dichos resultados tiene como tienen como finalidad la evaluación de los siguientes parámetros del equipo sometido a los ensayos según la norma:

- Capacidad de enfriamiento, Btu/h [W]
- EER (Energy Efficiency Ratio), Btu/w•h [W/W]
- Capacidad de calentamiento, Btu/h [W]
- COP, W/W

## **5.9. DOCUMENTACIÓN DEL ENSAYO**

Luego de haberse realizado la consolidación de los resultados del ensayo, el paso a seguir es la documentación de este resultado. Esta documentación consta de guardar los resultados del ensayo en una base de datos , al cual permita revisarlos en un futuro si es necesario.

## **5.10. ENTREGA DE EQUIPO Y RESULTADOS**

Finalmente, con el equipo evaluado y los resultados obtenidos, se pone a disposición del solicitante tanto el equipo como los resultados del ensayo.

## **5.11. SISTEMA DE GESTIÓN DE CALIDAD PARA LABORATORIOS DE PRUEBAS Y ENSAYO**

Para la realización de pruebas y ensayos en un laboratorio, es necesario implementar y mantener un sistema de gestión con el fin de llevar a cabo sus actividades de manera adecuada, para que de este modo las pruebas y ensayos realizados en sus instalaciones cumplan con los estándares de calidad exigidos por la norma ISO 17025 [19].

### **5.11.1. GESTIÓN DOCUMENTAL**

Con el fin de garantizar la calidad de todo el proceso y procedimientos que se lleven a cabo en las instalaciones del laboratorio, es necesario documentar todas las políticas, sistemas, programas, procedimientos e instrucciones con el fin de garantizar la calidad de los resultados de los ensayos realizados allí.

Esta documentación debe de ser comunicada al personal directamente relacionado con el laboratorio para que en un futuro, si es necesario, él realice las implementaciones necesarias.

### **5.11.2. CALIBRACION DE LOS EQUIPOS**

Para la realización de un ensayo, todo laboratorio debe de aplicar los procedimientos y métodos de calibración que se encuentren a su alcance, con el fin de garantizar certeza en todas sus mediciones.

A nivel nacional, la calibración de equipos de laboratorio está regulada por la norma ISO 17025 [19], la cual fue posteriormente regulada por el decreto del 5 de agosto de 2014. Esta norma indica, que a nivel de laboratorio, los métodos y procedimientos de calibración deben de ser realizados y/o establecidos por personal calificado previsto de los recursos adecuados.

Para la estimación de la incertidumbre de las mediciones la norma establece que todos los laboratorios deben de tener y aplicar procedimientos para estimar la incertidumbre de la medición. En algunos casos que la naturaleza del ensayo permite excluir el cálculo de la estimación. En estos casos, el laboratorio debe, por lo menos, tratar de identificar las fuentes de incertidumbre y realizar una estimación razonable. Los planes establecidos para la calibración deben de ser actualizados a medida que avanza el desarrollo y estos deben de ser comunicados a todo el personal involucrado en el laboratorio.

Adicionalmente, en agosto de 2014 el ministerio de comercio, industria y turismo del gobierno colombiano estableció el decreto número 1471 del 5 de agosto de 2014 [35] cuyo objetivo es reorganizar el subsistema nacional de calidad (SNCA) materia de normalización, reglamentación técnica, acreditación, evaluación de la conformidad, metrología y vigilancia y control. Este decreto establece que la realización de ensayos laboratorios con el fin de expedir certificados de conformidad, se deben de realizar en laboratorios acreditados por organismos de acreditación que hagan parte de los acuerdos de reconocimiento multilateral suscritos por el organismo nacional de acreditación. Cuando no exista en Colombia laboratorio acreditado para la realización de los ensayos requeridos para el cumplimiento del reglamento técnico aplicable, tales ensayos se podrán realizar en laboratorios evaluado previamente por los organismos de certificación de producto o los de inspección, según sea el caso, bajo la norma NTC ISO/IEC 17025. Este decreto entrará en vigencia en febrero de 2015.

### **5.11.3. CONFIDENCIALIDAD**

Con el fin de proteger todo tipo información perteneciente a un ensayo la norma indica que el laboratorio debe de tener políticas y procedimientos para asegurar la

protección de la información confidencial y los derechos de propiedad, incluidos los procedimientos para la protección del almacenamiento y la transmisión electrónica de los resultados.

#### **5.11.4. CAPACITACIÓN**

Para poder llevar a cabo todos los procedimientos relacionados a los ensayos con las bombas de calor, el laboratorio debe de garantizar que el personal que estará a cargo de la elaboración de los ensayos a las bombas de calor esté debidamente instruido para realizar los procedimientos concernientes al ensayo con el fin de garantizar la óptima realización de estos.

Finalmente, después de establecer el procedimiento que se llevara a cabo en el banco de pruebas para la evaluación de la bomba de calor y el sistema de gestión de calidad para laboratorios de pruebas y ensayos se puede dar culminado el proceso de diseño básico del banco de pruebas.

## 6. CONCLUSIONES

El trabajo realizado en esta tesis cumple con el objetivo inicial el cual consiste en el diseño básico de un banco de pruebas para bombas de calor agua-aire y de los procedimientos respectivos para llevar a cabo dichas pruebas.

- Con la elaboración de este trabajo se puede ver que actualmente existen gran variedad de normas y políticas nacionales e internacionales que giran en torno a las bombas de calor. Sin embargo, de todas las normas existentes, la norma ARI 320/98 es la base de la elaboración de este trabajo debido a que esta presenta unos parámetros para evaluar indicadores tales como el COP y EER que para fines de este estudio son los ideales porque se enfocan en el desempeño del equipo y su consumo energético.
- Adicionalmente, Debido a la naturaleza de estos dispositivos, y que su principal uso a nivel mundial es la calefacción a nivel residencial, se encontró durante la investigación contenida en este trabajo, que a nivel nacional, las bombas de calor son utilizadas con fines diferentes a este, entre ellos, son usadas como aires acondicionados y calentamiento de piscinas.
- Adicionalmente se puede concluir con la elaboración de este trabajo que el procedimiento planteado permitirá la caracterización de los dispositivos en base a la norma internacional ARI 320/98, para posteriormente realizar la clasificación respectiva de este.
- El diseño básico del banco de pruebas para bombas de calor de baja potencia planteado en este trabajo cuenta con los subsistemas de generación de calor, sumidero de calor, producción de frío, control y adquisición de datos en el banco de calor que permitirán la elaboración de los ensayos en el banco de pruebas.
- De igual manera se puede concluir que el diseño del banco de pruebas no solo tendrá como fin la evaluación de los equipos, sino que será de gran utilidad en el ámbito académico al poseer los ductos con geometrías secciones transversales diferentes ya que se podrán llevar a cabo estudios del comportamiento del flujo en ambos ductos por parte del área de mecánica de fluidos de la universidad.

## 7. FUENTES BIBLIOGRAFICAS

- [1] Yanus Cengel and Michael Boles, *Termodinamica*, Sexta Edicion ed., Ricardo Bosque, Ed. Mexico D.F, Mexico: Mc Graw-Hill, 2009.
- [2] Daniel Ospina, "Programacion De Un Sistema De Expansion Para Mezcla De Refrigerantes En Una Bomba Experimental De Alta Temperatura," Universidad Pontificia Bolivariana, Medellin, Tesis De Maestria.
- [3] Roman Monasterio, Pedro Hernandez, and Javier Saiz, *La Bomba De Calor*, Primera Edicion ed., Antonio Garcia, Ed. Madrid, España: Mc Graw-Hill, 1993.
- [4] FORMEX S.A.S. (2013, Nov.) Formex. Refrigeracion y aire acondicionado. [Online]. [www.formex.com.co](http://www.formex.com.co)
- [5] ES ENERGIA SOLAR LTDA. (2014, Aug.) ES ENERGIA SOLAR. [Online]. <http://www.esenergiasolar.com/>
- [6] Carlos Andrés Álvarez. (2012, Noviembre) Centro de Investigacion y Desarrollo Tecnologico. [Online]. [http://www.cidet.org.co/sites/default/files/documentos/uiet/normatividad\\_sobre\\_eficiencia\\_energetica\\_y\\_edificaciones\\_verdes.pdf](http://www.cidet.org.co/sites/default/files/documentos/uiet/normatividad_sobre_eficiencia_energetica_y_edificaciones_verdes.pdf)
- [7] Vicente Conesa Fernández. (2010, Marzo) Ecoticas. [Online]. <http://www.ecoticias.com/alimentos/23435/>
- [8] Secretaria de Energia. (2010, Febrero) Secretaria de Energia de la Republica de Argentina. [Online]. <http://energia3.mecon.gov.ar/contenidos/verpagina.php?idpagina=2863>
- [9] Air Conditioning & Refrigeration Institute, "Commercial and industrial unitary air-conditioning and heat pump equipment," American National Standard Institute, Arlington, Standard 340/360, 2004.
- [10] Air Conditioning & Refrigeration Institute, "WATER- SOURCE HEAT PUMPS ," American National Standards Institute, Arlington, Standard 320/98, 1998.
- [11] Nordtest, "LARGE HEAT PUMPS: Field testing and presentation of performance," Nordtest, Espoo, Test 076, 1989.
- [12] EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, "Air conditioners, liquid chilling packages and heat pumps with electrically driven compressors for space heating and cooling - Part 2: Test conditions," EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, Bruxelles, Standard 14511-2 , 2007.
- [13] Air-Conditioning & Refrigeration Institute, "AIR-CONDITIONING AND HEAT PUMP EQUIPMENT INCORPORATING POTABLE WATER HEATING DEVICES ," American National Standards Institute, Arlington, Standard 290, 1996.
- [14] Air-Conditioning & Refrigeration Institute, "PERFORMANCE RATING OF SINGLE P ACKAGE VERTICAL AIR- CONDITIONERS AND HEAT PUMPS ," American National Standards Institute, Arlington, Standard 390, 2003.

- [15] Air-Conditioning & Refrigeration Institute, "PERFORMANCE RATING OF HEAT PUMP POOL HEATERS," American National Standards Institute, Arlington, Standard 1160, 2004.
- [16] Air-Conditioning & Refrigeration Institute, "PERFORMANCE RATING OF UNITARY AIR- CONDITIONING AND AIR- SOURCE HEAT PUMP EQUIPMENT," American National Standards Institute, Arlington, Standard 210/240, 2006.
- [17] Air-Conditioning & Refrigeration Institute, "Standard for Packaged Terminal Air-Conditioners and Heat Pumps," Canadian Standard Association, MISSISSAUGA, Standard 310/380, 2004.
- [18] Ministerio de Minas y Energia. (2014, Junio) Ministerio de Minasy Energia de la Republica de Colombia. [Online].  
[http://www.minminas.gov.co/minminas/energia.jsp?cargaHome=3&id\\_categoria=157](http://www.minminas.gov.co/minminas/energia.jsp?cargaHome=3&id_categoria=157)
- [19] International Organization For Standardization ISO. (2005, Octubre) International Organization For Standardization. [Online].  
[http://www.iso.org/iso/home/store/catalogue\\_tc/catalogue\\_detail.htm?csnumber=39883](http://www.iso.org/iso/home/store/catalogue_tc/catalogue_detail.htm?csnumber=39883)
- [20] AMCOT. (2001, June) AMCOT COOLING TOWER CORP. [Online].  
<http://www.amcot.com/products.asp>
- [21] EDARVICO S.A. (2014, Mar.) EDUARDO ARANGO V. & CIA. S.A. [Online].  
[http://puntodeventa.co/bomba-electrica/Bomba\\_Electrica\\_IHM\\_CD1-1/2HP/d-1821/](http://puntodeventa.co/bomba-electrica/Bomba_Electrica_IHM_CD1-1/2HP/d-1821/)
- [22] Belimo. (2004, Nov.) Belimo Air Controls. [Online].  
[http://www.belimo.us/americas/2\\_way\\_ccv.html](http://www.belimo.us/americas/2_way_ccv.html)
- [23] Frecuencia y velocidad S.A.S. (2008, Feb.) Frecuencia y velocidad S.A.S. [Online].  
<http://www.frecuenciayvelocidad.com/productos/variadores/sinamics-g110>
- [24] Ovelma S.A.S. (2011, Sep.) Industrias Ovelma. [Online].  
<http://www.industriasovelma.com/>
- [25] Carel. (2003, June) Carel Industries. [Online].  
[http://www.carel.com/carelcom/web/eng/catalogo/prodotto\\_dett.jsp?id\\_gamma=33&id\\_prodotto=66&id\\_mercato=2](http://www.carel.com/carelcom/web/eng/catalogo/prodotto_dett.jsp?id_gamma=33&id_prodotto=66&id_mercato=2)
- [26] ONICON INC. (2013, July) ONICON INCORPORATED. [Online].  
<http://www.onicon.com/F1300.html>
- [27] Dwyer. (2014, Apr.) Dwyer Industries INC. [Online]. <http://www.dwyer-inst.com/Product/AirVelocity/Transmitters/Series641RM/Intro>
- [28] Tecpel. (2013, Nov.) Tecpel CO. LTD. [Online]. [http://www.tecpel.net/TRH-301\\_302\\_303.html](http://www.tecpel.net/TRH-301_302_303.html)
- [29] Omega. (2003, May) Omega Engineering Inc. [Online].  
<http://www.omega.com/prodinfo/thermocouples.html>

- [30] Dwyer. (2014, Apr.) Dwyer Industries Inc. [Online]. <http://www.dwyer-inst.com/Product/Pressure/SinglePressure/Gages-Digital/SeriesDSGT>
- [31] National Instruments. (2014, Jan.) National Instruments Corporation. [Online]. <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/es/nid/202546>
- [32] Chroma. (2013, Aug.) Chroma ATE Inc. [Online]. [http://www.chromaate.com/product/61600\\_series Programmable AC Source.htm](http://www.chromaate.com/product/61600_series_Programmable_AC_Source.htm)
- [33] Voltech. (2014, May) Voltech Instruments. [Online]. <http://www.voltech.com/>
- [34] Trane. (2014, July) Trane. [Online]. <http://www.trane.com/commercial/north-america/us/en/products-systems/equipment/unitary/water-source-heat-pumps/high-efficiency-h-v-wshp-1-5-to-6-tons.html>
- [35] Comercio y Turismo Ministerio de Industria. Presidencia de la Republica. [Online]. <http://wsp.presidencia.gov.co>
- [36] Trane. Trane industries. [Online]. <http://www.trane.com/commercial/north-america/us/en/products-systems/design-and-analysis-tools/calculators-charts.html>

## 8. ANEXOS

### Nomograma

El nomograma es un instrumento gráfico de cálculo que permite el computo gráfico y aproximado de una función de cualquier cantidad de variables, el cual representa simultáneamente el conjunto de las ecuaciones que definen determinado problema y el rango total de sus soluciones.

### Diseño de ductos

El nomograma de la compañía Greenheck es la herramienta con la cual se diseñó la ductería cuadrada y redonda para el diseño básico del banco de pruebas para bombas de calor de baja potencia.



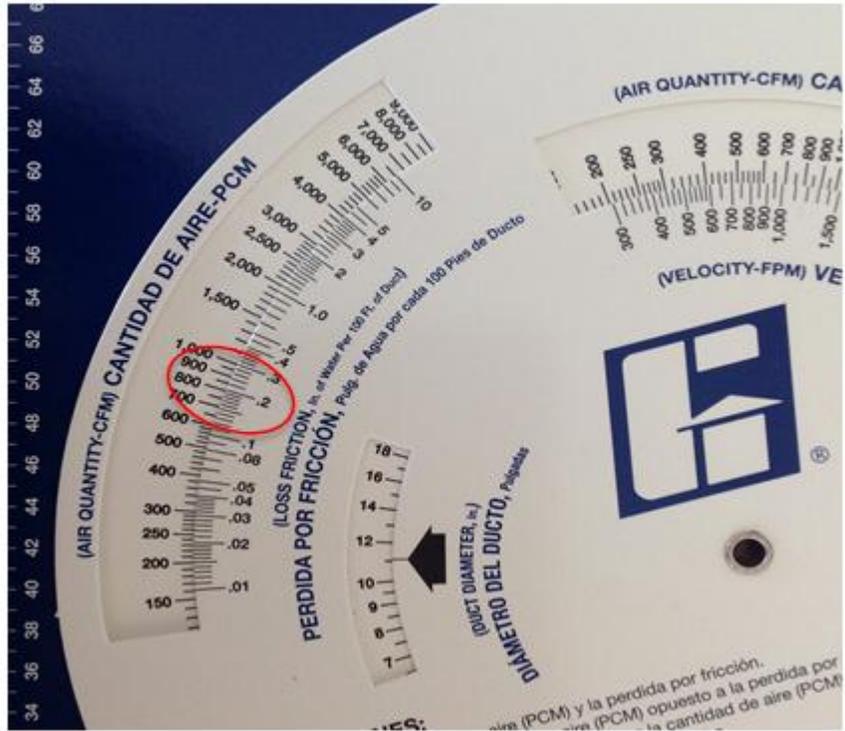
- **Instrucciones de uso**

1. Para el uso del nomogra para diseno de ductos los pasos son los siguientes:
  - A. Establezca la cantidad de aire (CFM) y la perdida por fricción.
  - B. Coloque el valor de la cantidad de aire (CFM) opuesto a las perdidas por fricción.
  - C. Lea el valor de la velocidad (FPM) opuesto a la cantidad de aire (CFM).
  - D. Lea el diámetro del ducto redondo opuesto a la flecha.
  - E. Lea las dimensiones equivalentes del ducto rectangular.

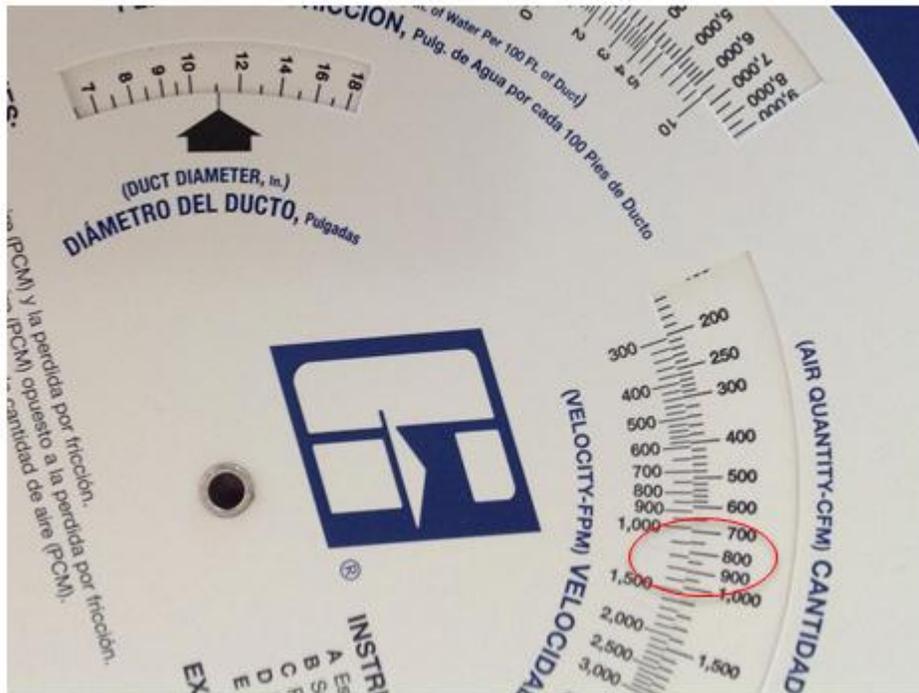
- **Aplicación**

Sección inicial primer tramo del ducto hasta rejilla de distribución.

- A. Establezca la cantidad de aire (CFM) y la perdida por fricción. Para nuestro diseño la cantidad de aire es de 800 CFM nominal de nuestro equipo y una pérdida de fricción de 0.2 Pulgadas de agua por cada 100 pies de ducto de acuerdo con la norma SMACNA.
- B. Coloque el valor de la cantidad de aire (CFM) opuesto a las perdidas por fricción.

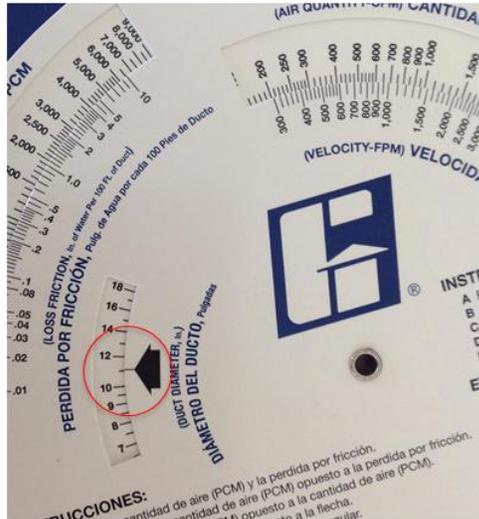


C. Lea el valor de la velocidad (FPM) opuesto a la cantidad de aire (CFM).



De acuerdo con el nomograma la velocidad del aire es de aproximadamente 1200 FPM.

D. Lea el diámetro del ducto redondo opuesto a la flecha.



Muestra el diámetro del ducto circular es de aproximadamente 11 pulgadas.

D. Lea las dimensiones equivalentes del ducto rectangular.

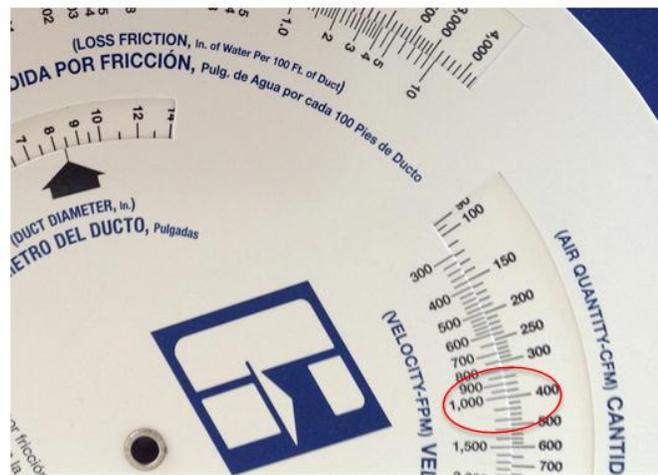


Las dimensiones del ducto rectangular es de 10 x 10 pulgadas.

2. Segunda sección del ducto de rejilla de distribución hasta la rejilla de distribución final. El proceso es completamente igual, el valor de la cantidad de aire que va a fluir por el segundo tramo del ducto es de 400 CFM, debido a que los otros 400 CFM fueron expulsados por la rejilla de distribución del primer tramo, pero las pérdidas por fricción sigue siendo de 0.2 Pulgadas de agua por cada 100 pies de ducto de acuerdo con la norma SMACNA.
  - A. Cantidad de aire 40 CFM y 0.2 pulgadas de agua por 100 pies de ducto.
  - B. Coloque el valor de la cantidad de aire (CFM) opuesto a las pérdidas por fricción.

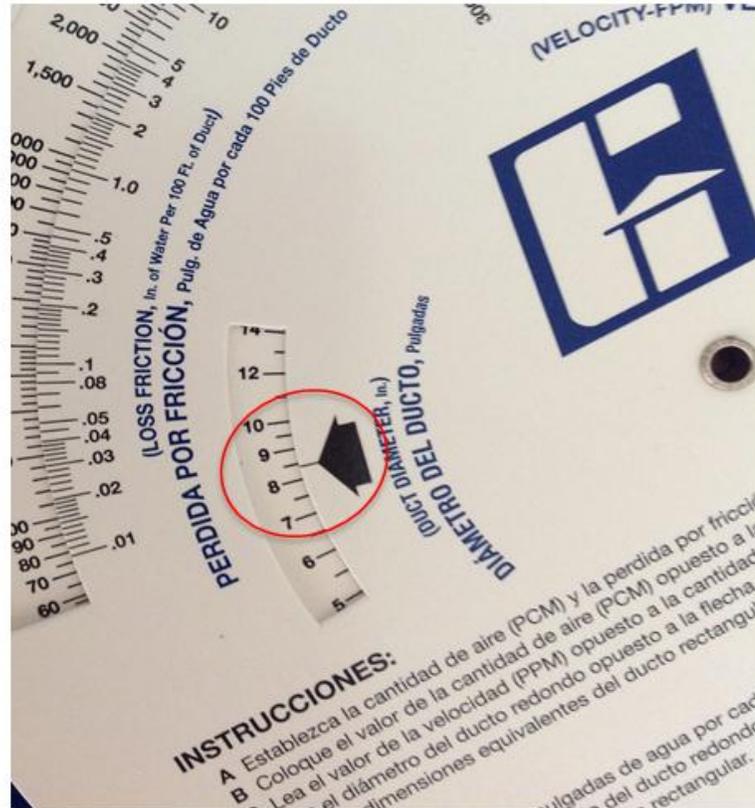


C. Lea el valor de la velocidad (FPM) opuesto a la cantidad de aire (CFM).



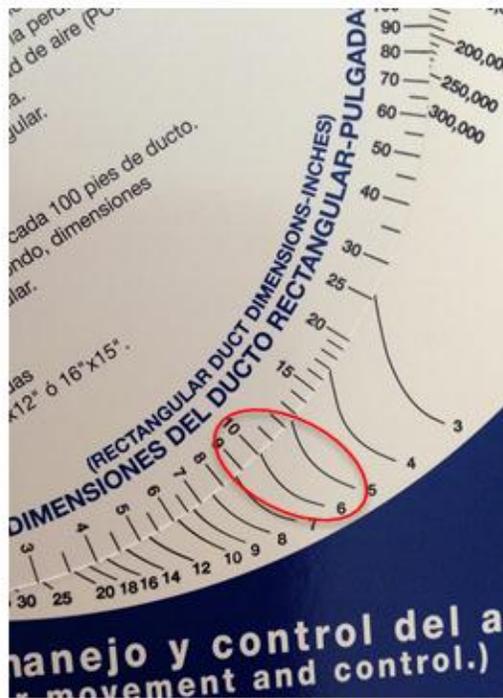
La velocidad del aire es de aproximadamente 1000 FPM.

D. Lea el diámetro del ducto redondo opuesto a la flecha.



El diámetro del ducto redondo para el segundo tramos es de 8 pulgadas.

D. Lea las dimensiones equivalentes del ducto rectangular.



las dimensiones del ducto rectangular son de 10 x 6 pulgadas.

Nota:

De acuerdo con la norma SMACNA, las reducciones de área transversal de los ductos se tienen que realizar en una longitud de 1.2 metros.