



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Diseño y construcción de una
bomba de calor geotérmica
de 3 TR**

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniero Mecánico

P R E S E N T A

Luis Fernando Carmona Moreno

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Héctor Miguel Aviña Jiménez



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2022

A mi madre Lilia

Por enseñarme a nunca rendirme ante las adversidades y siempre dar lo mejor de mí.

A mi padre Sergio

Que con el amor y confianza que me tuvo en vida me hizo la persona que soy hoy.

A mi hermana Iliana

Por su apoyo incondicional.

A mi familia y amigos

Por siempre creer en mí y por su amor incondicional.

A CONACYT-SENER proyecto 207032 CeMIE-Geo Ampliación, PA-03

Por su apoyo en la elaboración de la tesis

A grupo IIDEA

Por brindarme su sabiduría, sus instalaciones y soporte.

Al ingeniero Miguel Garduño

Por guiarme al desarrollo de este trabajo.

Al profesor Adrián Gallardo

Por inculcarme la importancia de la disciplina.

A todos mis profesores y profesoras

Por enseñarme el valor de la constancia y perseverancia.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	14
INTRODUCCIÓN.....	15
OBJETIVO GENERAL	28
OBJETIVO PARTICULAR.....	28
LÍMITES Y ALCANCES.....	28
1. LA BOMBA DE CALOR	29
1.1 INTRODUCCIÓN A LAS BOMBAS DE CALOR.....	29
1.1.1 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE LA BOMBA DE CALOR.....	30
1.2 COMPONENTES	31
1.2.1 COMPRESOR.....	32
1.2.2 CONDENSADOR.....	34
1.2.3 EVAPORADOR	36
1.2.4 ÓRGANO DE EXPANSIÓN.....	37
1.2.5 VÁLVULA DE CUATRO VÍAS.....	38
1.2.6 VENTILADOR.....	39
1.2.7 FILTRO DESHIDRATADOR	40
1.2.8 FLUIDO REFRIGERANTE	41
1.3 TIPOS DE BOMBA DE CALOR	42
1.3.1 BOMBAS DE CALOR FUENTE AIRE	43
1.3.2 BOMBAS DE CALOR FUENTE AGUA.....	44
1.3.3 BOMBAS DE CALOR FUENTE SUELO	44
1.4 APLICACIONES DE LA BOMBA DE CALOR	45
2. ENERGÍA GEOTÉRMICA.....	50
2.1 INTRODUCCIÓN.....	50
2.2 IMPACTO AMBIENTAL.....	56
2.3 BOMBA DE CALOR GEOTÉRMICA.....	57
2.4 FUNCIONAMIENTO.....	64
2.5 ENERGÍA GEOTÉRMICA EN MÉXICO.....	66
3. CONCEPTOS BÁSICOS PARA EL DISEÑO DE LA BOMBA DE CALOR GEOTÉRMICA.....	70

3.1 TERMODINÁMICA	70
3.2 TRANSFERENCIA DE CALOR	74
3.2.1 CONDUCCIÓN.....	74
3.2.2 CONVECCIÓN.....	75
3.2.3 RADIACIÓN	76
3.3 AIRE ACONDICIONADO (CARTA PSICROMÉTRICA)	83
3.3.1 TEMPERATURA DE BULBO SECO	85
3.3.2 TEMPERATURA DE BULBO HÚMEDO.....	86
3.3.3 TEMPERATURA DE ROCÍO	86
3.3.4 HUMEDAD RELATIVA.....	87
3.3.5 HUMEDAD ABSOLUTA.....	88
3.3.6 ENTALPÍA	88
3.3.7 VOLUMEN ESPECÍFICO.....	89
4. DISEÑO DE LA BOMBA DE CALOR GEOTÉRMICA	92
4.1 POTENCIA DE LA BOMBA DE CALOR.....	92
4.2 CARACTERÍSTICAS DEL LUGAR DE INSTALACIÓN (COMPOSTELA, NAYARIT)	92
4.3 DESARROLLO DEL CICLO DE REFRIGERACIÓN.....	96
4.3.1 MEMORIA DE CÁLCULO TÉRMICO DE EQUIPOS PRINCIPALES.....	96
4.3.1.1 SELECCIÓN DEL REFRIGERANTE (R410A Y R32).....	96
4.3.2 BALANCE DE MASA Y ENERGÍA DEL CICLO DE REFRIGERACIÓN	103
4.3.5 CICLO REAL.....	107
4.3.2.2 TEMPERATURA DE AIRE INYECCIÓN.....	111
4.3.3 CÁLCULO TÉRMICO PARA LA DISTRIBUCIÓN DE AIRE EN CADA DURANTE EL INVIERNO.....	119
4.3.4 CÁLCULO TÉRMICO PARA EL VERANO.....	122
4.4 DIAGRAMA DE TUBERÍAS E INSTRUMENTACIÓN.....	125
3.4.1 DTI EN INVIERNO.....	126
3.4.2 DTI EN VERANO.....	127
4.5 ESPECIFICACIÓN DE AISLAMIENTO	128
4.6 ESPECIFICACIÓN DE REFRIGERANTE (LLENADO)	129
4.7 SELECCIÓN DE EQUIPOS.....	132
4.7.1 COMPRESOR.....	132

4.7.2 CONDENSADOR.....	134
4.7.3 EVAPORADOR	135
4.7.4 VÁLVULA DE EXPANSIÓN	138
4.7.5 TUBERÍAS	139
4.7.6 VÁLVULA DE CUATRO VÍAS.....	140
4.7.7 FILTROS	141
4.7.8 VENTILADOR.....	142
4.8 LISTA DE MATERIALES Y PRECIO FINAL DE LA BCG 3 TR	144
4.9 PROGRAMA DE ENSAMBLE.....	146
5. MANUFACTURA Y ARMADO DE LA BOMBA	153
5.1 PROCESO DE MANUFACTURA DE LA BCG 3 TR.....	153
6. CONCLUSIONES.....	170
7. BIBLIOGRAFÍA.....	171
8. ANEXOS	181
8.1 PLANOS DE LA BCG 3 TR	181
8.1.1 ARREGLO GENERAL DE LA BCG 3 TR.....	182
8.1.2 ESTRUCTURA FRAME DE LA BCG 3 TR	183
8.1.3 ARREGLO DE TUBERÍAS Y LOCALIZACIÓN DE SENSORES DENTRO DE LA BCG 3 TR.....	184
8.1.4 ARREGLO DE SECCIÓN DE LA BCG 3 TR.....	185
8.1.5 PLANOS DEL EVAPORADOR.....	186
8.1.6 CAPAS DE AISLAMIENTO DENTRO DE LA BCG 3 TR.....	187
8.1.6 EXPLOSIVO DE LA BCG 3 TR.....	188
8.1.8 DIAGRAMA ELÉCTRICO	189
8.2 HOJA DE DATOS DE EQUIPO	190
8.2.1 FICHA TÉCNICA DEL REFRIGERANTE R-410a.....	190
8.2.2 FICHA TÉCNICA DEL COMPRESOR SELECCIONADO	195
.....	195
.....	196
8.2.3 FICHA TÉCNICA DE LA VÁLVULA DE EXPANSIÓN SELECCIONADA.....	197
8.2.4 FICHA TÉCNICA DE LA VÁLVULA DE CUATRO VÍAS	202
8.2.5 FICHA TÉCNICA DEL INTERCAMBIADOR DE PLACAS PLANAS.....	205
8.2.6 FICHA TÉCNICA DEL INTERCAMBIADOR DE TUBOS Y ALETAS	206
8.2.7 FICHA TÉCNICA DEL VENTILADOR	207
8.2.8 FICHA TÉCNICA DEL FILTRO	210

LISTA DE IMÁGENES

Imagen 1 Anomalía de la temperatura global con referencia al promedio entre los años 1961 a 1990 y concentraciones de CO₂ en la atmósfera como porcentaje de aire seco (Margarita Caballero, 2007)	17
Imagen 2 Impactos del calentamiento global al planeta Tierra (Naturales, 2021)	18
Imagen 3 Variación de la temperatura global (Naturales, 2021)	18
Imagen 4 Emisión mundial de CO₂ por consumo de combustibles fósiles (Naturales, 2021)	19
Imagen 5 Emisiones globales de GEI en los diferentes sectores por consumo de combustibles fósiles 2016 (Hannah Ritchie, 2021)	20
Imagen 6 Anomalía de la precipitación anual en México (1941-2017) (Naturales, 2021)	21
Imagen 7 Anomalía de la temperatura media anual en México (1971-2017) (Naturales, 2021) 21	
Imagen 8 Desastres naturales en México (Naturales, 2021)	22
Imagen 9 Porcentaje de hogares con aire acondicionado 2018 (Agency, The Future of Cooling, 2018)	22
Imagen 10 Hogares censales (INEGI, Hogares y Vivienda, 2020)	23
Imagen 11 Proyección de uso de A/C en el mundo (Agency, The Future of Cooling, 2018)	23
Imagen 12 Proyección de uso de A/C en México (Agency, The Future of Cooling, 2018)	24
Imagen 13 Venta de tecnologías para la calefacción en un escenario sustentable de 2010 a 2030 (Agency, Heating, 2020)	25
Imagen 14 Lo renovable de un BC (ECI, 2018)	26
Imagen 15 Energía necesaria para brindar 1 kWh de calor útil (ECI, 2018)	27
Imagen 16 Composición de la bomba de calor (García Montes, 2019)	29
Imagen 17 Ciclo ideal de refrigeración y su representación en el diagrama de Mollier (Cengel & Boles, 2011)	30
Imagen 18 Circuito interno de una bomba de calor (Danfoss, Thermostatic expansion valves Type TGE, 2021)	31
Imagen 19 Compresor alternativo (Copco, 2020)	32
Imagen 20 Compresor de tornillo (IRIM, 2015)	33
Imagen 21 Compresor Scroll (Supercompresores, 2021)	33
Imagen 22 Condensador tubo y coraza (VILLAGOMEZ, 2010)	34
Imagen 23 Condensador de doble tubo (CANTABRIA, 2021)	34
Imagen 24 Intercambiador de placas (Laval, 2021)	35
Imagen 25 Intercambiador de calor de tubos y aletas (Blancarte, 2014)	36
Imagen 26 Tubo capilar (GRAINGER, 2021)	37
Imagen 27 Válvula de expansión termostática (Hernández A. M., 1990)	38
Imagen 28 Válvula de cuatro vías (Ibérica, 2016)	38
Imagen 29 Funcionamiento de la válvula de cuatro vías en modo calefacción (Saginomiya, 2021)	39
Imagen 30 Funcionamiento de la válvula de cuatro vías en modo refrigeración (Saginomiya, 2021)	39
Imagen 31 Ventilador centrífugo y axial (RÖSSLER, 2019)	40
Imagen 32 Incremento de presión característica de un ventilador axial y centrífugo (RÖSSLER, 2019)	40
Imagen 33 Filtros deshidratadores (Danfoss, Filtros secadores, 2021)	41
Imagen 34 Bomba de calor fuente aire (efENERGIA, 2019)	43

Imagen 35 Bomba de calor fuente agua (Emmanuel, 2014)	44
Imagen 36 Bomba de calor fuente suelo (Energy-Saving-Trust., 2007).....	45
Imagen 37 BC para la producción de aceites comestibles (Hernández A. M., 1990)	46
Imagen 38 BC para la concentración de un producto (Hernández A. M., 1990)	46
Imagen 39 Proceso de secado de tabaco (Godoy, 2008).....	47
Imagen 40 Túnel de deshidratación de lodos (Godoy, 2008)	48
Imagen 41 BC en piscifactoría (Godoy, 2008).....	48
Imagen 42 BC en la fermentación de pan (Godoy, 2008).....	49
Imagen 43 Sistema geotérmico (Lahsen, 2021).....	51
Imagen 44 Estructura interna de la Tierra (Mary H. Dickson, 2003)	51
Imagen 45 Secciones del planeta Tierra (Kiril Popovski, 2021).....	52
Imagen 46 Placas litosféricas, dorsales y fosas oceánicas, zonas de subducción y campos geotérmicos (Fanelli, 2004).....	53
Imagen 47 Distribución de los recursos geotérmicos mundiales (California., 2011)	54
Imagen 48 Aplicaciones de la energía geotérmica de acuerdo a su temperatura (ESPINOSA, 2019)	56
Imagen 49 Comparación del incremento de temperatura entre una bomba de calor fuente aire y suelo (CGC, 2010)	57
Imagen 50 Perfiles de temperatura en la tierra a una profundidad de 15 m (ESPINOSA, 2019)	58
Imagen 51 Circuito horizontal en configuración espiral o slinky (Acondicionados, 2017).....	59
Imagen 52 Configuración horizontal uno (ASHRAE, 2015).....	59
Imagen 53 Configuración horizontal dos (ASHRAE, 2015)	59
Imagen 54 Configuración horizontal tres (ASHRAE, 2015).....	60
Imagen 55 Configuración horizontal cuatro (ASHRAE, 2015)	60
Imagen 56 Configuración horizontal cinco (ASHRAE, 2015)	60
Imagen 57 Configuración vertical (ASHRAE, 2015).....	61
Imagen 58 Emisiones de CO₂ por fuente (Martín, 2011).....	61
Imagen 59 Porcentaje de ahorro económico (Martín, 2011)	62
Imagen 60 Porcentaje de ahorro energético (Martín, 2011).....	62
Imagen 61 Eficiencia para las bombas de calor en calefacción y refrigeración separadas por tecnología (IEA, 2011)	64
Imagen 62 Funcionamiento de una BCG en refrigeración y calefacción (Marín A. C., 2019) ..	65
Imagen 63 Temperatura máxima promedio mensual Junio 2021 (SMN, 2021)	67
Imagen 64 Temperatura mínima promedio mensual Enero 2021 (SMN, 2021).....	67
Imagen 65 Mapa de gradiente geotérmico y flujo de calor en la República Mexicana (VELÁZQUEZ, 2020)	68
Imagen 66 Ciclo de Carnot (Gutiérrez, 2012)	72
Imagen 67 Motor de Carnot (García Á. F., 2010).....	73
Imagen 68 Frigorífico de Carnot (García Á. F., 2010).....	73
Imagen 69 Transferencia de calor por conducción (Materia, 2021)	74
Imagen 70 Transferencia de calor por convección (Yunus A. Cengel, 2011).....	75
Imagen 71 Transferencia de calor de una superficie caliente al aire (Yunus A. Cengel, 2011) 76	
Imagen 72 Transferencia de calor por radiación (Life, 2022).....	77
Imagen 73 Absorción y reflejo de la radiación por una superficie opaca (Yunus A. Cengel, 2011)	78
Imagen 74 Radiación entre superficie y superficies circundantes (Yunus A. Cengel, 2011).....	78

Imagen 75 Sentido de los fluidos en paralelo y contraflujo (Yunus A. Cengel, 2011).....	79
Imagen 76 Tipos de aletas. (a), (b), (c) y (d) longitudinal; (e) y (f) radial; (g), (h), (i) aguja (Zambrano, 2019).....	80
Imagen 77 Configuraciones de flujo en intercambiadores de flujo cruzado (Yunus A. Cengel, 2011)	80
Imagen 78 Resistencias térmicas en la transferencia de calor de dos fluidos con diferente temperatura (Yunus A. Cengel, 2011)	81
Imagen 79 Resistencias térmicas para una capa cilíndrica (o esférica) sujeta a convección en el interior o exterior (Yunus A. Cengel, 2011)	82
Imagen 80 Transferencia de calor a través de un cilindro compuesto (Yunus A. Cengel, 2011)	82
Imagen 81 Carta psicrométrica (Rodrigo de Bengoechea)	84
Imagen 82 Temperatura de bulbo seco (INAC, 2022)	85
Imagen 83 Temperatura de bulbo húmedo (INAC, 2022)	86
Imagen 84 Temperatura de rocío (INAC, 2022)	87
Imagen 85 Humedad relativa (INAC, 2022).....	87
Imagen 86 Humedad absoluta (INAC, 2022)	88
Imagen 87 Entalpía dentro de la carta psicrométrica	89
Imagen 88 Volumen específico dentro de la carta psicrométrica (INAC, 2022).....	89
Imagen 89 Procesos básicos para el acondicionamiento del aire (MONTAÑA, 2017)	91
Imagen 90 Localización de Nayarit dentro de la República Mexicana (méxicoreal, 2021).....	92
Imagen 91 Compostela, Nayarit (INEGI, Marco Geoestadístico Municipal 2020, 2020)	93
Imagen 92 Domo de San Pedro en Compostela, Nayarit (D. Castillo H., 1992)	94
Imagen 93 Distribución del termalismo en el Domo de San Pedro (D. Castillo H., 1992).....	95
Imagen 94 Refrigerante R-410a (Refrigeration, 2021)	98
Imagen 95 Presiones típicas de operación para el R-410a (Prah, 2001).....	100
Imagen 96 Ciclo ideal de refrigeración representado en el diagrama de Mollier (Cengel & Boles, 2011)	100
Imagen 97 Diagrama de Mollier para el R 410a (Chemours, 2019).....	102
Imagen 98 Carta psicrométrica	112
Imagen 99 Punto cero dentro de la carta psicrométrica	114
Imagen 100 FCS en la carta psicrométrica	115
Imagen 101 Condiciones de confort dentro de la carta psicrométrica	116
Imagen 102 Línea de FSC desplazada a las condiciones de confort	117
Imagen 103 Temperatura de inyección	118
Imagen 104 Diagrama de flujo de proceso de una BCG en modo calefacción (elaboración propia)	119
Imagen 105 Intercambiador geotérmico (Flores, 2021).....	122
Imagen 106 Diagrama de flujo de proceso de la BCG en modo refrigeración (elaboración propia)	122
Imagen 107 DTI de la BCG 3 TR en invierno (elaboración propia)	126
Imagen 108 DTI de la BCG 3 TR en verano (elaboración propia)	127
Imagen 109 Lana mineral para aislar las paredes y techo de la bomba (Skintec, 2022).....	128
Imagen 110 Espuma elastomérica que aísla las tuberías (ACMISA, 2022).....	128
Imagen 111 Posición de las válvulas para el llenado del refrigerante (SACIFIA, 2022)	129
Imagen 112 Manifold (FRILAV, 2022)	130

Imagen 113 Báscula para carga de refrigerante (mercadolibre, Elitech Lmc-200a Báscula Electrónica De Carga De Refrigerant, 2022)	130
Imagen 114 Tanque de refrigerante R-410a (mercadolibre, Gas Refrigerante Boya Genetron R410a Quimobasicos 5.0 Kg, 2022)	130
Imagen 115 Bomba de vacío (TRS, 2022)	131
Imagen 116 Compresor Danfoss HRH036U1 (Equipo dentro de la BCG 3 TR).....	133
Imagen 117 Intercambiador de placas FC	135
Imagen 118 Intercambiador de tubos y aletas sin cubierta (elaboración propia)	136
Imagen 119 Intercambiador de tubos y aletas con cubierta (elaboración propia)	137
Imagen 120 Intercambiador de tubos y aletas físico	137
Imagen 121 Válvula de expansión SPORLAN	139
Imagen 122 Rollos de tubería de cobre tipo L	140
Imagen 123 Válvula de cuatro vías seleccionada	141
Imagen 124 Filtro deshidratador SPORLAN	141
Imagen 125 Captura de pantalla del software EasyVent para la selección del ventilador	143
Imagen 126 Ventilador centrífugo S&P (S&P, Centrífugos serie CEB-T, 2021)	143
Imagen 127 PTR con el que se forma la estructura de la BCG 3 TR (elaboración propia) ...	146
Imagen 128 Lámina inferior para el acomodo de los equipos (elaboración propia)	147
Imagen 129 Acomodo de los equipos más grandes al interior de la BCG 3 TR (elaboración propia)	147
Imagen 130 Conexión de tuberías de equipos (elaboración propia)	148
Imagen 131 Localización de las Tees donde se realiza la carga de refrigerante (elaboración propia)	149
Imagen 132 Tuberías de entrada y salida para el ciclo geotérmico (elaboración propia)	150
Imagen 133 BCG 3 TR (elaboración propia)	150
Imagen 134 Espacio en la lámina para permitir el libre flujo de aire por el intercambiador de tubos y aletas (elaboración propia)	151
Imagen 135 Circuito completo con intercambiador geotérmico y la BC (elaboración propia)	152
Imagen 136 Tronzadora de metal	153
Imagen 137 Estructura de PTR calibre 16 1"x 1" para la BCG 3 TR	154
Imagen 138 Proceso de soldar la estructura de PTR	154
Imagen 139 Estructura final de PTR para la BCG 3 TR	155
Imagen 140 Sierra caladora	156
Imagen 141 Corte por medio de sierra caladora para las láminas de acero galvanizado calibre 24	156
Imagen 142 Láminas que forman parte de la estructura de la BCG 3 TR	157
Imagen 143 Algunos de los equipos que van en el interior de la BCG	157
Imagen 144 Componentes para la fabricación de la BCG 3 TR	158
Imagen 145 Intercambiador de calor de tubos y aletas que funcionará como evaporador o condensador dependiendo la configuración de la BGC 3 TR	159
Imagen 146 Intercambiador de tubos y aletas montado en estructura de la BCG 3 TR	159
Imagen 147 Abertura para los ductos conectados al ventilador centrífugo	160
Imagen 148 Pared en el interior de la BCG para la separación del ventilador y el radiador 160	
Imagen 149 Aislante térmico de la BCG 3 TR	161
Imagen 150 Colocación provisional de las tuberías de cobre junto con accesorios	161
Imagen 151 Soldadura con oxiacetileno con ambiente de nitrógeno (elaboración propia)	162

Imagen 152 Instalación de las tuberías salientes de la válvula de cuatro vías por oxiacetileno	162
Imagen 153 Bulbo sensor de la válvula de expansión	163
Imagen 154 Arreglo final de tuberías	164
Imagen 155 Colocación de las válvulas de servicio para el llenado de refrigerante a la bomba de calor	164
Imagen 156 Llenado de aceite a la bomba de vacío	165
Imagen 157 Conexiones del manifold con las tuberías de alta y baja, así como la bomba de vacío	165
Imagen 158 Bomba de calor con conexiones eléctricas, aislamiento y conexiones al intercambiador geotérmico	166
Imagen 159 Boya de refrigerante sobre báscula y conexiones del manifold	166
Imagen 160 Lector de la balanza en cero	167
Imagen 161 Apertura de las válvulas del manifold para proseguir con el llenado de refrigerante	167
Imagen 162 Alberca para el agua de salida del intercambiador de placas	168
Imagen 163 Manguera conectada a la entrada del intercambiador de placas tomada de un tanque de agua	168
Imagen 164 Arreglo general de la BCG 3 TR (elaboración propia)	182
Imagen 165 Estructura FRAME de la BCG 3 TR (elaboración propia)	183
Imagen 166 Interconexión de tuberías y puesta de sensores dentro de la BCG 3 TR (elaboración propia)	184
Imagen 167 Arreglo de sección de la BCG 3 TR (elaboración propia)	185
Imagen 168 Planos del evaporador de la BCG 3 TR (elaboración propia)	186
Imagen 169 Aislante de lana mineral en las paredes y techo de la BCG 3 TR (elaboración propia)	187
Imagen 170 Explosivo de la BCG 3 TR (elaboración propia)	188
Imagen 171 Diagrama eléctrico de la BCG 3 TR	189

LISTA DE TABLAS

Tabla 1	Propiedades de los materiales usados en las placas.....	35
Tabla 2	Propiedades del cobre y aluminio	36
Tabla 3	Foco frío y caliente de las BC	43
Tabla 4	Usos directos de la geotermia en México.....	69
Tabla 5	Composición del aire seco	83
Tabla 6	Composición del aire atmosférico	83
Tabla 7	Condiciones climáticas de Compostela, Nayarit	93
Tabla 8	Propiedades de los refrigerantes considerados en la BCG 3 TR.....	97
Tabla 9	Propiedades en condensación y evaporación de los refrigerantes	97
Tabla 10	Parámetros del ciclo de refrigeración.....	98
Tabla 11	Balance de masa y energía del ciclo de refrigeración ideal	103
Tabla 12	Dimensionamiento básico de equipos en ciclo ideal	107
Tabla 13	Temperaturas de sobrecalentamiento y subenfriamiento	107
Tabla 14	Balance de masa y energía del ciclo de refrigeración real	108
Tabla 15	Comparación del parámetro COP	110
Tabla 16	Balance de masa y energía del aire acondicionado en Invierno.....	120
Tabla 17	Balance de masa y energía del sistema geotérmico en invierno	121
Tabla 18	Características del intercambiador geotérmico.....	121
Tabla 19	Balance de masa y energía del aire acondicionado en verano.....	123
Tabla 20	Balance de masa y energía del sistema geotérmico en verano.....	124
Tabla 21	Características que debe cumplir el compresor	132
Tabla 22	Selección de compresor Scroll.....	133
Tabla 23	Características del condensador	134
Tabla 24	Selección de condensador	134
Tabla 25	Características del evaporador	135
Tabla 26	Dimensionamiento del intercambiador de tubos y aletas	136
Tabla 27	Fabricación del evaporador.....	137
Tabla 28	Características de la válvula de expansión.....	138

Tabla 29 Selección de la válvula de expansión.....	138
Tabla 30 Selección de tuberías	139
Tabla 31 Características de la válvula de cuatro vías	140
Tabla 32 Selección de la válvula de cuatro vías	140
Tabla 33 Selección de filtro deshidratador	141
Tabla 34 Parámetros para la selección de ventilador	142
Tabla 35 Selección de ventilador.....	143
Tabla 36 Precio total de los equipos principales dentro de la BCG 3 TR.....	144
Tabla 37 Lista de equipos que se usan en la fabricación de la bomba de calor.....	145
Tabla 38 Consumibles en la fabricación de la bomba de calor	145
Tabla 39 Verificación de la funcionalidad de la BCG 3 TR	169

NOMENCLATURA

BCG	Bomba de Calor Geotérmica
BC	Bomba de Calor
BCG 3 TR	Bomba de Calor Geotérmica de 3 Toneladas de Refrigeración
TR ¹	Toneladas de Refrigeración
GWP	Global Warming Potential (Potencial global de calentamiento)
GEI	Gases de Efecto Invernadero
COP	Coefficient of performance (Coeficiente de operación)
EER	Energy Efficiency Rating (Rango de eficiencia energética)
SEER	Seasonal Energy Efficiency Ratio (Ratio de eficiencia energética de Temporada)
BTU	British Thermal Unit (Unidad Térmica Británica)
A/C	Aire Acondicionado

¹ Cantidad de calor que se requiere para fundir dos mil libras de hielo en 24 h (REFRIGERANTES, 2021)

RESUMEN

En este trabajo se incluye una breve introducción histórica de las bombas de calor, las consecuencias que trae consigo el continuo cambio climático en el mundo y el país si se siguen usando fuentes de energía convencionales como combustibles fósiles en el campo de la climatización para el sector residencial, además, se presenta la cantidad de equipos de aire acondicionado y calefacción dentro del territorio nacional, la proyección de las bombas de calor (BC) a futuro y las ventajas que presentan estos equipos por encima de los demás.

En el capítulo posterior se introduce al funcionamiento de las bombas de calor por el ciclo de refrigeración, sus componentes internos y su propósito, así como los tipos de bombas de calor (fuente aire, fuente agua y fuente suelo) y finalmente, algunas de las aplicaciones, además de la de climatización, que se llevan a cabo haciendo uso de las BC.

Para el capítulo siguiente se toca el tema de la energía geotérmica el cual brindará una visión hacia el amplio uso que se le puede dar a este recurso, el impacto que tendría el hacer uso de esta energía alterna, el funcionamiento de la bomba de calor geotérmica (BCG) y finalmente cómo se encuentra el país en potencial geotérmico.

Se deja en claro cuál fue el proceso para llevar a cabo el diseño de esta BCG 3 TR, se pone la información del lugar correspondiente donde se pretende llevar a cabo la instalación en sitio de la bomba de calor, se incluye el cálculo del balance de masa y energía del ciclo de refrigeración para un caso ideal como para el caso real en verano e invierno; de igual manera se da a conocer cómo se llevó a cabo la selección de los equipos que conforman a la BC, la lista de materiales que se usaron para esta bomba y por consiguiente, el precio de la bomba; y el programa de ensamble que se debe seguir para su construcción física.

El siguiente capítulo incluye el proceso de manufactura para llevar a cabo la construcción de la BCG, definiendo los materiales junto con las herramientas que se emplearon en el proceso de fabricación y adjuntando la evidencia fotográfica correspondiente.

Al final de este trabajo se incluye las fichas técnicas de los equipos seleccionados que forman parte de la BCG 3 TR, las tablas de vapor del refrigerante seleccionado (R-410a) y los planos de construcción de la bomba de calor.

INTRODUCCIÓN

La búsqueda para mejorar las condiciones en las que los seres humanos vivimos ha sido una constante en nuestra historia, desde los beneficios que trajo consigo el descubrimiento del fuego como el poder brindar calor, luz y protección, así como, la ventaja de poder cocinar alimentos hasta la generación de un medio de transporte que permitiera el desplazamiento continuo de personas por medio de una reacción de oxidación y energía térmica; los dos ejemplos anteriores son solo unos de los muchos descubrimientos que la humanidad ha conseguido a lo largo de su estadía en este planeta. La prosperidad que ha tenido el ser humano a lo largo de la historia es gracias a que es un ser capaz de adaptar a su beneficio el entorno que lo rodea logrando satisfacer sus necesidades; esta adaptación del entorno se debe en gran medida que el humano aprendió a manipular a la energía sacándole provecho para cumplir con su objetivo; sin embargo, la avaricia por la búsqueda de esta satisfacción ha hecho que la transformación de la energía traiga consecuencias perjudiciales para el planeta Tierra como el cambio climático, la crisis energética, etc. que son temas que se tocarán a profundidad más adelante. La climatización, ya sea en forma de calefacción o refrigeración, fue una de las formas en las que se manipuló la energía para satisfacer la vida humana.

Una de las formas pioneras en calentar un recinto fue por medio de fogatas que permitían que el fuego fuera el encargado de calentar el aire, a partir de ese momento la separación entre el humano y la combustión y combustibles dejó de existir; sin embargo, se tiene conocimiento que el primer sistema complejo de calefacción fue el *Hipocausto* desarrollado por los romanos, el cual consistía en túneles localizados en el suelo de las habitaciones por donde pasaba el humo de la combustión. Otro de los equipos desarrollados para llevar a cabo la calefacción fueron las chimeneas empotradas en la pared y las estufas (Estufas de Terracota) entre los siglos X y XIII D.C., en estas el humo se dirige al exterior y se aprovecha el calor por convección, conducción y radiación de la combustión. (Pérez, 2013) Al llegar la Revolución Industrial (segunda mitad del siglo XVIII y primera del XIX) los sistemas de calefacción empezaron a ocupar fluidos como el aire, vapor o agua caliente, así, se separó la producción de calor (caldera) de la emisión de calor (radiadores), en los sistemas de agua el calor se genera en la caldera y éste se transmite a la red de tuberías que circulan el agua caliente hasta los radiadores, este tipo de sistemas se usaron hasta después de la Segunda Guerra Mundial. (Pérez, 2013)

Otra de las formas en las que el humano ha tratado de encontrar el confort es por medio de la refrigeración de los hogares empleando el aire acondicionado. Se tiene registro que desde los egipcios ya se manejaba un rudimentario método para enfriar el palacio del faraón que consistía en que tres mil esclavos, por la noche, tomaban los bloques de piedra para acarrearlos al Desierto del Sahara donde las temperaturas alcanzaban niveles muy bajos, enfriando los bloques. Después los acarreaban de regreso y volvían a colocarlas en su sitio. (Espinoza, 2013) En 1758 Benjamín Franklin experimentó con líquidos volátiles de rápida evaporación como el alcohol o éter para enfriar agua logrando bajar su temperatura de 18 °C a -14 °C por debajo del punto de congelación produciendo así, hielo. De igual manera para 1818 Michael Faraday comprobó que si una sustancia volátil es comprimida y condensada con fuerza mecánica y después evaporada rápidamente se enfría el agua, asimismo John Gorrie notó que la recuperación en pacientes era mucho mejor en climas fríos, es por ello, que instaló bandejas con hielo pegadas al techo sobre las camas de los pacientes y por las densidades el aire frío baja mientras que el caliente sube. (acr, 2020) No fue hasta Julio de 1902 que Willis Haviland Carrier diseñó el primer sistema de aire acondicionado capaz de controlar la humedad y temperatura para una imprenta; en 1906 Carrier patenta su aparato de tratamiento de aire aplicándolo al sistema de ventilación y calefacción considerándolo el primer sistema centralizado (Carrier, 2021); posteriormente continuó innovando equipos para llevar a cabo el acondicionamiento del aire y su empresa aún sigue funcionando hasta la fecha.

Después de esta breve introducción a la historia de la climatización se puede suponer que al principio los equipos desarrollados no poseían una eficiencia muy grande al igual que, para esa época, no consternaba mucho el cuidado del medio ambiente. Sin embargo, con el paso del tiempo y todas las consecuencias que trae consigo la quema de combustibles y el uso ineficiente de la energía eléctrica, así como el gasto de tener que comprar un calefactor para usar durante la época de invierno y un aire acondicionado para la de verano, se decidió buscar la manera de climatizar los lugares haciendo uso de equipos con mejor capacidad de transformar la energía eléctrica en térmica, que trajera ambas formas de acondicionamiento incluidas y que hiciera uso de los recursos que el planeta tiene para ofrecer. Es así como surgió el uso de las '*bombas de calor*'.

La primera propuesta de bomba de calor surgió en 1852 cuando Lord Kelvin ideó un circuito frigorífico hermético que no resultó favorable, el cual funcionaba con la absorción de calor por un gas refrigerante y sigue tres reglas básicas de la termodinámica:

1. El calor se transmite de la temperatura más alta a la más baja.
2. El cambio de estado de líquido a gas absorbe calor.
3. La presión está directamente relacionada a la temperatura. (Espinoza, 2013)

Este experimento abrió la puerta para el concepto del ciclo de compresión de vapor, Krauss y Morley extendieron los estudios de Kelvin y analizaron el potencial de las bombas de calor. Haldane produjo una gráfica de la relación del COP y la temperatura exterior; asimismo, construyó un sistema de distribución de agua caliente usando el aire exterior y el agua de la ciudad como fuentes de calor; se tiene conocimiento que otras fuentes de calor que se usaron fueron los ríos, aguas residuales y una bodega de fermentación de una cervecería. Summer describe un sistema desarrollado agua-agua con un COP de 3.0 para un edificio en Norwich, Inglaterra; en 1949 Montagnon & Ruckley mencionan la utilización de una bomba de calor para el Royal Festival Hall en Londres para la cual emplearon al río Támesis como fuente y el trabajo hecho por un motor de una aeronave a gas. (Goldschmidt, 1984)

Como ya se mencionó anteriormente, uno de los principales propósitos por los cuales surgió la idea de la bomba de calor fue el de aprovechar los recursos que el planeta Tierra tiene para ofrecer, por consiguiente, una de las maneras más eficientes, más amigable con el ambiente y con mayor proyección al futuro son las bombas de calor, que hacen uso de la energía geotérmica. Esta idea se remonta hasta 1912 cuando el ingeniero mexicano-sueco Heinrich Zoelly patentó la primera bomba de calor que usaba la energía del suelo (Spitler, 2021), de este evento en adelante se han ido perfeccionando y mejorando las eficiencias y capacidades de los equipos que forman a la bomba de calor, además, de irse adaptando a los nuevos fluidos de trabajo que se ofrecen en el mercado con el propósito de disminuir el impacto al medio ambiente.

Uno de los propósitos más importantes para el uso de las bombas de calor es la disminución de las emisiones nocivas para el ambiente que generan el conocido calentamiento global. Este fenómeno se refiere a la tendencia de la temperatura global del planeta de incrementarse durante los últimos 150 años, fenómeno que se atribuye al efecto de la contaminación humana, en particular a la quema de combustibles fósiles como el carbón y el petróleo y a la tala de bosques. (Margarita Caballero, 2007)

El calentamiento global ha ido de la mano con una tendencia hacia un incremento en el CO₂ atmosférico (Imagen 1), lo que indica que la causa de esta tendencia hacia el calentamiento es una intensificación del efecto invernadero. De allí que frecuentemente se usan indistintamente ambos términos, pero mientras uno describe el fenómeno del incremento de temperatura reciente, el otro se refiere al mecanismo que lo causa. (Margarita Caballero, 2007)

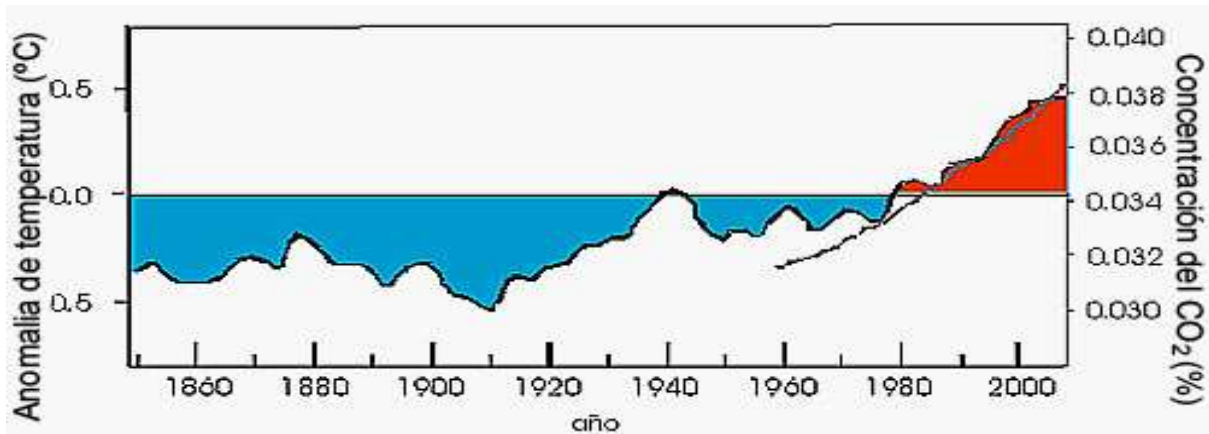


Imagen 1 Anomalía de la temperatura global con referencia al promedio entre los años 1961 a 1990 y concentraciones de CO_2 en la atmósfera como porcentaje de aire seco (Margarita Caballero, 2007)

Es difícil cuantificar qué proporción del calentamiento global es atribuible a causas naturales y humanas, pero los resultados de modelos climáticos, tomando en cuenta todas las potenciales causas, indican que sólo tomando en consideración la contribución por actividades humanas es posible explicar la tendencia tan marcada al calentamiento que se observa sobre todo durante las últimas décadas (desde 1980 a la fecha).

La Imagen 2 enseña los diferentes impactos que ha tenido el cambio climático en los diferentes continentes, alguno que otro país, sectores y biodiversidad. Una de las principales consecuencias que se tienen son alteraciones en el ciclo hidrológico debido a los cambios en los patrones de precipitación, temperatura y en los balances de los depósitos de hielos de glaciares y otros mantos. De igual manera la extensión de los glaciares sigue disminuyendo en diversas regiones del mundo como los Andes, Groenlandia y la Antártica, este incremento de temperatura también ha provocado el deshielo de los suelos congelados (el permafrost) en latitudes altas y zonas elevadas, liberando metano retenido a la atmósfera, así como la afectación a la vegetación cerca de ellos. (Naturales, 2021)

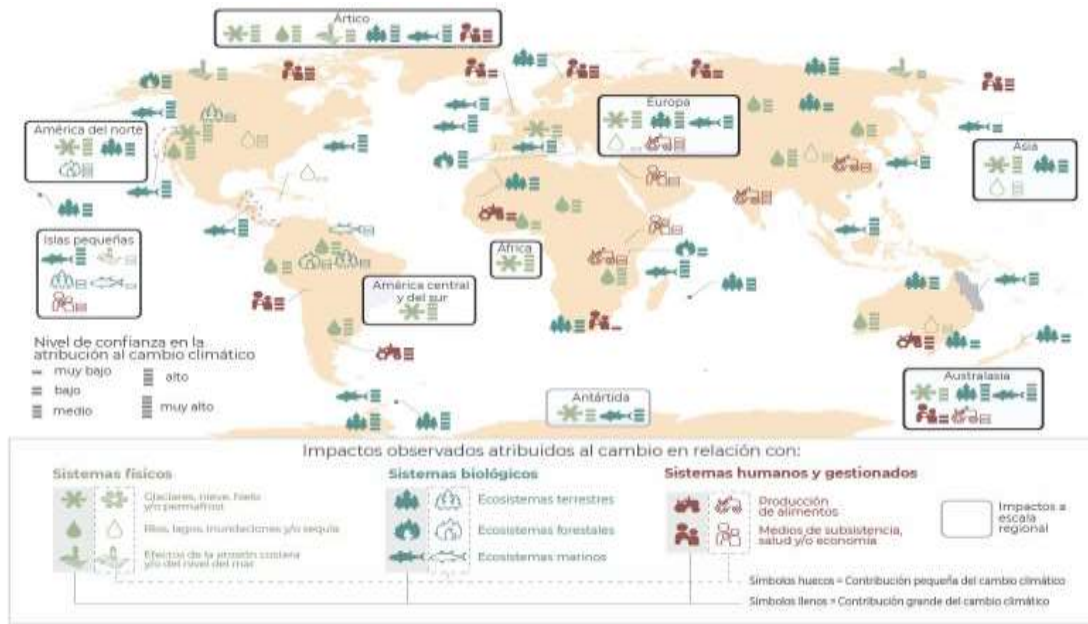


Imagen 2 Impactos del calentamiento global al planeta Tierra (Naturales, 2021)

El sector agropecuario se ve afectado de igual manera pues el cambio climático ha provocado una disminución en el rendimiento de cultivos como el trigo y el maíz, así como una reducción en el rendimiento del arroz y la soya, lo que trae consigo una afectación en la seguridad alimentaria y con ello un aumento en los precios. Los cambios en el clima y la ocurrencia de eventos extremos pueden conducir a la reducción e incluso la pérdida de las poblaciones de numerosas especies. (Naturales, 2021).

En cuestión de salud humana, se tiene registro de un incremento en la mortalidad por el calor extremo, estos cambios de temperatura y precipitación han extendido la población de mosquitos que transmiten el dengue y el paludismo. En la Imagen 3 se muestra cuán variado ha sido el cambio en la temperatura anual global (considerando la terrestre y la oceánica) a lo largo del tiempo, este calentamiento se ha acompañado en las latitudes medias por el aumento del número de días cálidos extremos, así como por la disminución de la cantidad de días gélidos extremos y heladas. Los registros demuestran que las temperaturas extremas y las olas de calor en el mundo aumentaron en frecuencia y duración evidenciando así el ‘calentamiento global’. (Naturales, 2021).



Imagen 3 Variación de la temperatura global (Naturales, 2021)

El clima está determinado por la energía que llega del Sol y por las propiedades de la superficie terrestre y de la atmósfera, como la reflexión, absorción y emisión de energía; un incremento en las concentraciones de los GEI (provocada principalmente por la quema de combustibles fósiles y la deforestación) aumenta la absorción atmosférica de la energía que emite la superficie terrestre en forma de radiación infrarroja quedándose en la atmósfera como calor en un invernadero. El gas de efecto invernadero que tiene mayor impacto sobre el clima de la Tierra es el dióxido de carbono (CO₂). Este gas es transparente a la radiación visible, por lo que no absorbe la energía del Sol, pero retiene la que emite la Tierra como radiación infrarroja, de longitud de onda más larga. (Naturales, 2021). Como se muestra en la Imagen 4, el incremento en la emisión mundial de CO₂ ha ido en incremento conforme los años pasan, lo que indica una demanda mayor en el empleo de combustibles fósiles.

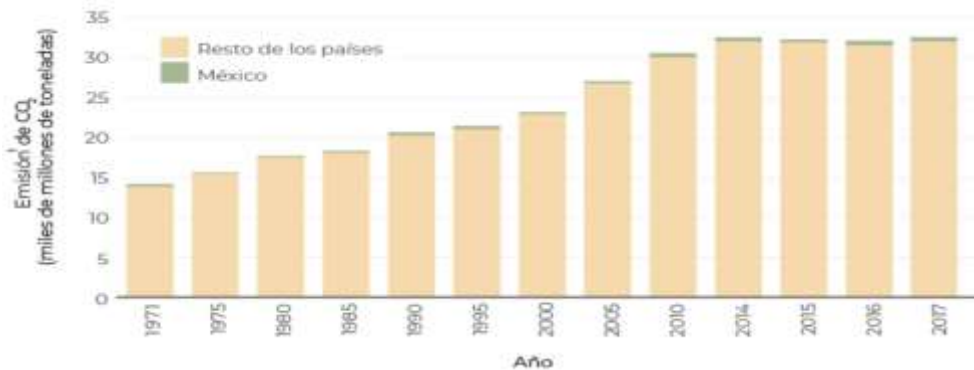


Imagen 4 Emisión mundial de CO₂ por consumo de combustibles fósiles (Naturales, 2021)

La Imagen 5 desglosa en porcentajes las emisiones de GEI a nivel mundial por sector:

- El sector energético es responsable del 73.2% de estas emisiones.
- La agricultura y uso de tierra 18.4%
- La industria y desechos solamente de aproximadamente el 8%

Claro está, que el sector que más concierne es el energético pues además de ser el que mayor porcentaje de GEI produce es el sector en el que entran las bombas de calor. De ese 73.2% el 17.5% es proveniente de la energía usada en edificaciones, 10.9% en edificios residenciales y el otro 6.6% en comercios; el empleo de esta energía es para la generación de electricidad para iluminación, electrónicos y por supuesto la climatización del recinto. (Hannah Ritchie, 2021)

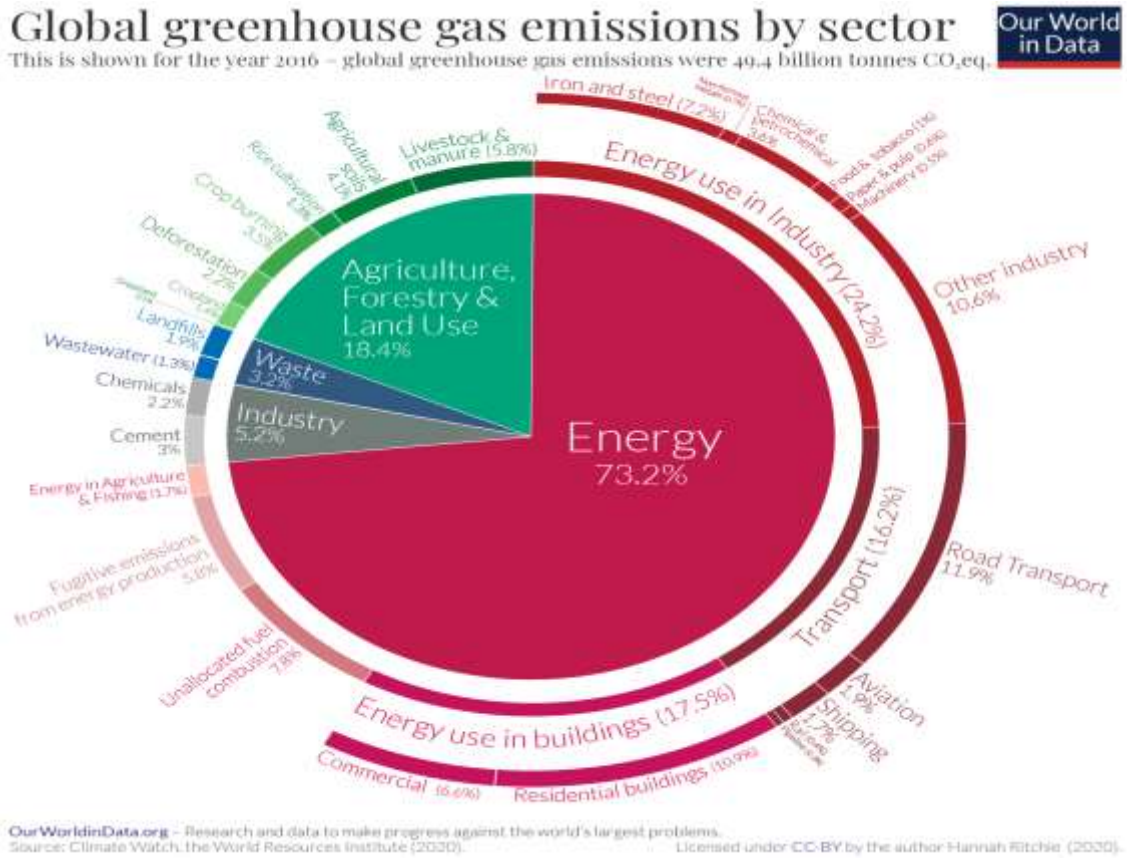


Imagen 5 Emisiones globales de GEI en los diferentes sectores por consumo de combustibles fósiles 2016
(Hannah Ritchie, 2021)

Ahora, el trabajo de instalación de la BCG 3 TR se llevará a cabo dentro de territorio nacional por lo que se requiere conocer la situación en la que el país se encuentra con respecto a las consecuencias del calentamiento global. La Imagen 7 muestra la variación de la temperatura conforme los años pasan; el promedio de temperatura dentro de 1981-2010 fue de 21 °C, entre 2006 y 2015 la temperatura nacional estuvo más de medio grado Celsius por arriba del promedio del periodo 1981-2010 exceptuando 2008 y 2010, mientras que en 2017 se llegó a un aumento de 22.6 °C, llegando ya a 1.6 °C por encima del promedio.

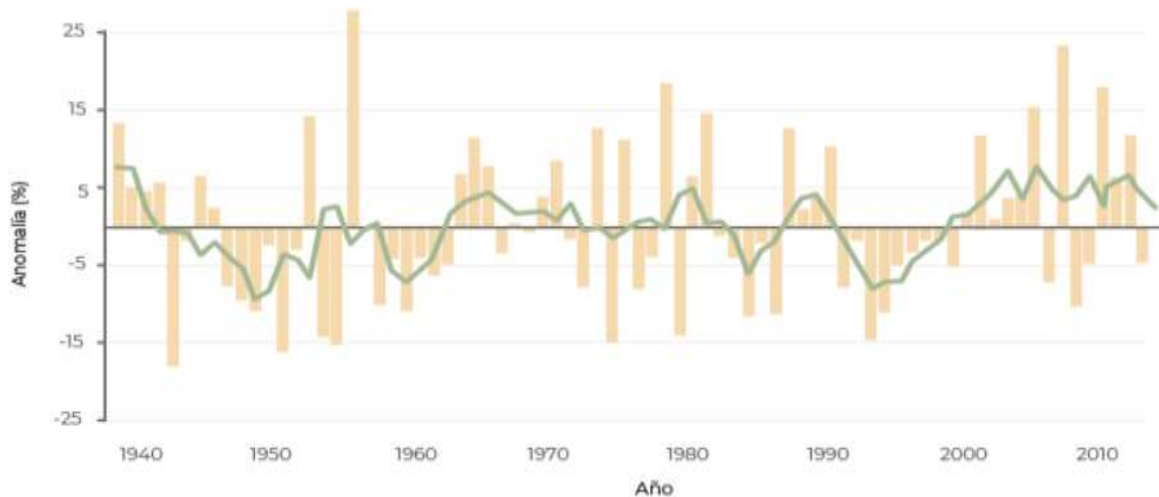


Imagen 6 Anomalía de la precipitación anual en México (1941-2017) (Naturales, 2021)

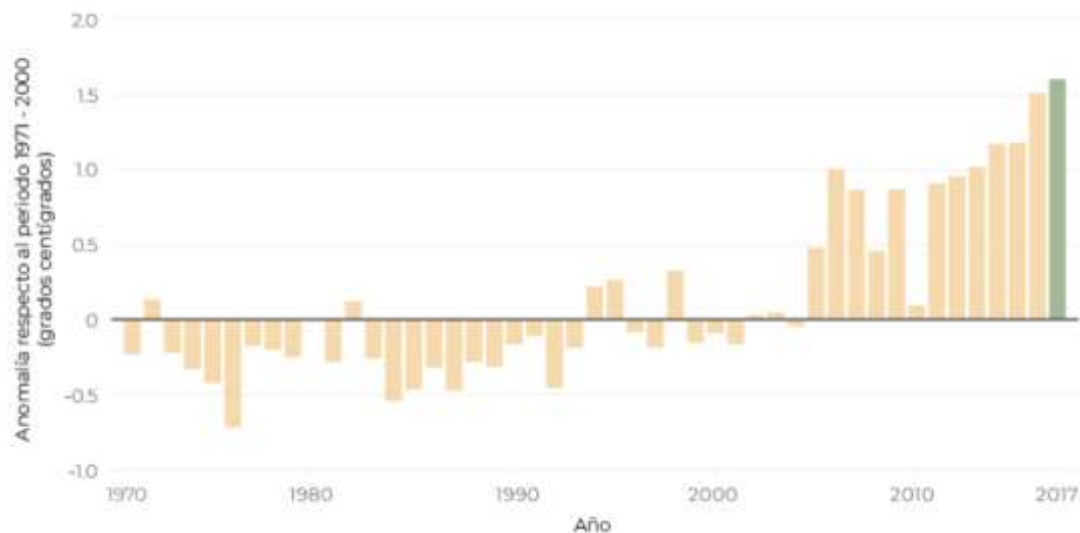


Imagen 7 Anomalía de la temperatura media anual en México (1971-2017) (Naturales, 2021)

Las variaciones en los patrones de precipitación a nivel global representan otra alteración del sistema climático, el vapor de agua total en el aire sobre los océanos, aumentó 1.2% por década desde 1988 hasta 2004, lo que podría reflejarse en el aumento de precipitaciones (como lluvia o nieve). La Imagen 6 permite ver que 1945 fue el año menos lluvioso (638.8 mm) y 1958 el más lluvioso (997.8 mm); en el 2015 la precipitación fue 11.7% superior (872 mm). Asimismo, uno de los efectos más tangibles del cambio climático es el incremento del nivel del mar producto del derretimiento de glaciares y otros mantos de hielo. Para nuestro país el incremento anual registrado varió entre 1.9 milímetros en Veracruz, Veracruz, hasta 9.16 milímetros en Ciudad Madero, Tamaulipas. En el Pacífico sobresalen Guaymas, Sonora y Manzanillo, Colima, con incrementos anuales de 4.23 y 3.28 milímetros, respectivamente. El aumento en desastres naturales, se muestra en la Imagen 8 y es otro de los efectos del cambio climático, para México, entre 2000 y 2003, se declararon 72 desastres mientras que entre 2012 y 2015 la cifra alcanzó los 190. (Naturales, 2021)

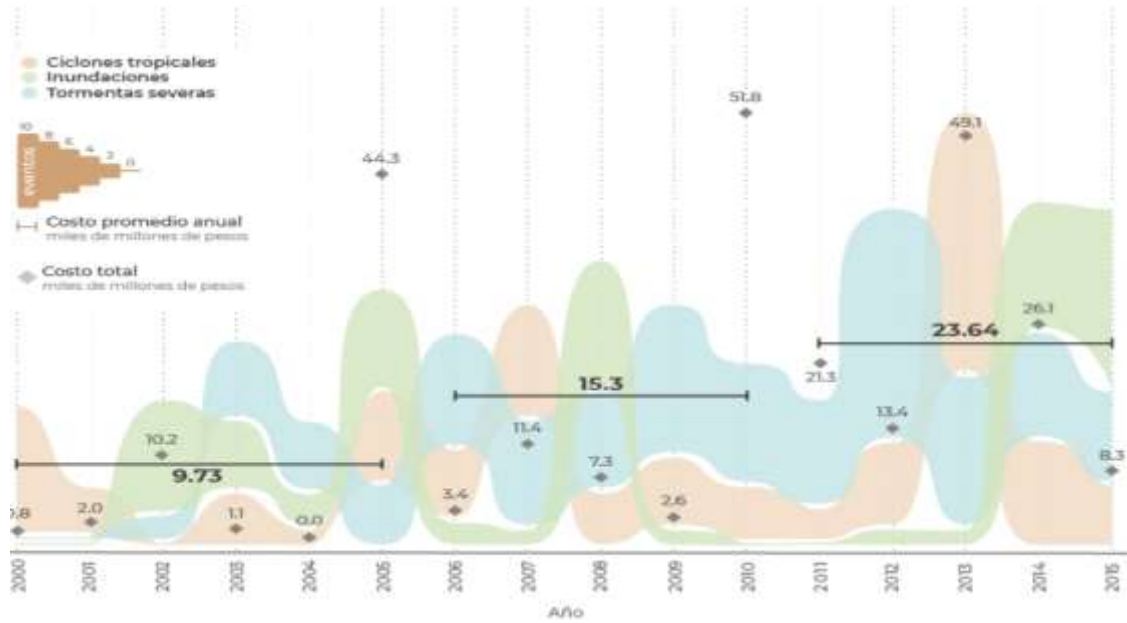


Imagen 8 Desastres naturales en México (Naturales, 2021)

México es uno de los lugares donde el uso de aire acondicionado es común, la Imagen 9 permite observar que, en el país, un 16% (Agency, The Future of Cooling, 2018) de hogares posee un equipo para lograr la climatización de su vivienda. Según datos del INEGI, Imagen 10, la cantidad de hogares dentro del territorio nacional alcanzó los 35,219,141 (INEGI, Hogares y Vivienda, 2020) hogares censales; un 16% de esta cantidad de casas ocupa aire acondicionado es decir que 5,635,063 son los lugares que hacen uso de esta climatización.

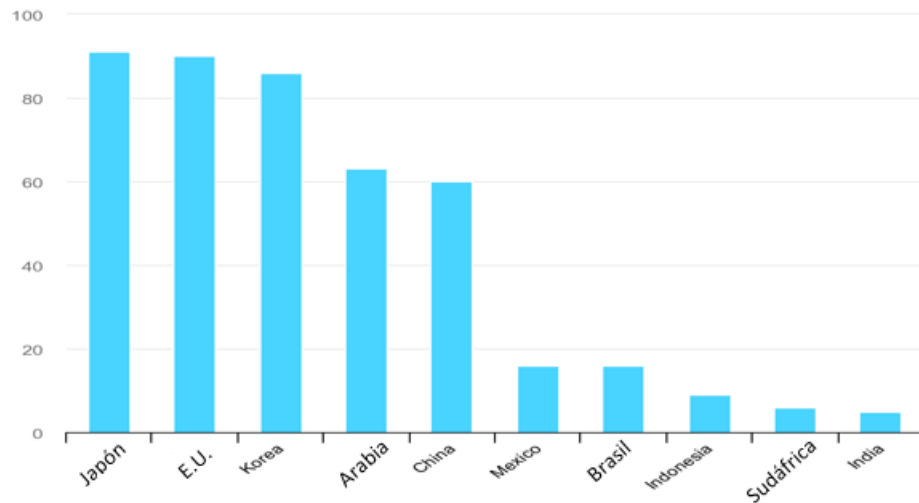


Imagen 9 Porcentaje de hogares con aire acondicionado 2018 (Agency, The Future of Cooling, 2018)

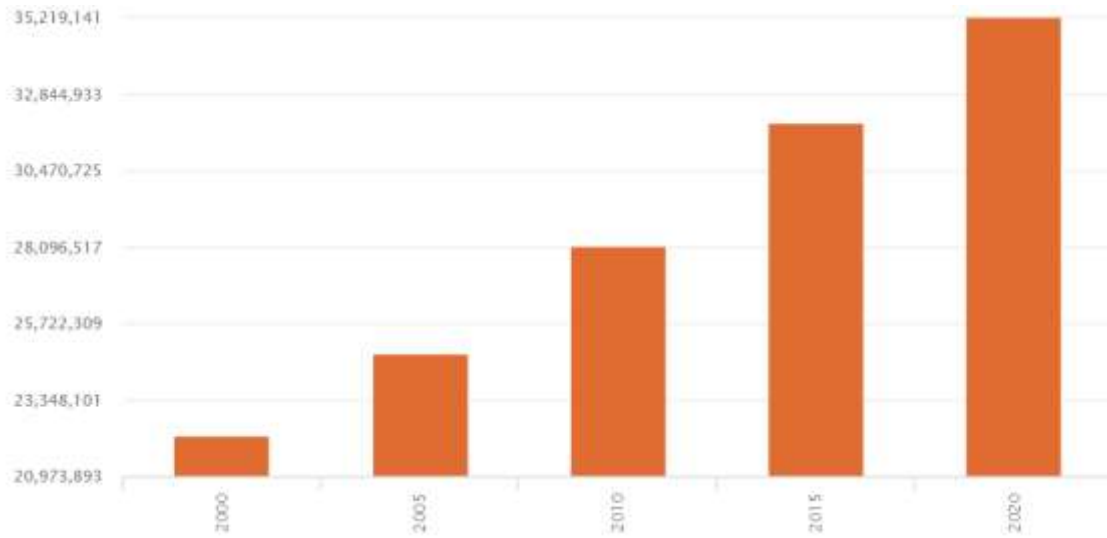


Imagen 10 Hogares censales² (INEGI, Hogares y Vivienda, 2020)

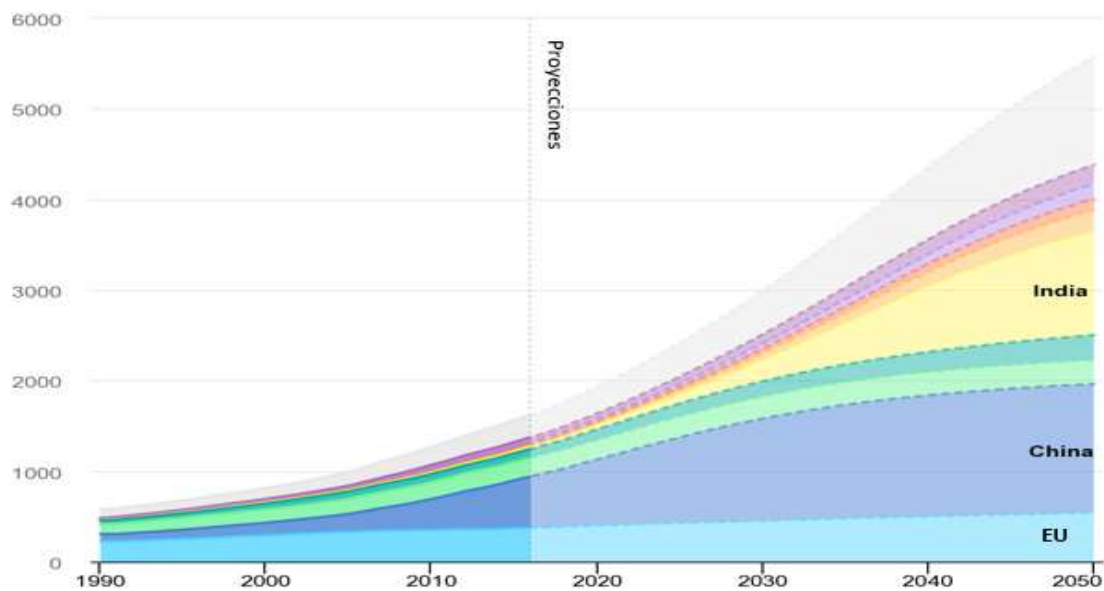


Imagen 11 Proyección de uso de A/C en el mundo (Agency, The Future of Cooling, 2018)

La Imagen 11 muestra la proyección del aumento en el uso de equipos de aire acondicionado en algunos países del mundo y todo esto debido al aumento de la temperatura en la Tierra. Esta estimación especula que para 2050, alrededor de 2/3 de las viviendas en el planeta hagan uso de un A/C para alcanzar el confort en sus hogares (Agency, The Future of Cooling, 2018). En el caso de México (Imagen 12) se estima que en el año 2021 (año en el que se está redactando esta tesis) existen un total de 23 millones de unidades (Agency, The Future of Cooling, 2018) de aire acondicionado,

² El **hogar censal** es la unidad formada por una o más personas, vinculadas o no por lazos de parentesco, que residen habitualmente en la misma vivienda particular. (INEGI, Hogares y Vivienda, 2020)

mientras que se espera que en 2050 este número alcance las 126 millones de unidades (Agency, The Future of Cooling, 2018).

Uno de los equipos que mayor auge está teniendo en el mercado para emplear como aire acondicionado es la bomba de calor. Más adelante se tocará con mayor detalle sus características; sin embargo, el funcionamiento más destacado de este dispositivo es la capacidad de hacer fluir calor de una fuente fría a una caliente (de menor de temperatura a mayor temperatura) usando energía proveniente de electricidad, combustible o calor de desechos de alta temperatura (Godoy, 2008). Este equipo se encuentra formado por los componentes típicos dentro de un ciclo de refrigeración: un compresor, un condensador, una válvula de expansión y un evaporador; la principal virtud que posee la bomba de calor es la válvula de cuatro vías, la cual permite que este equipo se pueda usar tanto en temporadas de calor como de frío solo cambiando la posición del evaporador y el condensador, pero estos detalles se tocarán más adelante en este trabajo.

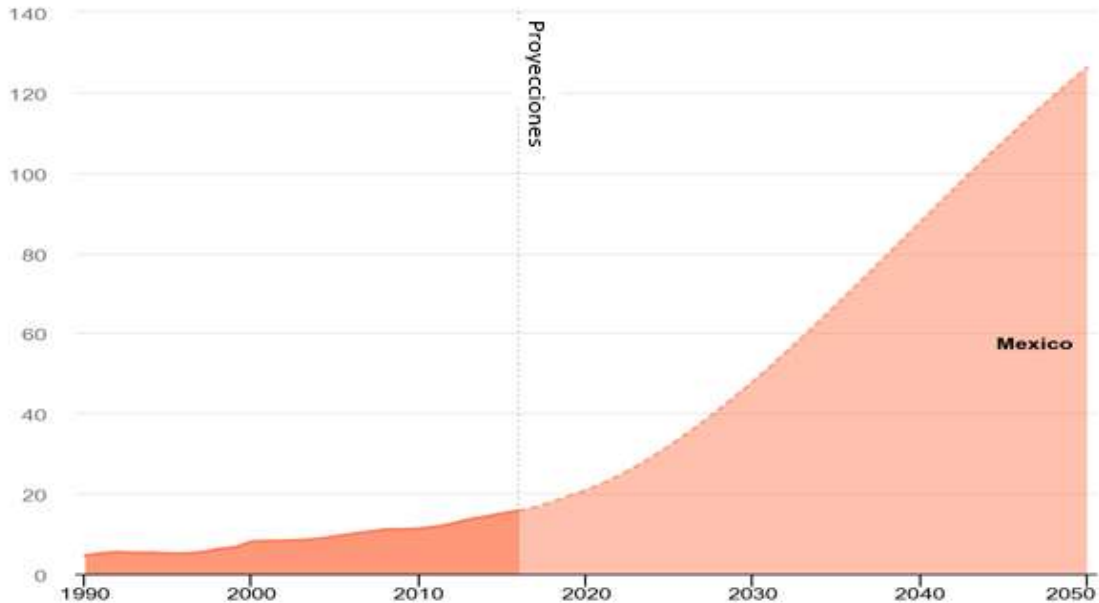


Imagen 12 Proyección de uso de A/C en México (Agency, The Future of Cooling, 2018)

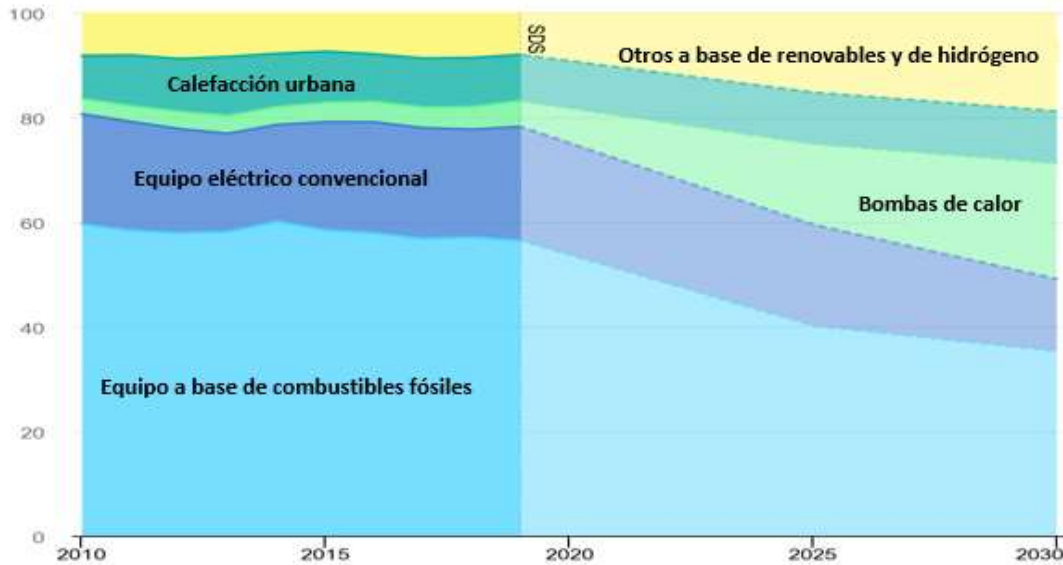


Imagen 13 Venta de tecnologías para la calefacción en un escenario sustentable de 2010 a 2030 (Agency, Heating, 2020)

El uso de combustible fósiles no es algo que pueda desaparecer de un día para otro, estará presente durante bastante tiempo aún; sin embargo, lo que se tiene que buscar es su progresivo desuso para dar paso a las nuevas y mejores alternativas de fuentes de energía. La Imagen 13 permite ver que los equipos que funcionan a partir de combustibles fósiles seguirán presentes incluso para el año 2030; sin embargo, en esta gráfica se observa el desuso progresivo de combustibles fósiles al mismo tiempo que se presenta un aumento en el uso de tecnologías alternativas como la bomba de calor. En el 2019 el 57% de equipos para calefacción funcionaban por combustibles fósiles mientras que solo el 5% era por bombas de calor, pero se proyecta que para el año 2030 este número alcance el 22% y que los equipos que marchan con ayuda de combustibles fósiles solo lleguen a un 35% (Agency, Heating, 2020). Además de la ventaja de funcionar en cualquier época del año la BC hace uso de la energía eléctrica (un motor mueve a un compresor), sin embargo, cabe recalcar que estos equipos poseen un notorio ahorro de energía pues de 1 kW de consumo de la red eléctrica, da como resultado 3 kW de rendimiento en calor, es decir, consumiendo la misma energía eléctrica, la Bomba de Calor suministra 3 veces más calor que un aparato de calefacción eléctrica (Zárraga, 2009).

El propósito de esta introducción era el dar a conocer al lector de este trabajo las terribles consecuencias que trae consigo el calentamiento global, asimismo se espera que toda esta carga de información sea capaz de concientizar al lector de no siempre quedarse con una opción única sino que, en caso de requerirlo, adquiera equipos que empleen una fuente de energía diferente a los combustibles fósiles para la climatización de sus hogares, pues a pesar de que se cree que el cambio climático es irreversible, éste sí puede disminuir si se toman las acciones correctas.

Las bombas de calor son la mejor opción si se busca un dispositivo para climatizar un recinto pues además de evitar la adquisición de dos dispositivos diferentes (calefactor y aire acondicionado) su uso disminuye la emisión de GEI, lo que hace que expertos en el tema busquen nuevos refrigerantes con bajo GWP y mejor rendimiento, y finalmente estos dispositivos emplean los recursos naturales

con mayor presencia en nuestro planeta: aire, agua y energía geotérmica. Asimismo, con esta tecnología existe una seguridad en el abastecimiento energético y reduce las islas de calor³.

De acuerdo con el Instituto Europeo del Cobre (por sus siglas en inglés ECI), las bombas de calor son de los equipos en los cuales, se puede decir que, sí existe la presencia de energía renovable. La Imagen 14 muestra el porcentaje en el que una BC es renovable, pues de la energía útil usada en un edificio/proceso en el que se emplee una BC, del 20-35% es la energía utilizada para impulsar la unidad (esta energía se paga).

La diferencia entre la energía útil producida por la bomba de calor y la energía utilizada para impulsar la unidad, se considera renovable si se captura del ambiente, ya sea del aire, agua o tierra. (ECI, 2018)

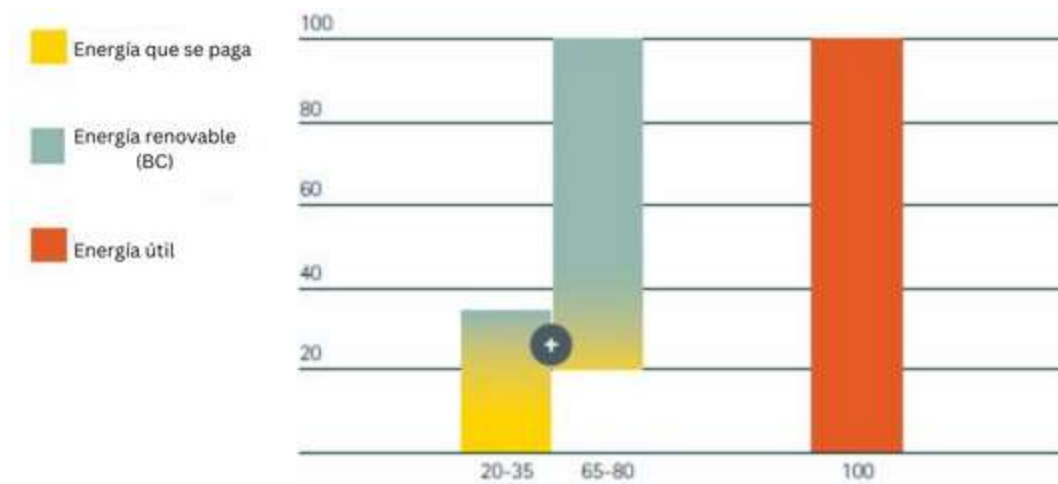


Imagen 14 Lo renovable de un BC (ECI, 2018)

Más adelante en este trabajo se empleará del parámetro conocido como COP para medir la eficiencia térmica de la BC. Este factor mide cuánta de la energía demandada por el sistema (en este caso la energía del compresor) se convierte en energía para calentar o enfriar un espacio. Las bombas de calor típicas usan una unidad de energía eléctrica para proveer de 3 a 5 unidades de salida de calor y en la refrigeración de 2 a 4 unidades. La Imagen 15 enseña la energía de entrada necesaria para brindar 1 unidad (1 kWh) de calor útil en diferentes sistemas de calefacción. (ECI, 2018)

³ Fenómeno en zonas urbanas en donde las temperaturas que experimentan son más altas que las circundantes. Debido a la actividad humana.

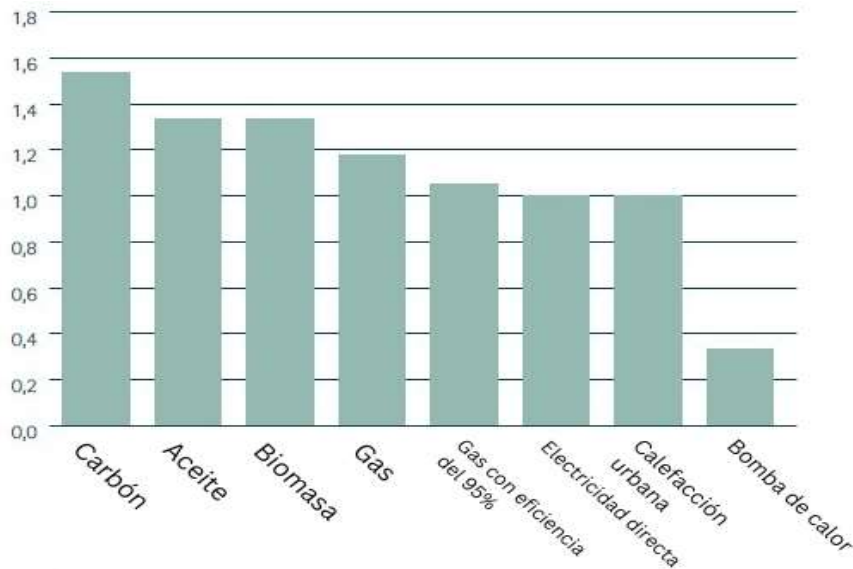


Imagen 15 Energía necesaria para brindar 1 kWh de calor útil (ECI, 2018)

Asimismo, otro de los coeficientes más importantes es el SEER, el cual indica los kW generados por cada kW consumido en la refrigeración de un espacio. Cuantos más kW se generen por cada kW consumido, más eficiente es el equipo. Este parámetro es alto tanto para sistemas de A/C como para las BC. (Carrier, AIR CONDITIONERS, BUYING TIPS, HVAC EDUCATION, HEAT PUMPS, 2022) Una BC puede superar a un A/C cuando se habla de eficiencia, ya que las BC ocupan cinco veces menos energía que un A/C. (Gerhardt, 2022)

En términos de longevidad, los A/C suelen durar más que las BC. La razón es que las BC calientan y enfrían una casa, por lo que se usan durante todo el año, mientras que los A/C dejan de operar durante los meses más fríos cuando se usa una fuente de calor separada para calentar el hogar. (Carrier, AIR CONDITIONERS, BUYING TIPS, HVAC EDUCATION, HEAT PUMPS, 2022)

Las BC trabajan mejor en climas templados, sin embargo, estos equipos reducen su eficiencia en climas de frío extremo. Para alcanzar la calefacción en espacios con climas exteriores de 0 a -23 °C se hace uso del R744 (Dióxido de carbono) y de una compresión térmica (pues la diferencial de presión que se tiene que alcanzar con este refrigerante es de aproximadamente de 60 bar) donde se ocupa una cámara, una ignición por algún hidrocarburo, gas natural, etc. y un par de pistones. (SOLOCLIMA, 2020)

La reducción de las emisiones de carbono haciendo uso de las BC, es otra de las principales razones por las cuales esta tecnología está siendo mayormente solicitada en el mercado. Estos equipos, en conjunto con los refrigerantes más actuales y la integración de tecnologías renovables, se pueden reducir las emisiones de carbono entre un 35 y un 65 % al reemplazar el empleo de gas. Si se sustituye una caldera de carbón o gasóleo, el ahorro es mucho mayor. Cuando se reemplaza un sistema eléctrico directo, los ahorros están determinados directamente por la eficiencia del sistema de bomba de calor. (ECI, 2018).

OBJETIVO GENERAL

El objetivo de este trabajo es el diseño y selección de los componentes principales que conforman una bomba de calor geotérmica de 3 TR, así como la construcción física de este equipo.

OBJETIVO PARTICULAR

1. Diseñar una bomba de calor que, al funcionar por medio de una energía renovable, los componentes que la conforman internamente sean de bajo impacto ambiental (el mejor refrigerante disponible en el mercado con menor GWP) y por ende los equipos más eficientes disponibles en el mercado (compresor scroll, intercambiador de placas planas, etc.).
2. Mantener un diseño que facilite la interacción entre el equipo de manufactura y el usuario final de la BCG y facilitar tanto su construcción como su operación ya estando instalada en sitio.
3. Construir esta bomba con tecnología y equipos que se distribuyan dentro de territorio nacional para así comprobar que este ramo de la climatización por medio de bombas de calor no es lejano de realizar dentro del país
4. Demostrar que es rentable y con la capacidad de crecer, para así explotar un recurso inagotable como lo es la geotermia.

LÍMITES Y ALCANCES

Esta tesis presentará el proceso de diseño de una Bomba de Calor Geotérmica de 3 Toneladas de Refrigeración. Una vez que se termina de mostrar la primera etapa del proyecto se sigue con el proceso de selección de los equipos que la conforman y su manufactura. Se espera que este trabajo pueda orientar a próximas generaciones a un aumento en el tonelaje del equipo, así como su puesta en sitio y poder competir con empresas de renombre en la industria de la climatización.

1. LA BOMBA DE CALOR

En este capítulo se explica qué es una bomba de calor, así como su principio de funcionamiento a partir del ciclo de refrigeración y las particularidades en cada uno de sus puntos; además se incluyen los detalles acerca de la teoría de los componentes más importantes que forman a la BC (compresor, condensador, evaporador, válvula de expansión, válvula de cuatro vías, ventilador y filtro deshidratador) así como los tipos de bomba de calor y algunas aplicaciones de este equipo dentro de la industria.

1.1 INTRODUCCIÓN A LAS BOMBAS DE CALOR

La bomba de calor es una máquina térmica que por medio de un trabajo mecánico de compresión puede transferir calor desde una fuente fría (entorno de baja temperatura) a otra más caliente (región con mayor temperatura) con ayuda de un gas refrigerante (NAMA, 2020) (García Zarrága, 2009). Estos equipos, por tanto, son capaces de calentar espacios aprovechando el calor disponible de un medio exterior como aire, agua o tierra que está a una menor temperatura, y si se invierte su ciclo de operación usando una válvula de cuatro vías, es capaz de enfriar dichos espacios expulsando el calor a un medio de mayor temperatura (EHPA, 2005).

La Imagen 16 muestra la composición de una bomba de calor:

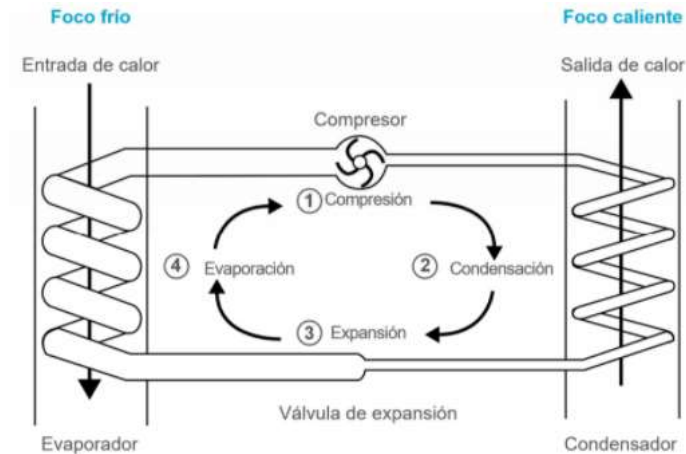


Imagen 16 Composición de la bomba de calor (García Montes, 2019)

El funcionamiento general de cada uno de los equipos dentro de la bomba de calor es el siguiente:

- **Compresor:** Eleva la presión de vaporización a otra más alta, superior a la del agente condensante (García Zarrága, 2009).
- **Condensador:** El fluido cede calor al medio, cambiando el refrigerante de fase vapor a líquida (con una cantidad presente de vapor).

- Órgano de expansión: Regresa el fluido refrigerante a sus condiciones de temperatura y presión iniciales en un estado totalmente líquido.
- Evaporador: Evapora el fluido y con este proceso es capaz de enfriar el medio.

1.1.1 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE LA BOMBA DE CALOR

Se ha mencionado que la bomba de calor funciona a partir de un ciclo de refrigeración en el cual se hace pasar el refrigerante a través del evaporador, el compresor, el condensador y la válvula de expansión y donde éste experimenta continuos cambios de fase que es lo que permite que exista el intercambio de calor responsable de la climatización del recinto. A continuación, se profundiza más en este tema.

1.1.1.1 CICLO DE REFRIGERACIÓN

En el ciclo de refrigeración existen dos tipos de cálculo: uno para el ciclo ideal y otro para el real. El que se explicará a continuación es el ciclo de refrigeración ideal pues es con el que se empieza a realizar los cálculos del balance de masa y energía que se verán más adelante en este trabajo y que tiene como base el 'Postulado de Estado' (Cengel & Boles, 2011); para el ciclo real se tiene que tener en consideración el sobrecalentamiento y el subenfriamiento que se tiene en el refrigerante del evaporador o condensador correspondientemente.

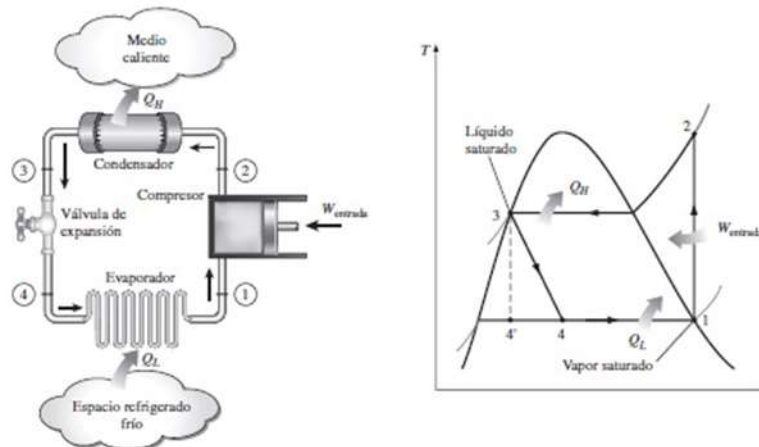


Imagen 17 Ciclo ideal de refrigeración y su representación en el diagrama de Mollier (Cengel & Boles, 2011)

El diagrama de Mollier permite que se conozca que el ciclo tiene dos presiones una alta y una baja, este valor de presiones de trabajo varía con respecto al refrigerante que se vaya a ocupar en el proceso, para esta bomba se decidió hacer uso del R-410a pues es un fluido que se ocupa en el 92% de los sistemas de refrigeración (Arguello Arguello, 2016) y que se proyecta su uso hasta unos años más. La Imagen 17 corresponde al ciclo de refrigeración ideal, es recomendable que el lector siga con

la vista tanto la imagen como el texto pues los puntos que se muestran siguen el orden de dicha ilustración:

Punto 1 (Salida del Evaporador)

El punto 1 se localiza a la salida del evaporador por ello, siguiendo el postulado de estado, se consideró que el refrigerante en ese momento era 100% vapor, es decir, poseía una calidad de 1. (Cengel & Boles, 2011)

Punto 2 (salida del compresor)

Al ser un ciclo ideal, del punto 1 al 2 (salida del compresor) se considera un proceso isoentrópico. (Cengel & Boles, 2011)

Punto 3 (salida del condensador)

Para el estado 3 a la salida del condensador, al igual que en el estado 1, se tomó por sentado que el refrigerante era 100% líquido, es decir, posee una calidad de cero. (Cengel & Boles, 2011)

Punto 4 (salida de la válvula de expansión)

Finalmente, del estado 3 al 4 se conoce que el proceso es isoentálpico y se regresa al valor de la presión baja después de pasar por la válvula de expansión. (Cengel & Boles, 2011)

1.2 COMPONENTES

Se dijo en un principio que los equipos principales que forman parte de la bomba de calor son: compresor, condensador, evaporador, válvula de expansión y por supuesto la válvula de cuatro vías. En los subtemas siguientes se ahonda más en la descripción de cada uno de los equipos, sin embargo, la Imagen 18 muestra el arreglo al interior de una bomba de calor convencional y el arreglo de los equipos que la conforman.

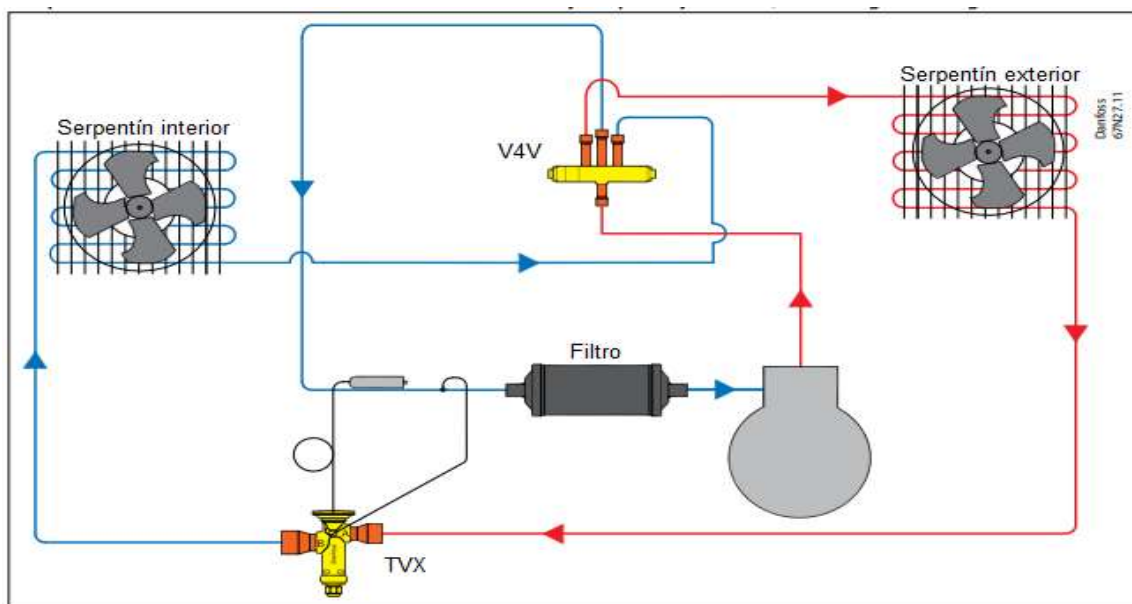


Imagen 18 Circuito interno de una bomba de calor (Danfoss, Thermostatic expansion valves Type TGE, 2021)

1.2.1 COMPRESOR

Es el equipo encargado de elevar la presión del vapor refrigerante desde una presión de entrada a una más grande elevando con ello de igual manera su temperatura. Se pueden clasificar en dos grandes grupos: en compresores de desplazamiento positivo (cuyo principio de funcionamiento es el movimiento de un fluido causado por la reducción del volumen de una cámara (Hernández E. M., 2017)) ya sea alternativos, rotatorios o una combinación de los dos anteriores y en compresores centrífugos (que funcionan a partir de un rotor con álabes sobre un eje y cuya carcasa se encarga de contener al fluido). Este trabajo se concentrará en los compresores de desplazamiento positivo pues son los que más uso tienen dentro de la industria de aire acondicionado (Hyde, 2017).

El acoplamiento motor-compresor se puede clasificar en:

- Abiertos: Motor y compresor independiente.
- Semiherméticos: Compresor y motor comparten eje, mientras que parte del calor generado en el motor es transferido al fluido refrigerante.
- Herméticos: Compresor y motor con mismo eje y en la misma envolvente por lo tanto la recuperación de calor es mayor.

Los compresores alternativos están formados por una cámara que define el tamaño de la máquina, un pistón encargado de desplazar el fluido, elementos de sello que evitan fugas y por último orificios de entrada y salida con sus respectivas válvulas. Éstos a su vez se dividen en alternativos húmedos y secos, los primeros están compuestos por pistones en posición radial en los que el fluido entra y sale por medio de las válvulas accionadas por la presión diferencial y que cuyo sistema de lubricación y refrigeración es por aceite a presión, mientras que los secos logran obtener presiones más elevadas debido a que la compresión se da en varias etapas extrayendo el calor de cada una mediante circuitos de agua.



Imagen 19 Compresor alternativo (Copco, 2020)

Los rotatorios están conformados por un estator, uno o más rotores que incluyen el elemento desplazador del fluido. La parte del sello lo cumple una parte del elemento desplazador, un componente adicional o un fluido que ocupa el espacio entre las partes de movimiento relativo, mientras que las válvulas son reemplazadas por orificios obstruidos por el rotor conocidas como lumbreras. Al igual que en el compresor alternativo, los rotativos también se dividen en secos y húmedos, para un compresor de tornillo seco el contacto que existe entre los rotores (macho y hembra)

es inexistente tanto al generar espacio provocando la aspiración, así como en la compresión; en el compresor húmedo se inyecta aceite a presión para la lubricación y refrigeración.



Imagen 20 Compresor de tornillo (IRIM, 2015)

Del último equipo que se va a hablar en este escrito es sobre el compresor de espiral o scroll, en este compresor el refrigerante se comprime por la variación del volumen causado por el movimiento planetario del elemento desplazador que sigue el camino definido por uno fijo. Este movimiento captura el gas entre los dos elementos y los fuerza a entrar a una cavidad mucho más pequeña incrementando la compresión a la presión deseada (Hess, 2021).



Imagen 21 Compresor Scroll (Supercompresores, 2021)

1.2.2 CONDENSADOR

Este equipo recibe el refrigerante sobrecalentado del compresor, remueve el calor de sobrecalentamiento y licúa el fluido refrigerante; el calor de sobrecalentamiento y de condensación del refrigerante es cedido al medio circundante provocando su calentamiento. (Hernández A. M., 1990). El agua y el aire al ser fluidos abundantes dentro del mundo, son las sustancias que más se usan para el enfriamiento es por ello que los condensadores se clasifican en: enfriados por agua y enfriados por aire, sin embargo, para la aplicación que se está buscando requerimos exclusivamente de un equipo enfriado por agua, es por ello que en este reporte solo se especificarán este tipo de condensadores.

- Enfriados por agua
 - Tubo y coraza

Este tipo de condensador puede ser horizontal o vertical, pero ambos funcionan por el mismo mecanismo. El refrigerante caliente entra por la parte superior del condensador y es contenido en la coraza; el refrigerante se condensa en la superficie exterior de los tubos goteando o escurriendo hacia el fondo de la coraza a la salida fluyendo a la válvula de expansión o a un tanque receptor. Por su parte el agua entra a través de cabezales diseñados para que circule por los tubos un cierto número de pasos, una configuración en que el agua se encuentre en la coraza y el refrigerante en los tubos también es posible. Cabe mencionar que los condensadores verticales ocupan menos espacio y debido a que es alimentado de la parte superior el fluido por los tubos fluye gracias a la gravedad.

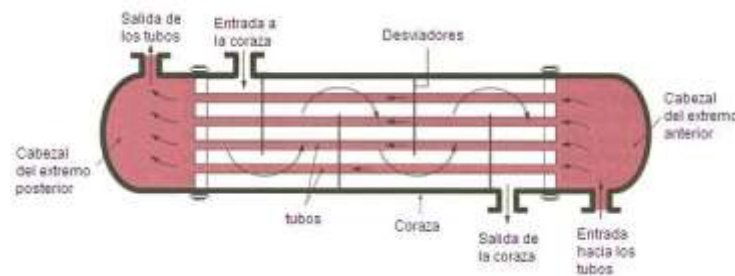


Imagen 22 Condensador tubo y coraza (VILLAGOMEZ, 2010)

- Doble tubo

Consiste de dos o más juegos de tubos concéntricos, en este equipo el refrigerante se condensa en el espacio anular mientras que el agua fluye a través de los tubos interiores.

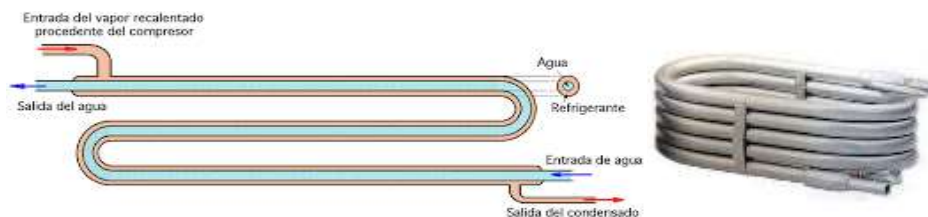


Imagen 23 Condensador de doble tubo (CANTABRIA, 2021)

○ Intercambiador de placas

Un intercambiador de placas convencional está conformado por una sucesión de finas placas que se encuentran selladas por juntas de goma. Las juntas de goma además de evitar la mezcla de los fluidos, establecen los canales de circulación del fluido. El conjunto de las placas se comprime con dos planchas metálicas rígidas haciendo una distribución de flujos paralelos donde uno de los fluidos circula en los canales pares, y el otro fluido circula en los canales impares. (Touceda, 2021)

Los líquidos calientes y fríos se alternan entre cada uno de las placas y los baffles dirigen el flujo del líquido entre las placas. Ya que cada una de las placas tiene un área superficial muy grande, las placas proveen un área extremadamente grande de transferencia térmica a cada uno de los líquidos (Jaramillo O. , 2007).

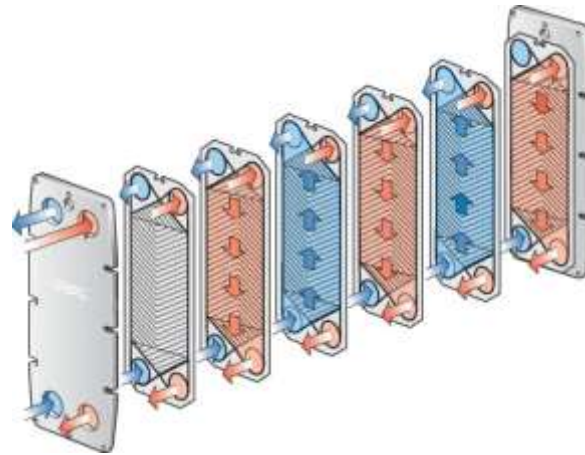


Imagen 24 Intercambiador de placas (Laval, 2021)

Las placas en este tipo de intercambiadores están hechas de los siguientes materiales:

Tabla 1 Propiedades de los materiales usados en las placas

MATERIAL	PROPIEDADES		
	Densidad $\frac{g}{cm^3}$	Calor específico a 20 °C J/kg K	Conductividad térmica a 100°C W/m K
Acero inoxidable (AISI 304, 316)	7.9	500	16
Titanio	4.5	523	21.9
Paladio	12.023	244	71.8
Níquel	8.9	444	90.9
Hastelloy	8.89	427	11.2

Las juntas en este tipo de intercambiadores están hechas de grafito, caucho y otros materiales, en función de la compatibilidad del fluido a utilizar (Touceda, 2021). Los bastidores pueden ser de acero AISI 304 o acero común barnizado mientras que las conexiones son de polipropileno o Nylon 6.

1.2.3 EVAPORADOR

Consisten en una serie de tubos situados en una corriente de aire, que puede ser forzada con ayuda de un ventilador o natural; los tubos suelen tener aletas para así llevar a cabo un aumento en el área de transferencia de calor (all, 2021). Este intercambiador transfiere calor de la sustancia que se desea enfriar al refrigerante que se evapora, la remoción de calor-efecto refrigerante- se lleva a cabo en este equipo.

Uno de los equipos más considerados para actuar como evaporador es el radiador, en este tipo de intercambiador el líquido refrigerante fluye por tubos que utilizan aire fresco del ambiente para reducir la temperatura del líquido refrigerante. Ya que el aire es un mal conductor del calor, el área de contacto térmico entre el metal del radiador y el aire se debe maximizar. Esto se hace usando aletas en el exterior de los tubos. Las aletas mejoran la eficacia de un intercambiador de calor (Jaramillo O. , 2007).



Imagen 25 Intercambiador de calor de tubos y aletas (Blancarte, 2014)

Los materiales más comunes en los radiadores son el cobre y el aluminio.

Tabla 2 Propiedades del cobre y aluminio

MATERIAL	PROPIEDADES		
	Densidad $\frac{g}{cm^3}$	Calor específico a 20 °C J/kg K	Conductividad térmica a 100°C W/m K
Cobre	8.96	385	400
Aluminio	2.7	900	237

El cobre presenta una mayor duración, fácil reparación y mayor rendimiento por su composición; en cambio, el radiador de aluminio una vez que falla o tiene algún golpe u orificio, es muy difícil de soldar y podría disminuir su capacidad de enfriamiento (Fortaleza, 2018).

1.2.4 ÓRGANO DE EXPANSIÓN

Su propósito en el sistema es reducir la presión del refrigerante condensado y regular el flujo de refrigerante al evaporador. Los tipos de dispositivos de expansión que se encuentran disponibles son:

- Tubos capilares

Un tubo capilar es un tubo de 2 a 20 ft de largo (60 cm a 6 m aproximadamente) con un diámetro interno de 0.025 in a 0.09 in (0.06 cm a 0.23 cm aproximadamente). El refrigerante líquido entra al tubo capilar y a medida que fluye su presión decae debido a la fricción y aceleración que sufre. Una parte del líquido se evapora dentro del tubo por la disminución de presión.



Imagen 26 Tubo capilar (GRAINGER, 2021)

- Válvula de Expansión Termostática

El control de la válvula se lleva a cabo mediante el rango de sobrecalentamiento del vapor de succión a la salida del evaporador, es decir, regula el flujo de refrigerante líquido en proporción a la cantidad de refrigerante evaporado. Su funcionamiento es el siguiente: el bulbo sensor contiene líquido refrigerante y está colocado a la salida del evaporador para que el bulbo y el fluido tengan una temperatura cercana a la del vapor de succión; la presión en la parte superior del diafragma es la misma que la del refrigerante en el bulbo mientras que la presión del evaporador es la que empuja la parte inferior del diafragma.

La válvula se mantiene cerrada hasta que la presión en la parte superior del diafragma sobrepase la fuerza del resorte más la fuerza por la presión del evaporador, es decir, el vapor de succión deberá estar sobrecalentado para poder llevar al líquido que acciona el diafragma a una presión con la que sea capaz de abrir la válvula. (Hernández A. M., 1990)

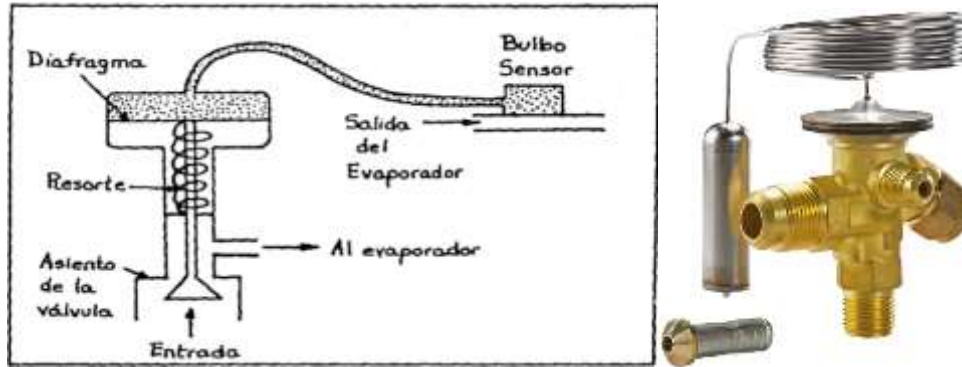


Imagen 27 Válvula de expansión termostática (Hernández A. M., 1990)

1.2.5 VÁLVULA DE CUATRO VÍAS

Este dispositivo puede considerarse como aquel que hace que la bomba de calor pueda ser llamada de esta forma y que desempeñe su objetivo. Se encuentra a la salida del compresor y, según la temperatura del medio a climatizar, invierte la dirección en la que fluye el fluido refrigerante de tal forma que el intercambiador que funcionaba como condensador pase a funcionar como evaporador y el que funcionaba como evaporador pase a funcionar como condensador; todo esto mediante un componente que mide la presión del refrigerante sobrecalentado localizado en la succión del compresor enviando la señal a la válvula de expansión (Mercado, 2010).



Imagen 28 Válvula de cuatro vías (Ibérica, 2016)

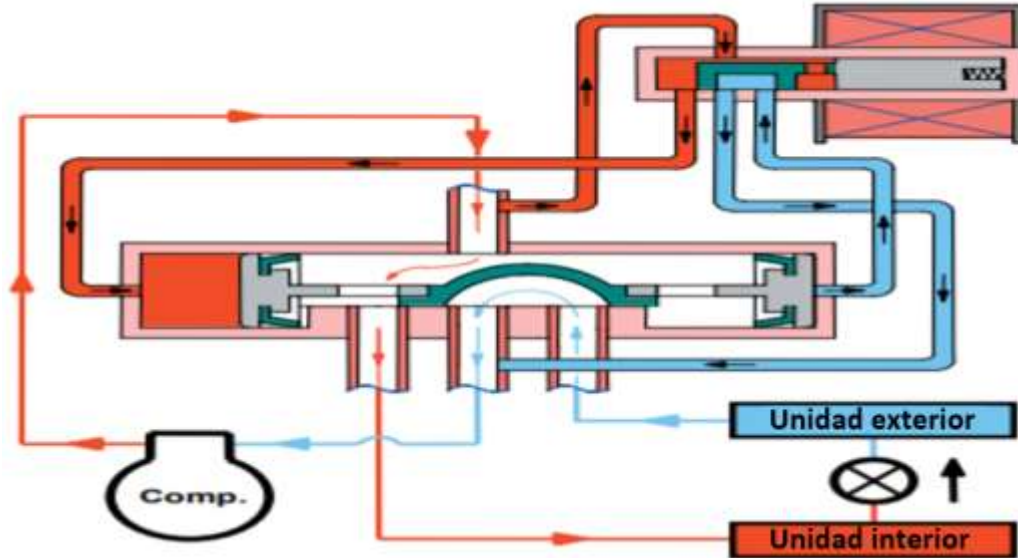


Imagen 29 Funcionamiento de la válvula de cuatro vías en modo calefacción (Saginomiya, 2021)

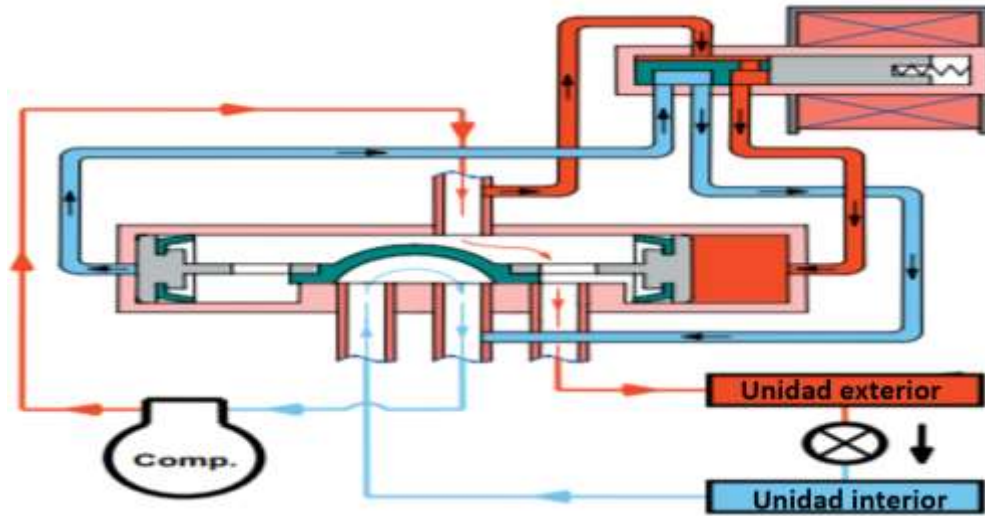


Imagen 30 Funcionamiento de la válvula de cuatro vías en modo refrigeración (Saginomiya, 2021)

1.2.6 VENTILADOR

Este equipo es el encargado de hacer pasar el aire a través del evaporador de la BC para posteriormente sacarlo al lugar que se pretende climatizar a través de los ductos ya teniendo la temperatura que se desea. Para llevar a cabo una selección del ventilador para el diseño de una BC se tiene que considerar que existen dos tipos: los centrífugos curvados hacia atrás y los axiales (Imagen 31), los primeros son adecuados para las instalaciones internas dentro de la vivienda donde se succiona aire de un ducto para después mandarlo a otro debido a que son hechos para casos en los que los requisitos de presión son grandes como se puede interpretar en la Imagen 32 mientras que en los casos en que el evaporador se encuentra por fuera del recinto y la línea de refrigerante entra al hogar (instalaciones exteriores) se recomienda más el uso de un ventilador axial. (RÖSSLER, 2019)

En los ventiladores centrífugos el aire entra en dirección axial y sale en dirección radial mientras que en los axiales el flujo de aire sigue la dirección del eje del ventilador (S&P, ¿Cuál es el mejor ventilador? Conoce los tipos de ventiladores, 2018).



Imagen 31 Ventilador centrífugo y axial (RÖSSLER, 2019)

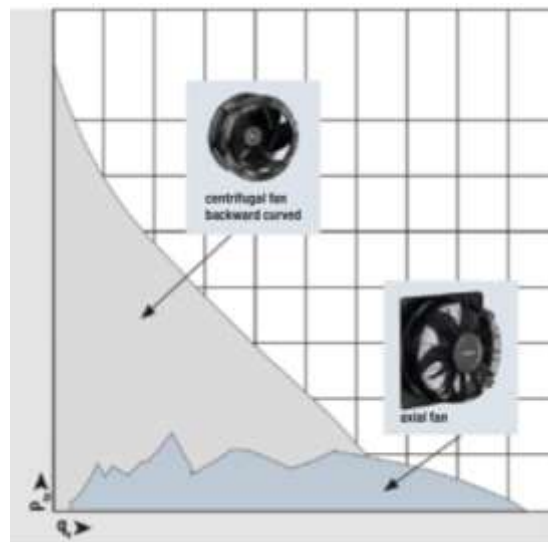


Imagen 32 Incremento de presión característica de un ventilador axial y centrífugo (RÖSSLER, 2019)

1.2.7 FILTRO DESHIDRATADOR

Los filtros secadores garantizan el paso del líquido refrigerante a través del núcleo filtrante desde el exterior hacia el centro. De esta manera, se retienen todas las partículas de suciedad independientemente del sentido del flujo. (Danfoss, Filtros secadores, 2021) El filtro secador es una unidad de filtrado ubicada en la zona de alta presión del circuito de AC, entre el condensador y la válvula de expansión. La labor del filtro es el de filtrar las partículas y los residuos que fluyen en el

circuito y también el de absorber cualquier humedad. Además, almacena aceite y refrigerante. (Nissens)



Imagen 33 Filtros deshidratadores (Danfoss, Filtros secadores, 2021)

1.2.8 FLUIDO REFRIGERANTE

Al igual que la válvula de cuatro vías, al fluido refrigerante se le puede considerar como el agente más importante en las bombas de calor pues es la sustancia encargada de llevar a cabo la transferencia de calor entre los fluidos en los que se encuentran inmersos tanto el evaporador como el intercambiador geotérmico.

Un refrigerante es cualquier cuerpo o sustancia que actúe como agente de enfriamiento, absorbiendo calor de otro cuerpo o sustancia, de igual forma desde el punto de vista de la refrigeración mecánica se puede definir al refrigerante como el medio para transportar calor desde donde lo absorbe por ebullición, a baja temperatura y presión, hasta donde lo rechaza al condensarse a alta temperatura y presión tal y como se muestra en la Imagen 17 al principio de este capítulo. (REFRIGERANTES, 2021)

Uno de los mayores retos que se ha presentado en el mundo de los refrigerantes fue el no dañar a la capa de ozono pues en 1974 Sherwood Rowland, Paul Crutzen y Mario Molina, plantearon la hipótesis de que la acumulación en la atmósfera de CFCs⁴, en presencia de radiación ultravioleta, podía desencadenar la destrucción del ozono estratosférico. Hacia finales de la década del 80 se había comprobado que efectivamente la destrucción de la capa de ozono se debía a la presencia en la estratosfera de CFC, HCFC⁵, y Halones (hidrocarburos halogenados), que liberan sus átomos de

⁴ Clorofluorocarburos: Sustancias derivadas de los hidrocarburos saturados obtenidos mediante la sustitución de átomos de hidrógeno por átomos de cloro y flúor. Su degradación es muy difícil y su presencia en la atmósfera se prolonga durante muchos años (50–100). (PRTR, CFC (CLOROFLUOROCARBURAS), 2021)

⁵ Hidroclorofluorocarburos: son compuestos formados por átomos de cloro, flúor, hidrogeno y carbono. (PRTR, HCFC (HIDROCLOROFLUOROCARBURAS), 2021)

cloro y bromo por efecto de la radiación ultravioleta B, estos átomos reaccionan con el ozono y lo destruyen. (Yañez, 2018) La radiación ultravioleta B posee una longitud de onda de 280 a 314 nm (CDC, 2021) y es mayormente absorbida por la capa de ozono, pero una parte sí logra llegar a la superficie terrestre causando afecciones.

Este descubrimiento fue el factor que revolucionó al mundo de los refrigerantes pues se tuvo que fabricar refrigerantes que cumplieran con las características (presión, temperatura, volumen, entalpía, densidad, entropía, no debe ser tóxico ni venenoso, no debe ser explosivo ni inflamable, no debe tener efecto sobre otros materiales, fácil de detectar cuando fuga, miscible con aceite, no debe reaccionar con humedad y debe ser un compuesto estable (REFRIGERANTES, 2021)) para llevar a cabo el trabajo de los anteriores pero con menor potencial de dañar a la capa de ozono. Los refrigerantes que se seleccionaron para esta tesis se mencionarán más adelante junto con el motivo del porqué fueron escogidos.

1.3 TIPOS DE BOMBA DE CALOR

Para llevar a cabo la clasificación de las bombas de calor se tiene que conocer que éstas se dividen según el proceso, construcción, funcionamiento o el medio de origen y destino.

- Según el tipo de proceso
 - BC donde el compresor es impulsado mecánicamente por un motor eléctrico, gas o diesel.
 - BC de accionamiento térmico (BC de absorción), el ciclo es impulsado mediante calor a temperaturas elevadas.
 - BC electrotérmicas, funcionan a partir del efecto Peltier. El efecto Peltier consiste en lo siguiente: Cuando se hace pasar una corriente por un circuito compuesto de materiales diferentes cuyas uniones están a la misma temperatura se absorbe calor en una unión y se desprende en la otra. La parte que se enfría suele estar cerca de los 25 °C, mientras que la parte que absorbe calor puede alcanzar rápidamente los 80 °C. (Lizárraga., 2001)
- Según su construcción
 - Compacta: Todos los elementos se encuentran alojados dentro de una misma carcasa.
 - Split: Son dos unidades separadas, una exterior donde se encuentran el compresor y la válvula de expansión mientras que en la unidad interior se alojan los demás componentes. La ventaja que tiene esta configuración es que la operación es silenciosa.
 - Multi-split: Constituidas por una unidad exterior y varias unidades interiores.
- Según funcionamiento
 - Reversibles: Funciona como ciclo de calefacción o de refrigeración invirtiendo el sentido del fluido.
 - No reversibles: Funciona únicamente en ciclo de calefacción.
 - Termofrigobombas: Producen simultáneamente frío y calor. (Zárraga, 2009)
- Según el medio de origen y destino de la energía

Esta clasificación es la más reconocida y utilizada para diferenciar los diversos tipos de BC que existen en la actualidad. La Bomba de Calor extrae energía

de un medio; mediante el trabajo externo aportado, esta energía es cedida a otro medio. El medio del que se extrae la energía se llama foco frío y el medio al que se cede se llama foco caliente. (Zárraga, 2009) Dependiendo del origen de estos focos la clasificación es la siguiente:

Tabla 3 Foco frío y caliente de las BC (Zárraga, 2009)

Según medio de origen y destino de la energía	FOCO FRÍO	FOCO CALIENTE
	AIRE	AIRE
	AIRE	AGUA
	AGUA	AIRE
	AGUA	AGUA
	TIERRA	AIRE
	TIERRA	AGUA

1.3.1 BOMBAS DE CALOR FUENTE AIRE

Para este tipo de bombas de calor la energía es extraída del aire exterior y es transferida hacia el interior del espacio que se desea climatizar como se muestra en la Imagen 34. Las desventajas para esta fuente es la temperatura del aire, ya que, normalmente el aire se encuentra a una temperatura alta cuando se desea enfriar y a una temperatura baja cuando se desea calentar, es por eso que las BC de fuente aire no son eficientes energéticamente, producen ruido y requieren mantenimiento constante. Sin embargo, la mayor parte de los hogares cuentan con este sistema pues son de fácil adquisición, bajo costo y con disponibilidad para las piezas de reemplazo. (ESPINOSA, 2019)

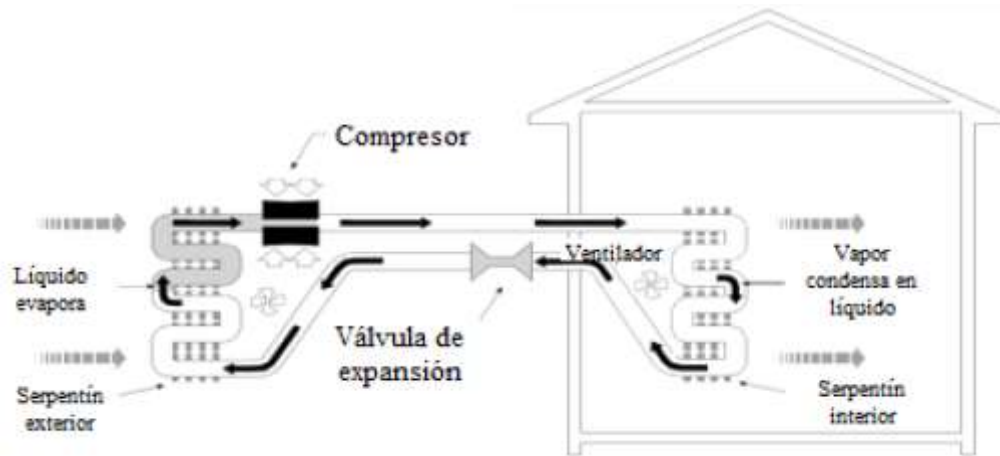


Imagen 34 Bomba de calor fuente aire (efENERGIA, 2019)

1.3.2 BOMBAS DE CALOR FUENTE AGUA

Es posible emplear agua superficial y subterránea como la disponible en ríos, lagos y pozos de poca profundidad, usando el agua como fuente y medio disipador de calor, así como se ve en la Imagen 35. A diferencia de las BC fuente aire, este sistema tiene una mayor eficiencia debido a que la temperatura del agua permanece constante durante diferentes horas del día y en un mayor periodo de tiempo o estación. (ESPINOSA, 2019)

Una de las configuraciones que se emplean en este tipo de sistemas es el *open-loop* o sistemas abiertos que hacen uso del agua extrayendo y reinyectando el fluido a la fuente (río, lago o pozo) después de la transferencia de calor entre las tuberías del pozo y el fluido refrigerante. El problema con estos sistemas es el poco control que se tiene al momento de la descarga posterior a haber extraído el agua y por los problemas ambientales que trae esto consigo, además el costo de instalación es demasiado elevado y existe una poca regulación para estos sistemas elevando el número de trámites para llevar a cabo su instalación. (ESPINOSA, 2019)

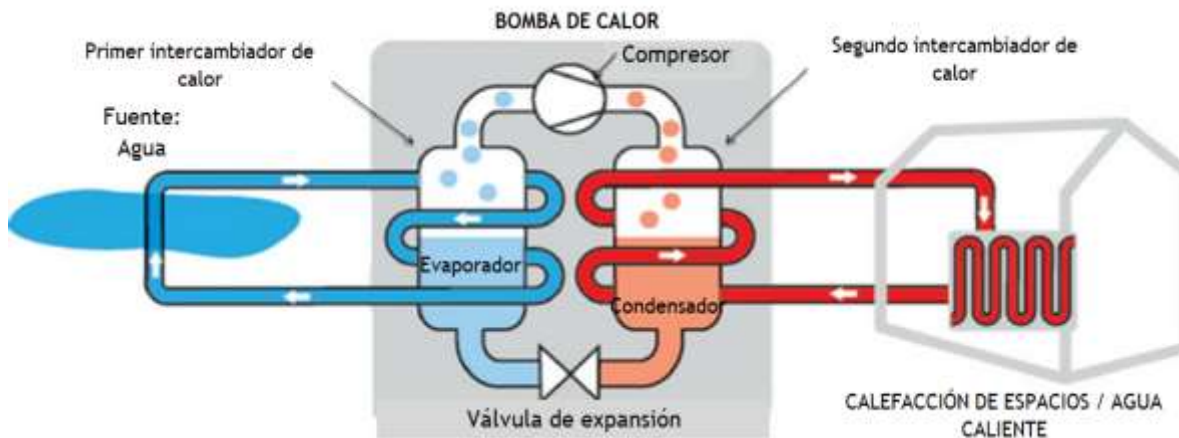


Imagen 35 Bomba de calor fuente agua (Emmanuel, 2014)

1.3.3 BOMBAS DE CALOR FUENTE SUELO

En el siguiente apartado solo se describirá de forma general este tipo de BC ya que en el capítulo **2.3 BOMBA DE CALOR GEOTÉRMICA** se adentra más en el tema, pues este tipo de equipo es el que se desarrolló a lo largo de esta investigación.

Una BC con intercambio de energía térmica con el subsuelo toma ventaja de la inmensa masa de la Tierra y su moderada temperatura, este proceso es conocido como *geointercambio* y su aplicación térmica más común es a través de una BC fuente suelo también conocida como BC geotérmica. (ESPINOSA, 2019)

El intercambiador o colector de calor con el subsuelo es el componente principal dentro del geointercambio, en donde se hace circular continuamente un fluido de trabajo mediante un sistema cerrado o *closed-loop* instalado en el subsuelo. Los fluidos de trabajo más empleados son el agua o una solución de etilenglicol al 30% que circula a través de tubos de polietileno de alta densidad o

acero inoxidable en configuraciones verticales u horizontales, las cuales se verán más adelante, transportando así el calor superficial hacia la bomba de calor y viceversa. El tiempo de vida para la BC es de 20 a 30 años mientras que el intercambiador de calor conectado al subsuelo puede extenderse a 50 años. (ESPINOSA, 2019)

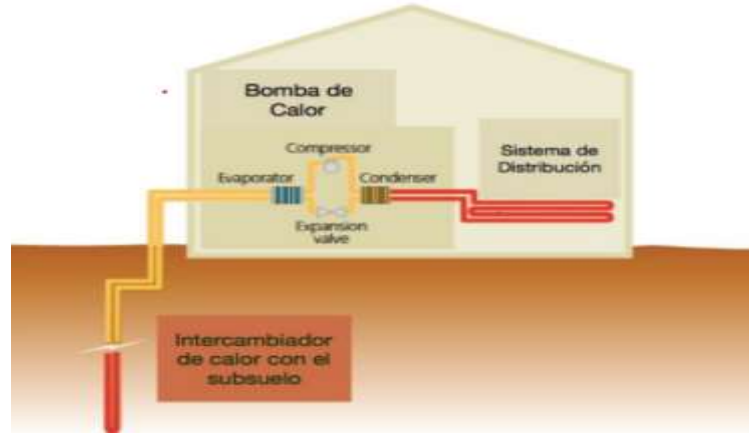


Imagen 36 Bomba de calor fuente suelo (Energy-Saving-Trust., 2007)

1.4 APLICACIONES DE LA BOMBA DE CALOR

La aplicación más relevante y más conocida que tienen estos equipos es la climatización de un espacio que, como se indicó desde el principio de este escrito es el objetivo del trabajo de investigación de esta tesis, sin embargo, se darán a conocer otras formas de aprovechar su principio de funcionamiento para otras aplicaciones que se mencionarán a continuación.

Se puede llegar a utilizar una bomba de calor en el proceso de producción de aceites comestibles para contrarrestar el desperdicio de energía calorífica. El principio de funcionamiento es que la corriente de enfriamiento del proceso cede energía al evaporador de la BC que es usada en el condensador para calentar el agua de alimentación a la caldera. Se emplea un intercambiador de calor para aproximar las temperaturas de la corriente de enfriamiento y la corriente de alimentación a la caldera; este proceso, conocido como *tecnología de pinza o tenaza*, se demuestra en la Imagen 37 . (Hernández A. M., 1990)

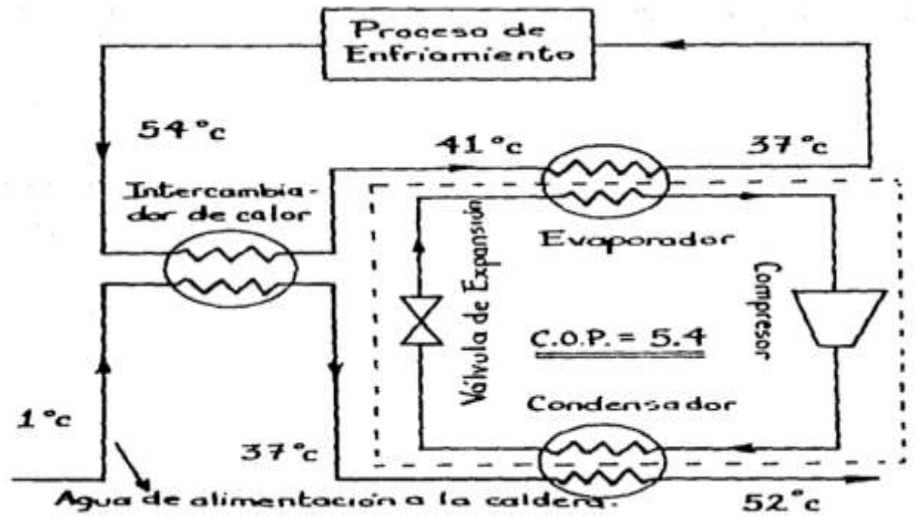


Imagen 37 BC para la producción de aceites comestibles (Hernández A. M., 1990)

Después del ejemplo anterior se puede decir que una BC se utiliza al querer enfriar algún proceso y calentar otro que se encuentre a una temperatura mayor. La Imagen 38 presenta otra aplicación de la BC en la industria para concentrar sustancias con un bajo punto de ebullición que requieran ser hervidas; el refrigerante que sale del compresor como vapor sobrecalentado entra al intercambiador de calor de flujo cruzado en donde una corriente de agua fría remueve todo su calor de sobrecalentamiento, posteriormente el vapor saturado se condensa, cediendo todo su calor latente para evaporar el producto. El refrigerante en estado líquido fluye al tanque receptor y luego a la válvula de expansión, llegando al evaporador absorbiendo calor del producto y, por ende, condensándolo. El vapor regresa al compresor y completa el ciclo.

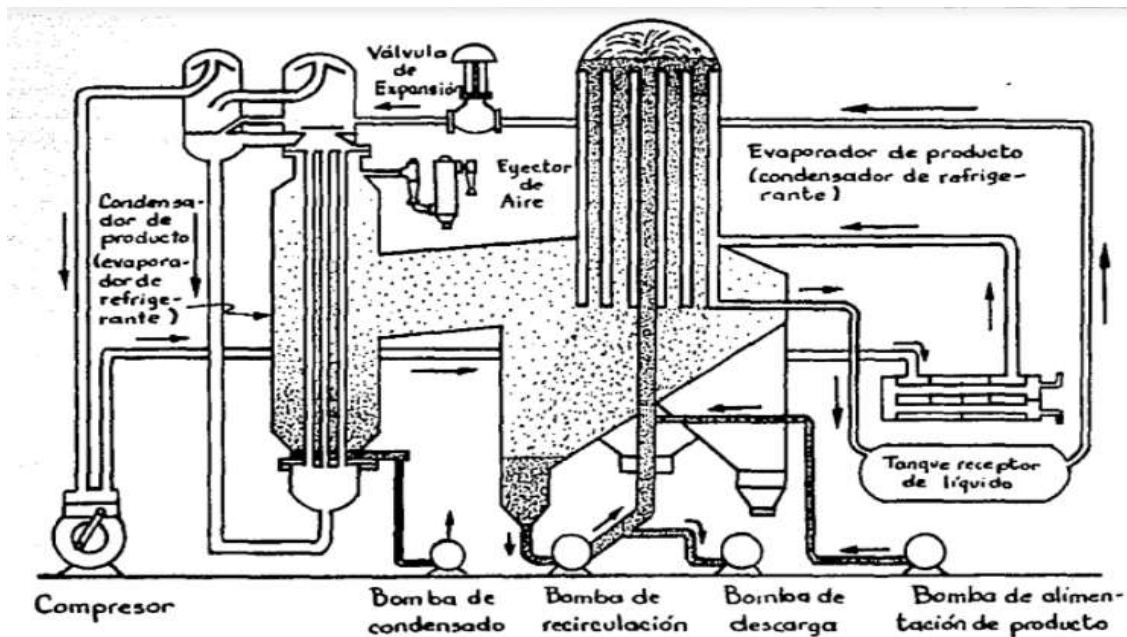


Imagen 38 BC para la concentración de un producto (Hernández A. M., 1990)

Otras de las aplicaciones que se tienen para las BC es cuando se presentan necesidades de agua fría y caliente entre los 40 °C a 90 °C ya sea para servicios de lavandería, limpieza o desinfección, las bombas de calor de compresión con motor eléctrico son las que pueden cubrir esta demanda. (Godoy, 2008)

Asimismo, las bombas de calor se emplean en la deshumidificación industrial y secado lento y sensible a altas temperaturas, en esta aplicación se usa la propiedad del aire para humidificarse y mientras más alta sea la temperatura, mayor cantidad de humedad es absorbida. El proceso consiste en impulsar aire caliente y seco, que robará humedad al producto a secar. Posteriormente este aire húmedo pasa por el evaporador de la Bomba de Calor, en el que se enfría y deshumidifica (Godoy, 2008). La Imagen 39 muestra la configuración de los elementos de una BC donde se enumeran de la siguiente manera: 1) compresor, 2) ventilador, 3) evaporador (enfría el aire caliente y húmedo), 4) condensador (calienta aire frío y seco), 5) válvula de expansión, 6) ventilador y 7) agua extraída, y que se puede ver que el aire que pasa a través de la cámara donde se tienen las hojas de tabaco es el responsable de la deshumidificación de éstas.

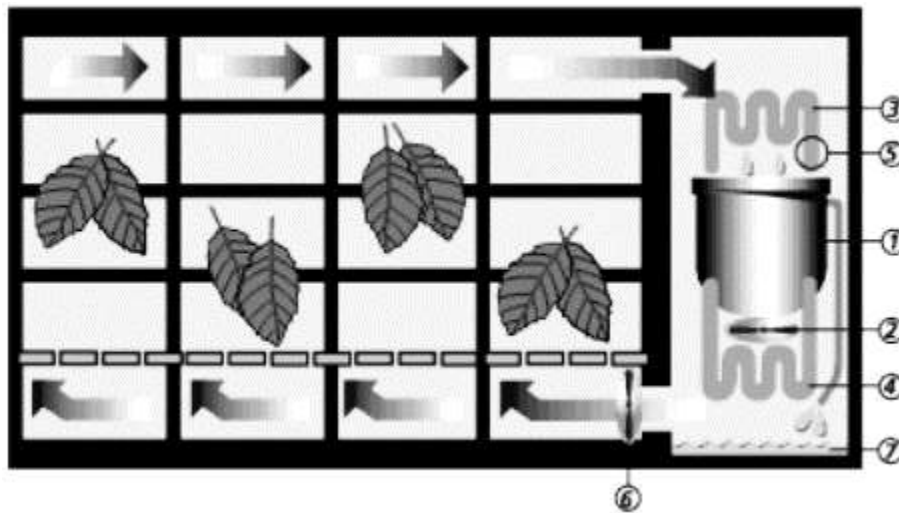


Imagen 39 Proceso de secado de tabaco (Godoy, 2008)

La Imagen 40 demuestra otra de las aplicaciones industriales en las que se emplea una BC y es para el secado de lodos provenientes de las depuradoras de aguas residuales. Las BC igual tienen presencia en los invernaderos al reducir el nivel de humedad dentro de éstos.

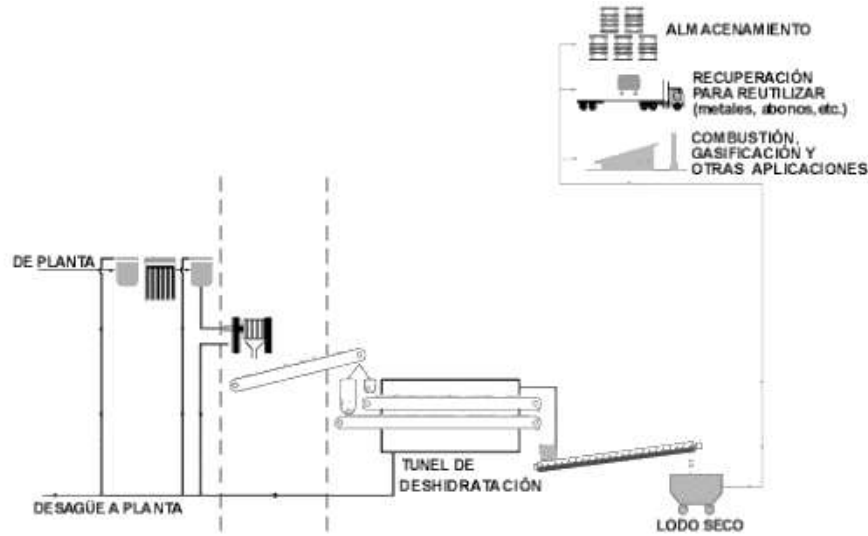


Imagen 40 Túnel de deshidratación de lodos (Godoy, 2008)

Otra de las aplicaciones de las BC es en las piscifactorías⁶ en las que se requiere el agua a diferente temperatura dependiendo de la aplicación que se desee ya que varía si es para la cría de especies o la fecundación de huevos y crecimiento de alevines⁷ como se muestra en la Imagen 41.

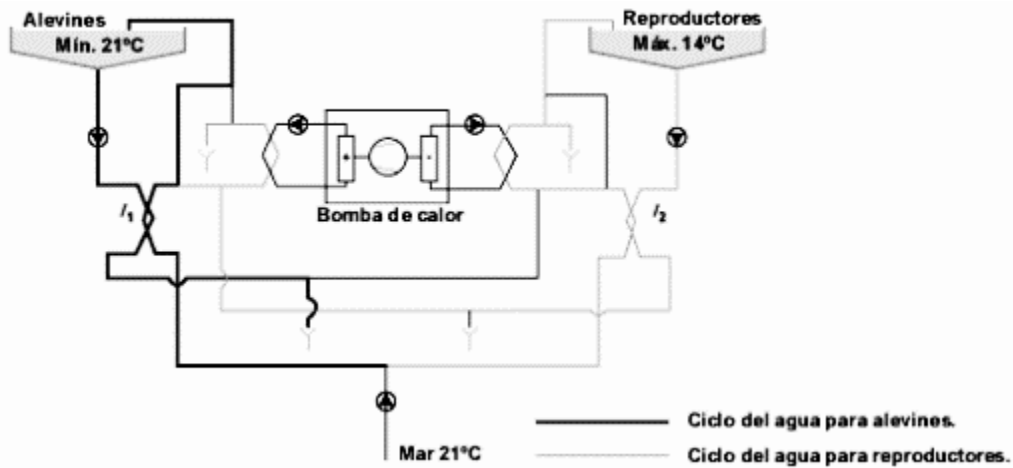


Imagen 41 BC en piscifactoría (Godoy, 2008)

Otra de las aplicaciones de las BC es en la fermentación de pan en la que los azúcares contenidos en la masa se transforman en alcohol y anhídrido carbónico, este proceso se desarrolla a una temperatura de 22 a 30 °C (Godoy, 2008), la Imagen 42 muestra el proceso de fermentación.

⁶ Instalaciones industriales que establecen granjas acuáticas, cuyo objetivo es criar animales acuáticos mediante la piscicultura. Se usan para el sector alimenticio, fines ornamentales o utilizados para repoblar lagos y ríos con la finalidad de habilitarlos para la pesca deportiva. (Aquarium, 2021)

⁷ Crías recién nacidas de peces.

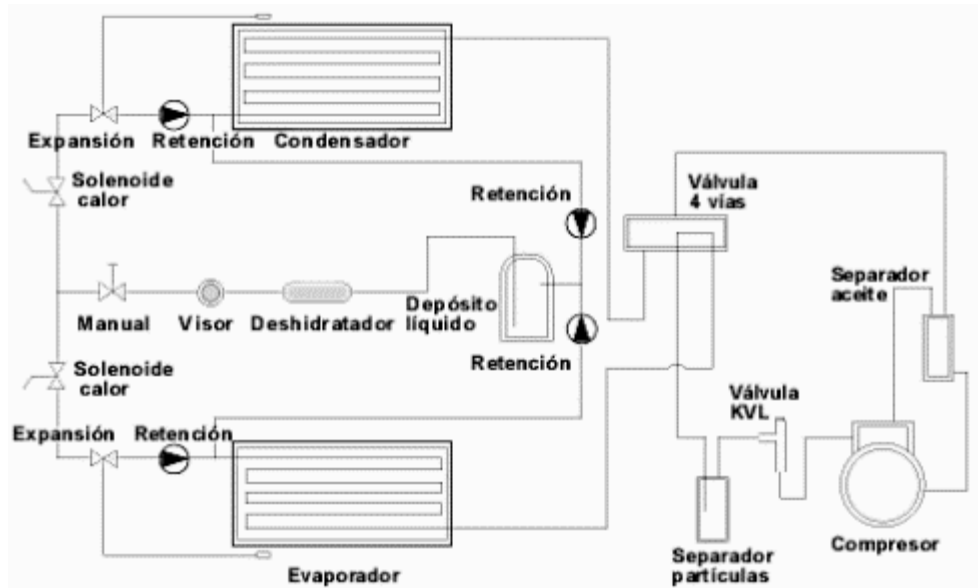


Imagen 42 BC en la fermentación de pan (Godoy, 2008)

Finalmente, otras de las utilidades que tienen estos equipos son:

- a. Sector vinícola: Enfriamiento del vino y producción de agua caliente para el lavado de botellas.
- b. Industria textil: Calefacción de los baños de tinte.
- c. Industrias del papel y de la pulpa de madera: proceso de evaporación, calefacción y secado.
- d. Industrias plásticas: Diversos procesos como refrigeración de las cabezas de extrusión e inyección, con recuperación del calor para la calefacción de locales.
- e. Industria del caucho: Calefacción de las soluciones de separación.
- f. Sector Lácteo: Pasteurización de los productos lácteos, evaporación, concentración y esterilización, y procesos de limpieza.
- g. Industria alimentaria: Procesos de cocción en el sector de conservas, charcuterías, azucareras, etc.
- h. Industrias siderometalúrgicas: Desengrase, lavado, galvanizado, preparación de pinturas, secado.
- i. Industria cerámica: Secado.

Al finalizar de leer este apartado se espera que el lector adquiera una visualización más amplia de las diversas aplicaciones de las bombas de calor, además de la climatización, que se tienen dentro de la industria. Es por ello, que es importante no dejar este mercado atrás y seguir con la investigación, innovación y sustentabilidad de estos equipos.

2. ENERGÍA GEOTÉRMICA

Al inicio de esta tesis se dio a conocer las consecuencias que trae consigo el uso de combustibles fósiles para la industria de la climatización, es por ello que expertos en el tema han empezado a buscar las mejores alternativas para su sustitución. Como se ha mencionado desde un principio la innovación que se presenta en este trabajo de tesis es el uso de una energía alterna para producir el intercambio de calor entre el fluido de trabajo que recorre los equipos de la BC y el subsuelo de la superficie terrestre para llevar a cabo la climatización del recinto; este intercambio se lleva a cabo gracias a la *Energía Geotérmica*.

2.1 INTRODUCCIÓN

La energía geotérmica se define como el calor de la Tierra que es recuperado, explotado, transformado y aprovechado por la humanidad. La procedencia de este calor es a partir del colapso gravitatorio que formó a la Tierra junto con la desintegración radioactiva de isótopos de uranio, torio y potasio en la corteza terrestre. El flujo de calor desde el interior de la Tierra (12.6 billones EJ) hacia los estratos superiores de la corteza (5,400 millones EJ) produce cambios de temperatura a distintas profundidades, conocidos como gradientes geotérmicos. (Édgar Santoyo, 2010) Así como la desintegración de estos isótopos radioactivos se considera el origen de la fuente de calor dentro de la Tierra, se conoce que con el paso del tiempo el planeta se va enfriando lentamente, Stacey y Loper, en su libro *Thermal history of the Earth: a corollary concerning non-linear mantle rheology*, indican que el flujo total de calor está estimado en 42×10^{12} W ya incluyendo la conducción, convección y radiación. De este total, 8×10^{12} W provienen de la corteza, la cual representa sólo el 2% del volumen total de la Tierra, pero que es rica en isótopos radioactivos; 32.3×10^{12} W provienen del manto, el cual representa el 82% del volumen total de la Tierra y 1.7×10^{12} W provienen del núcleo, el cual corresponde al 16% del volumen total y no contiene isótopos radioactivos. Considerando que el calor radiogénico del manto se estima en 22×10^{12} W, la tasa de enfriamiento de esta parte de la Tierra es 10.3×10^{12} W. (STACEY F.D., 1988) Sin embargo, en estudios recientes y con base en un número mayor de datos el último valor es 6% mayor. (Fanelli, 2004)

Un sistema geotérmico está constituido por 3 elementos principales: una fuente de calor, un reservorio y un fluido, el cual es el medio que transfiere el calor. La fuente de calor puede ser tanto una intrusión magmática a muy alta temperatura (> 600 °C), emplazada a profundidades relativamente someras (5-10 km) o bien, como en sistemas de baja temperatura con el gradiente geotérmico normal. El reservorio es un volumen de rocas calientes permeables del cual los fluidos circulantes extraen el calor. Generalmente el reservorio está cubierto por rocas impermeables y está conectado a un área de recarga superficial a través de la cual el agua meteórica⁸ puede reemplazar los fluidos que se escapan del reservorio a través de las fuentes termales o que son extraídos mediante pozos. El fluido geotermal es agua en la mayoría de los casos de origen meteórico, ya sea en la fase líquida o en la fase vapor, dependiendo de su temperatura y presión.

⁸ Las aguas meteóricas son aquellas provenientes del vapor de agua atmosférico que pueden precipitar en forma de neblina, lluvia, helada, nieve, granizo y entre otras formas. (Herlane Costa Calheiros, 2014)

Los sistemas geotérmicos funcionan a partir de la convección de fluidos, donde dicho fenómeno tiene lugar debido al calentamiento y a la consecuente expansión termal de los fluidos; el calor, que es suministrado en la base del sistema de circulación, es la energía que acciona el sistema. El fluido calentado de menor densidad tiende a ascender y a ser reemplazado por fluido frío de mayor densidad, proveniente de los márgenes del sistema como se representa en la Imagen 43.

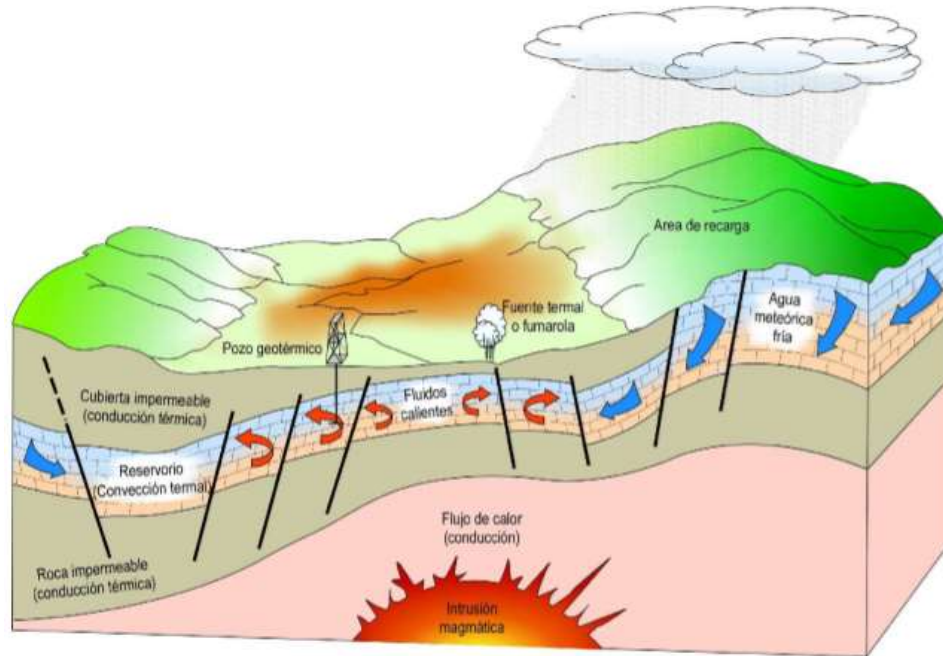


Imagen 43 Sistema geotérmico (Lahsen, 2021)

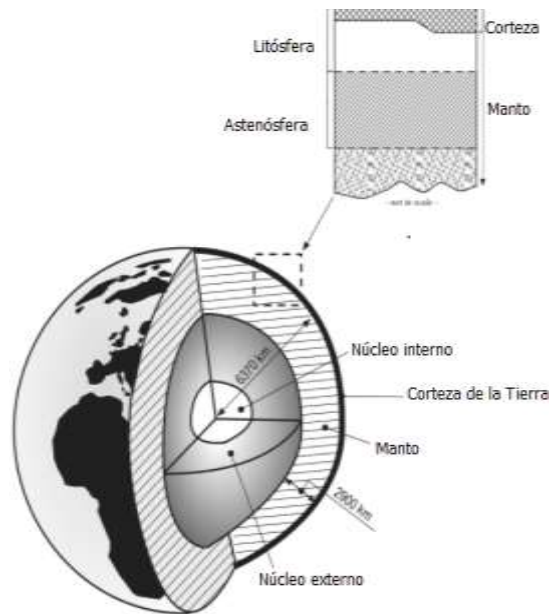


Imagen 44 Estructura interna de la Tierra (Mary H. Dickson, 2003)

La Imagen 44 permite observar las partes internas que conforman al planeta Tierra para hacer más ilustrativo lo que se dijo con anterioridad. El calor que viene del núcleo junto con el del manto se transmite hasta la corteza constituida por rocas en estado sólido y no en un estado semifundido como lo están en el manto, la profundidad de este último en es de aproximadamente 2,900 km mientras que la corteza solo alcanza los 70 km. (ENERGIA, 2021)

Con base en la Imagen 45 se puede desglosar con más detalle la composición verdadera del planeta; la envoltura más externa de la Tierra, conocida como la litosfera, corresponde a la corteza y al nivel superior del manto, su espesor varía de menos 80 km en las zonas oceánicas hasta sobre 200 km en áreas continentales, la litosfera se comporta como un cuerpo rígido. Bajo esta está la zona conocida como astenósfera, de 200 a 300 km de espesor, la cual tiene un comportamiento menos rígido o más plástico que la litosfera, en otras palabras, a escala geológica en la cual el tiempo se mide en millones de años, esta porción de la Tierra se comporta prácticamente, en ciertos procesos, como un fluido.

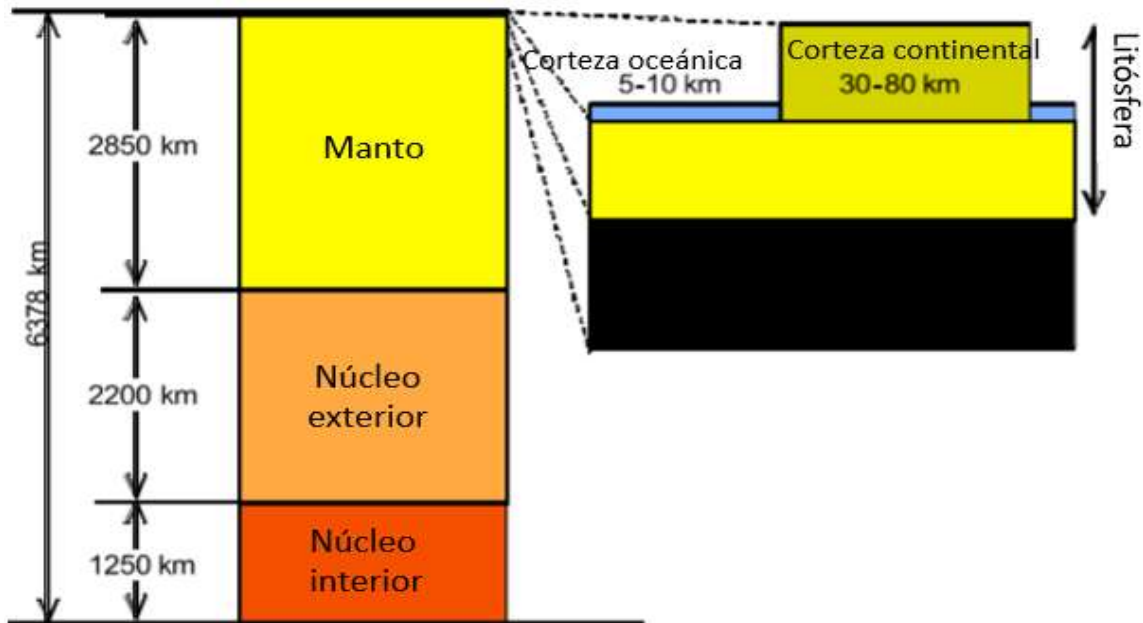


Imagen 45 Secciones del planeta Tierra (Kiril Popovski, 2021)

Debido a la diferencia de temperatura entre los distintos niveles de la astenósfera se han originado movimientos convectivos extremadamente lentos (unos pocos centímetros por año) que se mantienen mediante el calor producido por el decaimiento de elementos radioactivos y por el calor proveniente de las partes más profundas de la Tierra. Grandes volúmenes de rocas calientes profundas, menos densas y más livianas que el material circundante, ascienden con estos movimientos hacia la superficie, mientras que rocas superficiales más pesadas, densas y frías tienden a hundirse, se recalientan y ascienden a la superficie una y otra vez, en forma muy similar a lo que sucede al agua hirviendo en una caldera.

En aquellas zonas donde la litosfera es más delgada y especialmente en las áreas oceánicas, la litosfera es empujada hacia arriba y quebrada por el material parcialmente fundido muy caliente, que asciende desde la astenosfera, en concordancia con la rama ascendente de las celdas convectivas. Este es el mecanismo que originó y aún origina las dorsales oceánicas, que se extienden por más de

60,000 km debajo de los océanos. Una relativamente pequeña fracción de rocas fundidas emergen en la cumbre de estas dorsales, y en contacto con el agua de mar se solidifica para formar nueva corteza oceánica. La mayor parte del material que asciende desde la astenosfera se divide en dos ramas que fluyen en dirección opuesta debajo de la litosfera. La continua generación de nueva corteza y el empuje en direcciones opuestas de estas dos ramas provoca que cada lado de la dorsal se separe a una velocidad de pocos centímetros por año incrementando la litosfera oceánica; cuando existen cortes perpendiculares en las dorsales se les conocen como fallas transcurrentes. Asimismo, hay que tener presente la existencia de zonas de subducción, en ellas la litosfera se pliega y sumerge bajo la litosfera adyacente hasta zonas profundas muy calientes, donde es “digerida” por el manto y el ciclo se reinicia nuevamente. Parte del material litosférico vuelve al estado fundido y puede ascender hacia la superficie a través de facturas en la corteza. Consecuentemente, se forman arcos magmáticos con numerosos volcanes paralelos a las fosas, en el lado opuesto al de las dorsales; si estos arcos están en fosas en el océano son considerados islas volcánicas mientras que si están en los márgenes continentales éstos consisten de montañas con numerosos volcanes.

Las dorsales oceánicas, fallas transcurrentes y zonas de subducción constituyen una vasta red que divide nuestro planeta en seis placas o áreas litosféricas las cuales se pueden observar en la Imagen 46; los márgenes de las placas corresponden a zonas de la corteza débiles y densamente fracturadas, caracterizadas por una intensa sismicidad, por un gran número de volcanes y por un alto flujo calórico terrestre, debido al ascenso de materiales muy calientes hacia la superficie.



Imagen 46 Placas litosféricas, dorsales y fosas oceánicas, zonas de subducción y campos geotérmicos (Fanelli, 2004)

Así como esta clasificación, existe otra que se mencionan a continuación:

- Según el fluido que se extrae o inyecta para intercambiar calor con la roca
 - Recurso de alta entalpía: Temperatura del fluido mayor a 200 °C. Debido a las características termodinámicas del fluido se aprovecha para la producción de electricidad.

- Mediana entalpía: Fluido de 100 a 200 °C. Se utiliza en la producción de electricidad mediante ciclos binarios y usos industriales.
- Baja entalpía: Menor a 100 °C. La forma en la que es aprovechada esta entalpía es en usos directos del calor por ejemplo en calefacción, procesos industriales o balneología. (Édgar Santoyo, 2010) (JUÁREZ, 2016)

La Imagen 47 muestra la distribución de este tipo de recurso geotérmico alrededor del mundo, como se puede observar México cuenta con las tres clasificaciones teniendo la de alta entalpía mayor presencia en el territorio.



Imagen 47 Distribución de los recursos geotérmicos mundiales (California., 2011)

Igualmente, una clasificación de la energía geotérmica también válida es la siguiente:

- A. Sistemas hidrotermales convectivos: Constituidos a partir de una fuente de calor, fluidos para el intercambio de energía, roca permeable (almacenamiento de los fluidos) y “roca sello”. La infiltración de fluidos hasta los yacimientos es a través de poros y fracturas en la corteza terrestre; la manifestación física de los yacimientos es por manantiales calientes, fumarolas, géisers, etc. Al igual que la energía en sí, los yacimientos también pueden variar por vapor o líquido dominante de baja, mediana o alta temperatura.
- B. Sistemas geotérmicos de roca seca caliente: Roca seca a muy alta temperatura (~ 650 °C), de 2 a 4 km de profundidad y la cual no cuenta con fluidos suficientes en el fondo para el transporte de calor a la superficie. La forma en la que se aprovecha es mediante una red de fracturas en la roca e inyección de fluidos para su aprovechamiento. (Édgar Santoyo, 2010)

Cabe recalcar que los tipos de energía geotérmica mencionados en los párrafos anteriores son los más comunes y más explotados en la actualidad. Existen igual sistemas geotérmicos geopresurizados, marinos, magmáticos y supercríticos; sin embargo, sigue en investigación por parte de diversas entidades lo necesario para llevar a cabo una provechosa explotación del recurso.

Ya que se hizo una breve introducción para el mejor entendimiento de la energía geotérmica, es importante recalcar que esta energía alterna ya posee en su haber una larga historia. Los griegos y

romanos dejaron numerosos ejemplos de su uso, para balnearios y calefacción urbana, algunos ejemplos son, las instalaciones de Aeculapium y la antigua Pérgamo, donde el hospital utilizaba el agua caliente procedente de aguas termales de la ciudad, de igual forma tanto los Otomanos en Anatolia (actual Turquía) y los Paleo indios de América del Norte usaban aguas termales para preparar alimentos y minerales. Alrededor de 1330, en Toscana, pequeñas lagunas con agua caliente salobre de las que se escapaba vapor a más de 100 °C, eran explotadas para extraer ácido sulfúrico concentrado y alumbre. (JUÁREZ, 2016) Se conoce que entre los siglos XVI y XVII, una vez que se tuvo la capacidad de minar a profundidades más grandes y por mera sensación física, que dependiendo de la profundidad incrementaba la temperatura del planeta; de igual manera se conoce que en 1740 en Belfort, Francia se midieron por primera vez con termómetro las temperaturas de la Tierra (BULLARD, 1965) pero hasta el siglo XX, gracias al descubrimiento del calor radiogénico⁹ en conjunto con el descubrimiento que la Tierra se enfría lentamente, fue que se tuvo mejor entendimiento de este fenómeno.

Sin embargo, no fue hasta 1818 en Larderello con el descubrimiento de sales de boro¹⁰, que se marcó el inicio de la utilización industrial de los recursos geotérmicos. François Larderel en 1827 desarrolló un sistema para utilizar el calor de los fluidos en el proceso de evaporación, en lugar de quemar madera. Por esa misma época el vapor geotérmico se utilizó para elevar líquidos en primitivos elevadores por presión de gas y más tarde en bombas recíprocas y centrífugas y en poleas, todo lo cual fue utilizado en las perforaciones o en la industria local de ácido bórico. Asimismo, entre 1910 y 1940 el vapor de baja presión fue utilizado para calefaccionar invernaderos, edificios industriales y residenciales, en Toscana; mientras que, en 1892 en Boise, Idaho se instaló la primera red local de calefacción urbana, pero hay que recalcar que la primera red de mayor magnitud de calefacción urbana alimentada por energía geotérmica se instaló en Reikiavik, Islandia, en 1930. (JUÁREZ, 2016)

En 1904 se llevó a cabo el primer intento de generar electricidad a partir de vapor geotérmico; nuevamente, esto tuvo lugar en Larderello, en 1942 la capacidad geotermoeléctrica instalada alcanzaba los 127,650 kW_e, en 1919 los primeros pozos geotermales de Japón fueron perforados en Beppu, seguidos en 1921 por pozos perforados en The Geysers, California, USA, y en el Tatio, Chile. En 1958 entra en operación una pequeña planta geotermoeléctrica en Nueva Zelanda, en 1959 otra en México, en 1960 en USA, seguidos por otros países en los años siguientes.

⁹ Calor generado por el decaimiento de los isótopos radioactivos de Uranio (U238, U235), torio (Th 232) y potasio (K 40). (Electrificación-INDE, 2007)

¹⁰ El ácido bórico se obtenía mediante evaporación de las aguas boratadas en bateas de fierro, usando como combustible la madera de los bosques. (Fanelli, 2004)

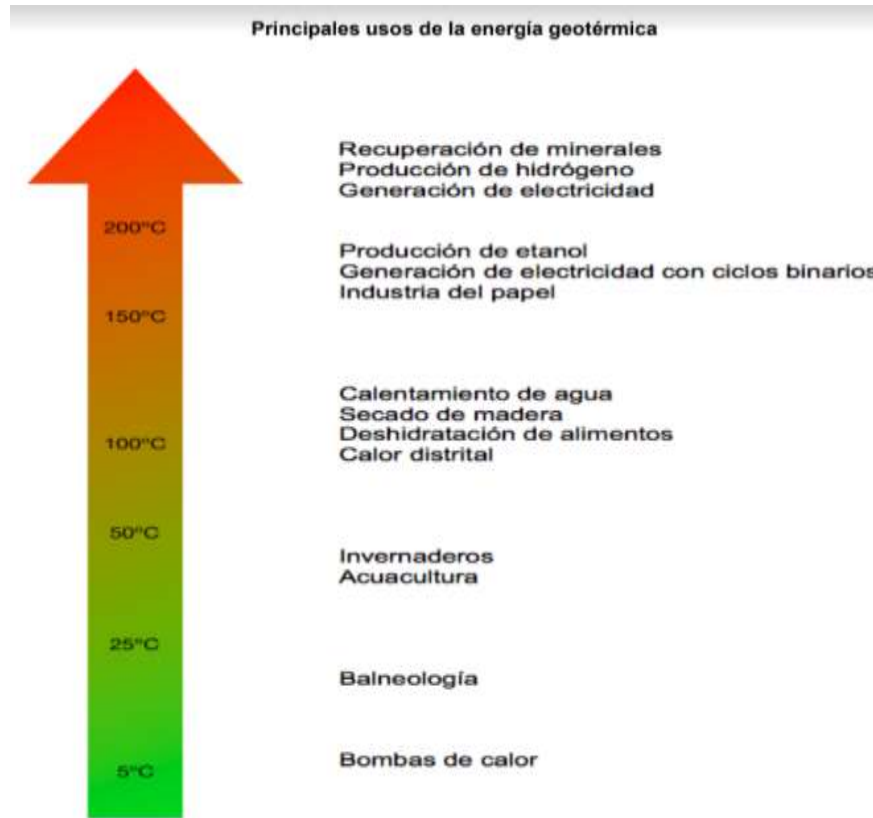


Imagen 48 Aplicaciones de la energía geotérmica de acuerdo a su temperatura (ESPINOSA, 2019)

La Imagen 48 muestra los usos que se dan a la geotermia de acuerdo a la temperatura de salida del recurso; como se puede ver las BC son las que menor cantidad de temperatura requieren, es por ello su facilidad, a comparación de otras aplicaciones geotérmicas, para poner en operación dichos equipos.

2.2 IMPACTO AMBIENTAL

A pesar de que la energía geotérmica es considerada como una fuente de energía limpia, los impactos ambientales no pueden ser excluidos antes, durante y después de la generación de energía geotérmica.

1. Subsistencia del terreno y sismicidad: Este está normalmente presente en los sitios geotérmicos, ya que se encuentran en zonas geológicamente inestables, donde la actividad volcánica, los terremotos profundos y los flujos de calor más altos de temperatura son la característica principal. Y cuando la sismicidad es inducida debido a la explotación de yacimientos, los impactos aumentan.
2. Ruido: Dado que la mayoría de las instalaciones geotérmicas se construyen lejos de las principales zonas urbanas, el ruido de la producción, el mantenimiento y la perforación no suele ser significativa. El principal problema es el ruido generado durante la construcción, la actividad vehicular, las emisiones de vapor sin cesar y ciertas operaciones de perforación.

3. Emisiones a la atmósfera: los gases (CO_2 , H_2S , NH_3 , CH_4 , N_2 y H_2), trazas de mercurio, vapor de boro y el radón, causando efectos en el suelo, la vegetación y la toxicidad potencial de la población.
4. Contaminación de aguas superficiales y subterráneas: las sustancias peligrosas utilizadas durante la exploración, construcción o producción, las fallas de estructuras de drenaje o fugas de depósitos superficiales. Algunos yacimientos geotérmicos contienen una gama de metales en suspensión y solución: As, Hg, Pb, Zn, B y S, junto con sílice, carbonatos, sulfatos y cloratos.
5. Los cambios en el paisaje y el uso del suelo: puede causar la erosión del suelo en las zonas de alta precipitación o pendientes pronunciadas lo que ocasiona conflictos sociales, cuando la población está cerca de la planta geotermoeléctrica.
6. Residuos sólidos: principalmente de la construcción de la planta, perforación, caminos, entre otros.
7. Ecología: con los efectos mencionados, habrá impactos sobre hábitats terrestres, acuáticos y ribereños, sobre todo en lugares donde hay especies en peligro de extinción. Donde la construcción de instalaciones, caminos, perforación, tuberías, etc., promueven la modificación de hábitats. (Ivonne, 2017)

2.3 BOMBA DE CALOR GEOTÉRMICA

Como se mencionó anteriormente, en este capítulo se ahondará más dentro de las configuraciones más comunes que poseen las bombas de calor geotérmicas, así como las ventajas que se tiene cuando se usa al recurso de la geotermia como fuente de energía.

Las bombas de calor geotérmica son aquellas que realizan el intercambio de calor de un fluido con el subsuelo para que este fluido sea el que intercambia calor con el refrigerante y así realizar la tarea de climatizar un recinto. Asimismo, estos sistemas poseen una mayor eficiencia teniendo valores de COP que oscilan entre 4 y 8 (ESPINOSA, 2019) y esto es debido a la temperatura que el subsuelo terrestre tiene en comparación a los de otro recurso natural que se planea usar como foco frío. La Imagen 49 permite ver que se requiere menor energía para aumentar la temperatura si es que la fuente se toma del subsuelo en comparación a si se toma del aire.

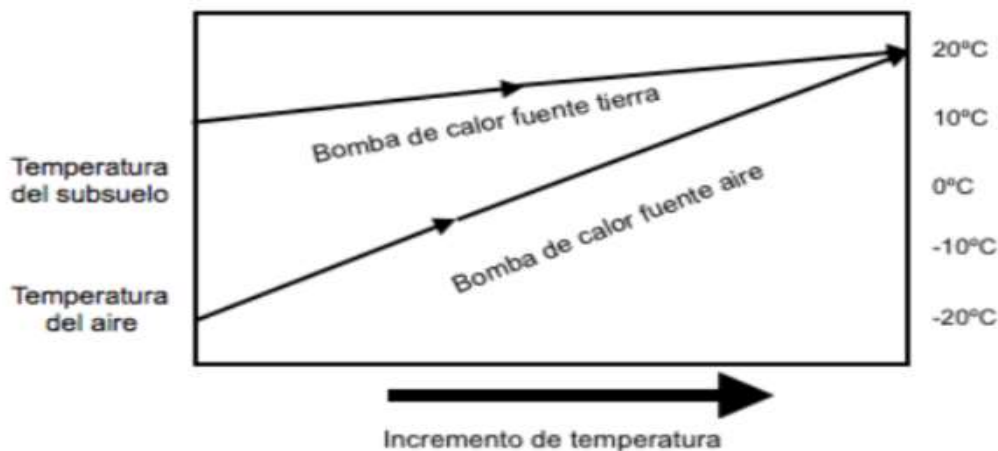


Imagen 49 Comparación del incremento de temperatura entre una bomba de calor fuente aire y suelo (CGC, 2010)

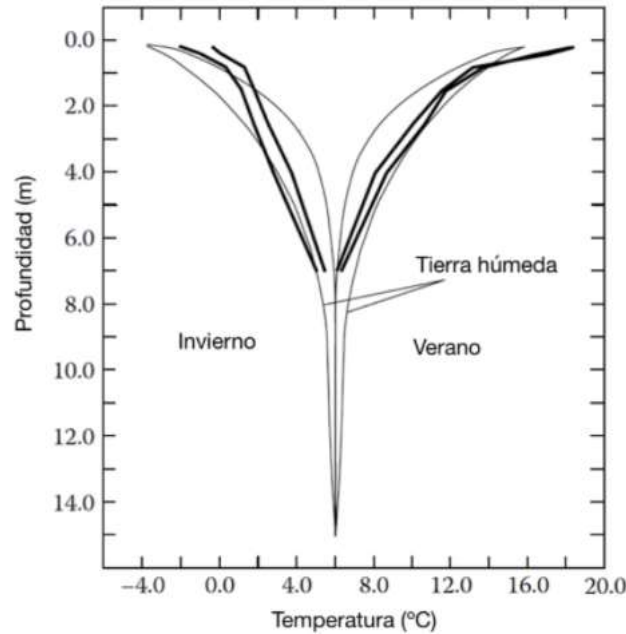


Imagen 50 Perfiles de temperatura en la tierra a una profundidad de 15 m (ESPINOSA, 2019)

Las BCG poseen en su haber diversas configuraciones del serpentín que se encuentra por debajo de la superficie terrestre como sistema cerrado y encargado de realizar el intercambio de calor:

- Configuración horizontal

Los captadores horizontales son recorridos por refrigerante; este tipo de captadores se instalan a una profundidad superior a 1.5 m e inferior a 5 m. Asimismo, requieren de una superficie de implantación entre 1.5 o 2 veces la superficie a climatizar (ingemecanica, 2021). Como se observa en la Imagen 48 y en la Imagen 50 para llevar a cabo la instalación de una bomba de calor no se requiere de una profundidad demasiado grande.

Al estar a poca profundidad, los sistemas horizontales deben tener la superficie exterior libre para evitar la saturación del terreno y por lo tanto mantener una buena transferencia de calor entre el colector y el terreno, ya que el flujo térmico irá en dirección radial al colector y, por lo tanto, en dirección vertical. Debido a la poca profundidad, los captadores pueden verse influenciados por la temperatura exterior.

Los sistemas horizontales pueden estar compuestos de sondas lineales formando un lazo cerrado o de sondas espirales que, como se ve en la Imagen 51, son tuberías enrolladas de manera circular dentro de una trinchera, este tipo de configuración requiere una mayor cantidad de tubería, pero ocupa una menor cantidad de superficie en comparación con la configuración horizontal simple, logrando alcanzar una transferencia de calor aproximada de 1 kW térmico por cada 10 m de tubería. (ESPINOSA, 2019) Los intercambiadores geotérmicos pueden estar compuestos de más de un lazo en su configuración. En el caso de BCG al instalarse varios lazos, deben situarse a más de 60 cm (ingemecanica, 2021) de distancia unos de otros, evitándose así influencias entre lazos.



Imagen 51 Circuito horizontal en configuración espiral o slinky (Acondicionados, 2017)

En las configuraciones horizontales no espirales, el área mínima necesaria para un hogar medio es aproximadamente 2000 m^2 . La profundidad mínima a la que se enterrarán las tuberías será de 1.2 m, además que el calor disipado es del orden de 10 W por metro cuadrado (ingemecanica, 2021); de igual manera los valores típicos de la configuración en horizontal según el *ASHRAE Handbook-HVAC Applications* son (N es el número de secciones en paralelo):

Horizontal 1

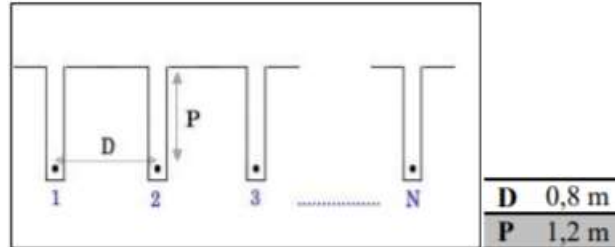


Imagen 52 Configuración horizontal uno (ASHRAE, 2015)

Horizontal 2

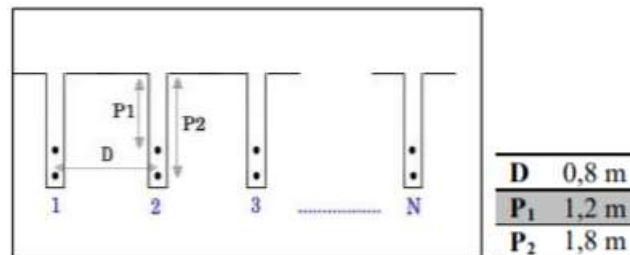


Imagen 53 Configuración horizontal dos (ASHRAE, 2015)

Horizontal 3

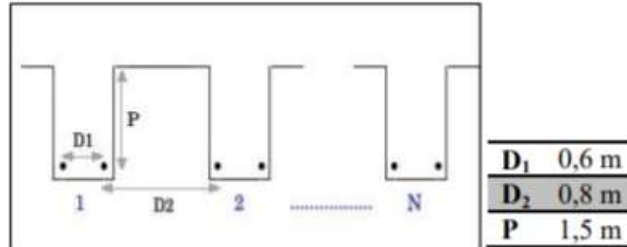


Imagen 54 Configuración horizontal tres (ASHRAE, 2015)

Horizontal 4

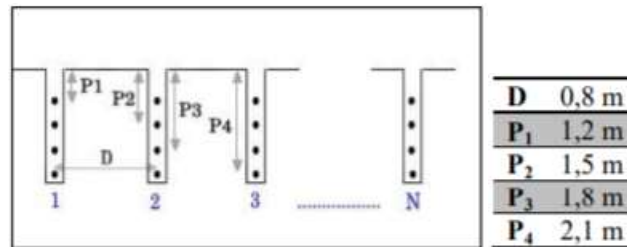


Imagen 55 Configuración horizontal cuatro (ASHRAE, 2015)

Horizontal 5

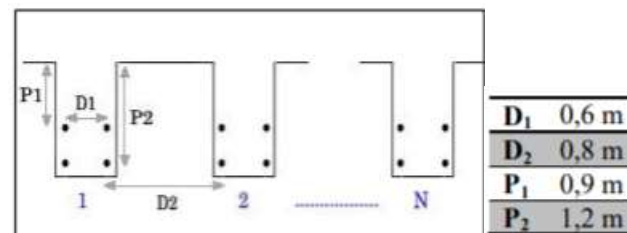


Imagen 56 Configuración horizontal cinco (ASHRAE, 2015)

- Configuración vertical

La profundidad de instalación de estos sistemas varía desde los 50 a los 150 m (ingemecanica, 2021) de profundidad permitiendo así el uso del suelo que cubre el sistema de captación ya que, en este caso, la dispersión del flujo térmico no irá en dirección vertical, sino en dirección horizontal, además que se puede evitar la influencia de la temperatura exterior en el captador.

Las sondas son en forma de U de un material polimérico como el polietileno de alta densidad. En sistemas compuestos con más de una sonda, debe haber una separación mínima entre ellas de al menos 4.5 m, además esta configuración posee la ventaja de que el calor disipado es del orden de 50 W por metro cuadrado.

Al igual que la configuración horizontal el acomodo del disipador según el *ASHRAE Handbook-HVAC Applications* es:

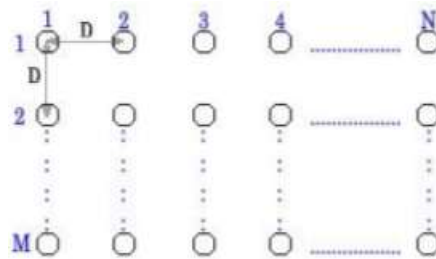


Imagen 57 Configuración vertical (ASHRAE, 2015)

Las tuberías deben tener un diámetro comprendido entre 20 y 40 mm y terminación en U. La profundidad a la que se introducen las tuberías no debe ser inferior a 15 m ni superior a 180 m. En la Imagen 57 el parámetro *D* variará entre 4.5 y 8 m, mientras que los parámetros *N* y *M* determinan el número de columnas y filas de pozos respectivamente. Cada círculo representa un pozo y en cada pozo se introducirán dos tubos, uno de ida y otro de vuelta unidos por una U en la parte inferior del pozo. (ingemecanica, 2021)

Al principio de este trabajo se hizo mención acerca de todos los beneficios que trae consigo el uso de una bomba de calor y cómo es que su funcionamiento permite tener una mayor eficiencia al ofrecer más energía de la que demanda, pero en este apartado se desglosará principalmente las ventajas que trae consigo el uso de este tipo de equipos para la climatización.

Primero hay que decir que, como se ha dicho, el uso de BCG reduce el número de emisiones de CO_2 (como se observa en la Imagen 58) debido a que en ellas no existe la quema de combustibles fósiles para lograr el intercambio de calor con el refrigerante.

	Gasoil	Gas	Biomasa	Acumulador eléctrico tarifa nocturna	Bomba de calor	Solar/ electricidad/ gasoil	Solar/ gas
Porcentaje de ahorro							
Agua caliente (ACS)	92%	90%	83%	83%	83%	69%	72%
Calefacción	89%	87%		78%	56%	84%	81%
Aire acondicionado	47%	47%	47%	47%	47%	47%	47%
Climatización más ACS	88%	85%	-57%	76%	58%	82%	79%

Imagen 58 Emisiones de CO_2 por fuente (Martín, 2011)

De igual manera, la geotermia reduce el coste que supone climatizar una vivienda, tanto para calor como para frío. Su rendimiento puede ser hasta 4 veces superior al de una caldera convencional y el gasto hasta un 75% inferior. Asimismo, la bomba de calor geotérmica al intercambiar con la corteza de la tierra, tiene un rendimiento muy alto no dependiendo de la temperatura exterior, lo cual hace que el sistema sea muy eficiente técnicamente. Las BCG representa un ahorro energético y económico de entre un 60 y un 80% respecto a los sistemas de climatización tradicionales como el gas o el gas-oil como lo muestran la Imagen 59 y la Imagen 60. (Martín, 2011)

Porcentaje de ahorro	Gasoil	Gas	Biomasa	Acumulador eléctrico tarifa nocturna	Bomba de calor	Solar/ electricidad/ gasoil	Solar/ gas
Agua caliente (ACS)	78%	72%	83%	80%	83%	45%	19%
Calefacción	70%	62%	46%	53%	56%	57%	46%
Aire acondicionado	47%	47%	47%	47%	47%	47%	47%
Climatización más ACS	69%	61%	52%	56%	58%	56%	45%

Imagen 59 Porcentaje de ahorro económico (Martín, 2011)

Porcentaje de ahorro	Gasoil	Gas	Biomasa	Acumulador eléctrico tarifa nocturna	Bomba de calor	Solar/ electricidad/ gasoil	Solar/ gas
Agua caliente (ACS)	85%	87%	83%	83%	83%	45%	62%
Calefacción	80%	82%	80%	78%	56%	71%	75%
Aire acondicionado	47%	47%	47%	47%	47%	47%	47%
Climatización más ACS	78%	81%	78%	76%	58%	68%	72%

Imagen 60 Porcentaje de ahorro energético (Martín, 2011)

Como se vio al inicio existen diversas configuraciones de bomba de calor dependiendo de la fuente con la que realizan el intercambio de calor. Las BCG tienen las siguientes ventajas por encima de las aire-aire:

- Consumen menos energía para operar.
- Explotan una fuente de energía a temperatura constante. La BC aire-aire depende de la temperatura del aire externo, la cual es baja cuando la demanda de calefacción es alta y alta cuando la demanda de enfriamiento es alta. Por ende, requieren mayor electricidad y son menos eficientes en temporadas de temperatura externa extrema.
- No requieren energía complementaria.
- Usan menos refrigerante.
- Su diseño y mantenimiento son más sencillos.
- No requieren que la unidad esté expuesta al medio.
- El equipo ofrece una mayor vida útil. (Alfonso García Gutiérrez, 2012)

Las BCG además cuentan con una vida útil es de 25 años para la BC propiamente dicha y de 50 años para el circuito de conexión a tierra; porque permiten ahorros de 33 a 75% de energía y reducen la demanda de electricidad, contribuyendo a la seguridad energética nacional; beneficios ambientales porque reducen la emisión de gases de efecto invernadero entre 33 y 75% al usar menos electricidad y evitar el uso de combustibles fósiles. Las BCG constituyen la mejor tecnología disponible para calefacción y aire acondicionado: su potencial impacto ambiental benéfico se ha estimado en que pueden evitar 1.2 billones de toneladas de CO₂ por año, que equivalen a un 6% de la emisión global de CO₂. (Fridleifsson, 2008)

En 2010 los usos directos a nivel mundial de la energía geotérmica ascendieron a 423,830 TJ/año (117,740 GWh/año) de energía y 48,893 MWt de capacidad instalada, y de todos estos usos, las BCG poseen la mayor utilización (47.2%) y capacidad instalada (68.3%). (Alfonso García Gutiérrez, 2012)

Las BCG son hoy en día el sector de la tecnología geotérmica con el mayor crecimiento. Entre 2005 y 2010, su utilización de energía geotérmica creció 2.29 veces a un ritmo anual de 18%, y su capacidad instalada creció 2.15 veces a un ritmo anual 16.6% (Lund, 2010). En 2010, la capacidad instalada mundial mediante BCG fue de 33,134 MWt y el uso anual de energía ascendió a 200,149 TJ/año, con un factor de capacidad de 0.19 en modo calefacción. (Alfonso García Gutiérrez, 2012)

Actualmente existen más de 550 mil unidades de BCG acopladas al subsuelo, 80% de las cuales son unidades domésticas y se instalan más de 66 mil unidades nuevas cada año (Zhai, 2011), se estima que globalmente existen 800 millones de BC instaladas, incluyendo unidades para habitación, enfriadores y bombas de calor para calefacción de espacios y de agua. Globalmente, se contemplan 3.5 billones de unidades instaladas en 2050 en el sector residencial para calefacción, A/C y agua caliente doméstica. (Alfonso García Gutiérrez, 2012)

La Imagen 61 muestra que las bombas de calor geotérmicas (BGC) poseen un mayor COP que las demás configuraciones en las que pueden operar las bombas de calor. Es valioso mencionar que la eficiencia de las bombas de calor recae en diversos factores por ejemplo en las diferencias entre clima, especificaciones técnicas y procedimientos de testeo, pero el más crítico de todos es el aumento o reducción en la temperatura que se esté buscando. Mientras más grande sea este diferencial, más baja su eficiencia. (IEA, 2011)

En este apartado se vio que las BCG poseen en su haber ventajas que no pueden pasar desapercibidas por las personas que requieren la climatización en su hogar, oficina, salón, etc. aún se espera que en un futuro cercano se cumplan algunas de las expectativas que se esperan de estos equipos. Primeramente, se espera que para la reducción de costos e incremento en la confianza y desempeño de las BC exista un aumento en la eficiencia de los componentes desde el intercambiador de calor, pasando por las estrategias de deshielo y hasta llegar a controles inteligentes. Igualmente se espera la mejora en el diseño e instalación de la BC para alcanzar una eficiencia mayor a partir de la estación y en valores ajustables más variados; en el ámbito del control se espera que se desarrollen estrategias de control para adaptar la operación a cargas variables, alarmar acerca de la detección de fallos en la operación y llevar a cabo un diagnóstico y finalmente mejorar la comunicación con los sistemas de energía en las construcciones. Se está buscando que existan sistemas integrados e híbridos dentro de las BC, la característica del primer grupo es que se aproveche con múltiples funciones el producto de la operación de la BC mientras que las BC en funcionamiento híbrido operarían al mismo tiempo dos fuentes de energía para así lograr mejores niveles de rendimiento. (IEA, 2011)

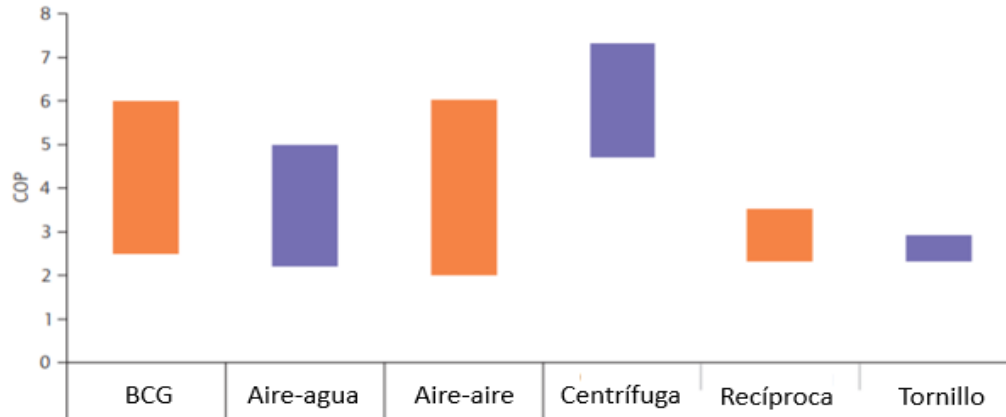


Imagen 61 Eficiencia para las bombas de calor en calefacción y refrigeración separadas por tecnología (IEA, 2011)

En este capítulo se observó que el gremio de las BCG han ido evolucionando con el paso del tiempo trayendo consigo mejoras en su desempeño y reduciendo en impacto que se tiene al medio ambiente, asimismo se menciona que existe una proyección a futuro para mejorar el aprovechamiento de estos equipos, este hecho tiene que despertar el interés en los ingenieros que ya ejercen y en los que apenas están por salir de la carrera a adentrarse en el mundo de la climatización mediante energías alternas pues es un campo que se encuentra en expansión para mejoras y se requiere de mucha investigación de por medio y por ende de mucha ingeniería.

2.4 FUNCIONAMIENTO

Desde un principio de este trabajo se dio a conocer que el ciclo de refrigeración es el responsable de la climatización. La Imagen 62 demuestra el funcionamiento de una BCG teniendo al suelo como fuente de intercambio de calor, del lado izquierdo se puede ver que cuando se requiere enfriar un cuarto el calor que se encuentra dentro de él es tomado por la misma bomba de calor al evaporar el refrigerante en el evaporador mientras que en el condensador se transfiere el calor del refrigerante caliente al agua o una solución de etilenglicol al 30% para realizar la condensación. Una vez que el agua absorbe el calor pasa por el subsuelo donde, al poseer mayor temperatura, libera energía y vuelve a entrar al circuito.

Ahora en el caso contrario, cuando se requiere calentar un espacio (lado derecho de la Imagen 62), el condensador es el que se encuentra dentro del espacio a climatizar pues libera energía para cambiar a estado líquido al refrigerante, por lo que el evaporador es ahora el que tiene contacto con el agua y éste, al requerir calor, extrae energía del agua y ésta a su vez al tener una menor temperatura que el subsuelo, el calor se transfiere al agua para que esta regrese al circuito.

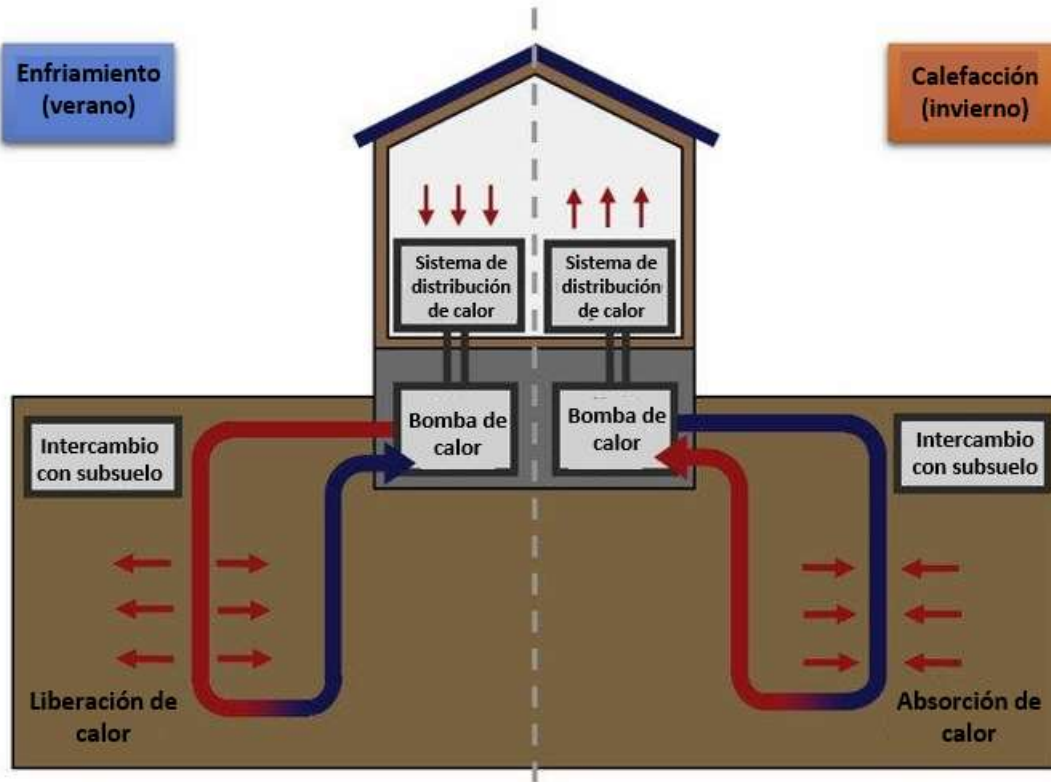


Imagen 62 Funcionamiento de una BCG en refrigeración y calefacción (Marín A. C., 2019)

2.5 ENERGÍA GEOTÉRMICA EN MÉXICO

El aprovechamiento de la energía geotérmica tiene una larga tradición en México. Se estima que un milenio antes de la conquista española muchos asentamientos, principalmente en la parte central del país, se desarrollaron gracias a que había manantiales de agua caliente en su cercanía. Sin embargo, los primeros estudios para utilizar los recursos geotérmicos de México para generar electricidad ocurrieron hasta inicios de la década de los cincuenta.

A fines de 1959 se inauguró en el campo geotérmico de Pathé, Hidalgo, ubicado a unos 300 km al norte de la Ciudad de México, una planta geotermoeléctrica de 3.5 MW de capacidad. Esta fue la primera planta geotermoeléctrica que se instaló en el continente americano y estuvo funcionando parcialmente hasta 1973, cuando fue desmantelada.

En 1958 se realizaron los primeros reconocimientos geológicos en el campo geotérmico de Cerro Prieto donde en abril y octubre de 1973 empezaron a operar las dos primeras unidades de 37.5 MW cada una. Estas unidades, junto con las siguientes dos de la misma capacidad, se encuentran actualmente fuera de operación, después de haber concluido su periodo de vida útil. (CeMIEGeo, 2021)

La importancia de poseer en el país una manera sustentable de sostener la climatización de los hogares es de vital importancia pues, aunque no lo parezca, en diversas regiones las temperaturas este 2021 alcanzaron los 40 °C y descendieron hasta los -10 °C como se muestra la Imagen 63 e Imagen 64.

En nuestro país, se construyen cerca de 225 mil viviendas al año en regiones de clima cálido, a través de desarrolladores de vivienda, en localidades con altas temperaturas en verano (principalmente en el norte del país) o con calor todo el año (como el sur del territorio nacional y zonas costeras). Debido a las necesidades de confort térmico, estas viviendas tienen consumos de electricidad que superan dos y hasta cinco veces a las ubicadas en regiones de clima templado. (ZAFRA, 2018)

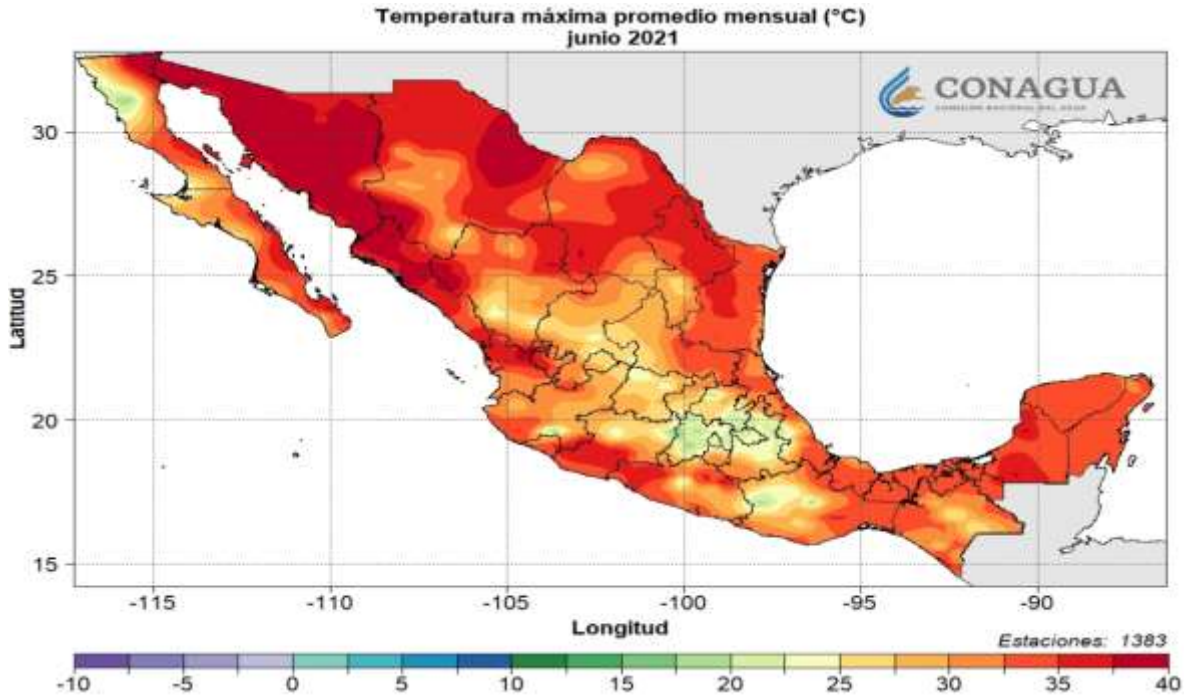


Imagen 63 Temperatura máxima promedio mensual Junio 2021 (SMN, 2021)

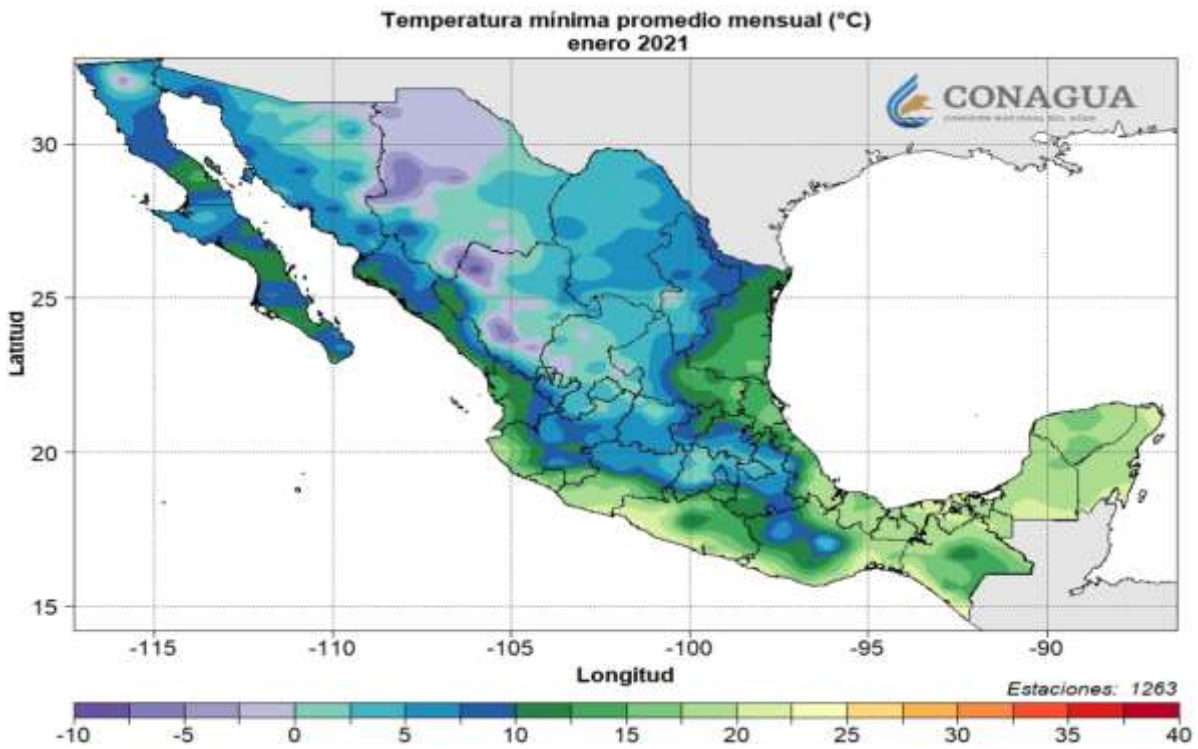


Imagen 64 Temperatura mínima promedio mensual Enero 2021 (SMN, 2021)

Actualmente la energía geotérmica en México se utiliza casi en su totalidad como energía indirecta para producir electricidad, la Imagen 65 demuestra que el país cuenta con una gran cantidad de zonas que tienen potencial geotérmico de alta y baja temperatura; registrándose más de 1300 manifestaciones geotérmicas; sin embargo el uso directo de esta energía en el país sigue limitada a baños y parques recreativos o terapéuticos (reportados en 20 localidades de México). (VELÁZQUEZ, 2020).

La Comisión Federal de Electricidad (CFE) desarrolló algunos de los usos directos de los recursos geotérmicos en el campo de Los Azufres (Michoacán), incluyendo un secador de madera, un deshidratador de frutas y verduras, un invernadero y un sistema para la calefacción de sus oficinas e instalaciones en el campo. Se estima que más de 14,000 toneladas por hora de fluidos geotérmicos en México se utilizan para usos directos, con una capacidad instalada de 156 MW térmicos para fines de planificación y explotación de las aguas termales y de baño. (Gutiérrez-Negrin, 2015)

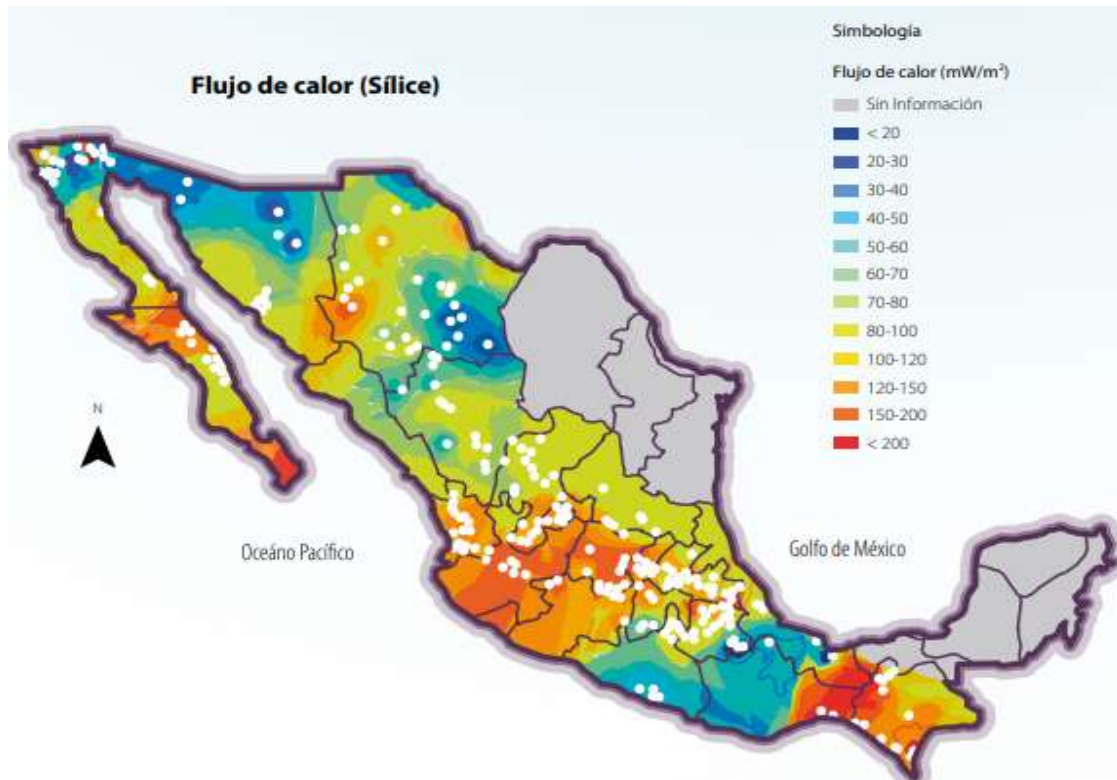


Imagen 65 Mapa de gradiente geotérmico y flujo de calor en la República Mexicana (VELÁZQUEZ, 2020)

Recurriendo nuevamente a la Imagen 65 se observa que el país cuenta con un potencial geotérmico muy grande que debe saber aprovecharse en particular para la implementación y desarrollo de los usos directos como la refrigeración y climatización, en la siguiente tabla (Tabla 4) se hace un resumen de estos usos directos dentro del país.

Tabla 4 Usos directos de la geotermia en México (ZAFRA, 2018)

USO	CAPACIDAD INSTALADA MWt	CONSUMO ANUAL DE ENERGÍA TJ/año	FACTOR DE PLANTA
Calentamiento de espacio individual	0.460	4.397	0.303
Calentamiento de invernaderos	0.004	0.028	0.210
Secado o deshidratación de alimentos	0.007	0.067	0.300
Baño y natación	155.347	4166.512	0.850
TOTAL	155.819	4171.004	1.663

La conclusión de este capítulo es que el país requiere de alternativas para llevar la climatización a todos los hogares en los que realmente el clima es extremo tanto en temperaturas altas como bajas, pues como se observaron en los mapas anteriores, México es un país muy diverso en todo su territorio, incluyendo incluso, el clima y viendo la situación actual por la que todo el planeta está atravesando es mejor llevar a cabo estas medidas tomando en cuenta los recursos geotérmicos que se poseen y así eliminar gradualmente el uso de combustibles que no son amigables con el ambiente.

Los ingenieros apenas egresados o aquellos que aún ejercen tienen la responsabilidad de percatarse que el país cuenta con grandes recursos renovables e inagotables que como profesionistas en el campo de la ingeniería debemos aprovechar, es por ello que se recalca a lo largo de esta tesis que no se debe perder el ímpetu para la investigación y desarrollo de equipos que funcionen a partir de ellos. Igualmente se espera que con esta tesis se pueda convencer a los involucrados en el mundo de la geotermia que el uso directo de esta energía en el país es un hecho que debe tomarse en consideración y con el desarrollo de la BCG hecha en este trabajo se percaten que llevar a cabo estos proyectos es solo cuestión de conocimiento, investigación y paciencia, pero con resultados claramente visibles tanto a mediano como largo plazo.

3. CONCEPTOS BÁSICOS PARA EL DISEÑO DE LA BOMBA DE CALOR GEOTÉRMICA

En este capítulo se dará un breve resumen acerca de los conceptos que tiene que poseer el lector de esta tesis para un entendimiento completo de este trabajo. Se abordan conceptos termodinámicos, de aire acondicionado y transferencia de calor que sirvieron como base para la realización de los cálculos que se presentan en el capítulo siguiente.

3.1 TERMODINÁMICA

La termodinámica se define como la ciencia de la energía, la cual es considerada como la capacidad para causar cambios. (Cengel & Boles, 2011) En otras palabras, es la disciplina que estudia las transformaciones de la energía reversibles e irreversibles en forma de calor y trabajo de los sistemas macroscópicos. (Rochín, 2014)

El enunciado anterior describe a la *Primera ley de la termodinámica* que matemáticamente se expresa:

$$\Delta U = W + Q \text{ (Cengel \& Boles, 2011)}$$

Donde W es el trabajo y Q es el calor, y ambos tienen como unidad los Joules J.

El trabajo es la transferencia de energía relacionada con una fuerza que actúa a lo largo de una distancia (Cengel & Boles, 2011); cuando un sistema sufre una transformación, éste puede provocar cambios en su entorno. Si tales cambios implican el desplazamiento (variación) de las fuerzas que ejerce el entorno sobre la frontera entre el sistema y él, entonces se ha producido un trabajo. (Jaramillo O. , 2007) La expresión matemática que lo define es:

$$W = \int F dl = \int p dV \text{ (Jaramillo O. , 2007)}$$

Donde F es la fuerza, dl es la diferencial de desplazamiento, p es la presión y dV es la diferencial del volumen.

Por otro lado, el calor se define como la forma de energía que se transfiere entre dos sistemas (o entre un sistema y el exterior) debido a una diferencia de temperatura. (Cengel & Boles, 2011) Su fórmula es:

$$Q = mC_p dT \text{ (Cengel \& Boles, 2011)}$$

Donde m es la masa, C_p^{11} es el calor específico y dT es la diferencial de temperatura. La palabra *temperatura* muchas veces se escucha y lee dentro del mundo de la ingeniería; sin embargo, muy pocas veces se sabe realmente su definición concreta; muchos la consideran como la propiedad asociada a la energía interna de las moléculas de una sustancia. Sin embargo, desde el punto de vista termodinámico se tiene que ir hacia el enunciado de la *ley cero de la termodinámica* que dice que todo cuerpo o sustancia posee una propiedad llamada temperatura y así, cuando dos sustancias están en equilibrio térmico entre sí es porque poseen la misma temperatura y si sabemos que están en dicho

¹¹ Representa la cantidad de calor necesaria para elevar en 1 °C la temperatura de 1 kg de una sustancia, por lo tanto, sus unidades en el SI son J/kg K. (Carballo C. A., 2022)

equilibrio, podemos afirmar que poseen el mismo valor de esa propiedad, permitiendo medir de forma indirecta su valor con un instrumento llamado termómetro. (Leal, 2020)

Ahora, cuando se habla acerca de ciclos muchas veces se manejan líneas que pueden ser isotermas (temperatura constante), isocóricas (volumen constante), isoentrópicas (entropía constante) e isobaras (presión constante). Un proceso a presión constante refiere lo siguiente:

$$\text{Si } p = cte \rightarrow \Delta V \neq 0 \rightarrow W \neq 0$$

$$W = -p\Delta V$$

$$\Delta U = Q + W$$

$$\Delta U = Q - p\Delta V$$

$$U_2 - U_1 = Q - p(V_2 - V_1)$$

$$Q = (U_2 + pV_2) - (U_1 + pV_1) \text{ (LICEO, 2022)}$$

A partir de este momento surge una nueva variable que se conoce como *entalpía* y se representa por una letra H. Por lo tanto...

$$H = U + PV$$

$$H_1 = U_1 + pV_1 \quad H_2 = U_2 + pV_2$$

$$Q = H_2 - H_1$$

$$Q = \Delta H \text{ (LICEO, 2022)}$$

En un proceso a presión constante el calor transferido coincide con la variación de entalpía (LICEO, 2022).

La entalpía se define como una variación que expresa una medida de la cantidad de energía absorbida o cedida por un sistema termodinámico, es decir, la cantidad de energía que un sistema puede intercambiar con su entorno. Es una propiedad extensiva¹² y una función de estado¹³ (Martínez, 2016) y cuyas unidades también son de energía, es decir, J o J/kg.

Como se vio con anterioridad la energía se puede transferir hacia o desde un sistema en tres formas: calor, trabajo y flujo másico. Este último se refiere a la cantidad de masa que entra o sale del sistema en un determinado tiempo, esta funciona como un mecanismo adicional de transferencia de energía; cuando entra masa a un sistema la energía de este aumenta debido a que la masa lleva consigo energía. De igual modo cuando una cantidad de masa sale del sistema, la energía de este disminuye porque la masa que sale saca algo de energía consigo. (Cengel & Boles, 2011) De acuerdo a la fórmula de potencia:

$$\dot{W} = \dot{m}W [W] \text{ (Cengel & Boles, 2011)}$$

¹² Una propiedad extensiva es aquella que depende del tamaño o masa del cuerpo.

¹³ Propiedad de un sistema termodinámico que depende sólo del estado del sistema y no de la forma en que el sistema llegó a dicho estado. Las funciones de estado pueden verse como propiedades del sistema.

Se puede despejar el flujo másico:

$$\dot{m} = \frac{\dot{W}}{W} \left[\frac{\frac{kJ}{s}}{\frac{kJ}{kg}} \right]$$

Igualmente se puede despejar de la fórmula del calor:

$$\dot{m} = \frac{\dot{Q}}{c_p \Delta T} \text{ (Cengel \& Boles, 2011)}$$

Otro de los conceptos que más se tienen que tomar en consideración son los procesos y los ciclos. Cualquier cambio de un estado de equilibrio a otro experimentado por un sistema es un proceso y la serie de estados por los que pasa un sistema durante este proceso es la trayectoria del proceso. Para describir un proceso se deben especificar sus estados inicial y final, así como la trayectoria que sigue y las interacciones con los alrededores. Se dice que un sistema ha experimentado un ciclo si regresa a su estado inicial al final del proceso, es decir, para un ciclo los estados inicial y final son idénticos. (Cengel & Boles, 2011) Los ciclos se dividen en reversibles e irreversibles; un reversible es aquel en el que no se produce entropía pues se encuentran en estado de equilibrio, mientras que los irreversibles son procesos en los que el sistema evoluciona de un estado de no equilibrio hacia uno de equilibrio teniendo un aumento en la entropía.

Los ciclos reversibles, a pesar de no existir en la realidad, sirven como puntos de partida en el desarrollo de ciclos reales y se modifican según sea necesario para satisfacer ciertos requerimientos.

El ciclo reversible, por excelencia, es el ciclo de Carnot mostrado en la Imagen 66.

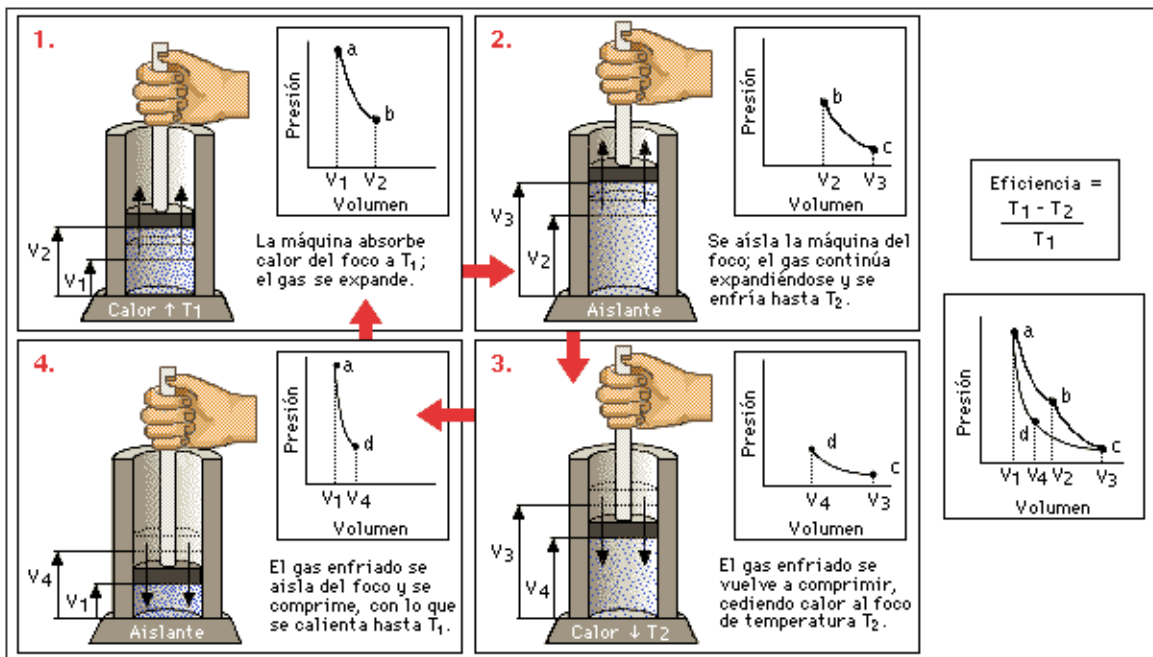


Imagen 66 Ciclo de Carnot (Gutiérrez, 2012)

Donde los pasos que sigue son:

1. Expansión isotérmica reversible.
2. Expansión adiabática reversible.
3. Compresión isotérmica reversible.
4. Compresión adiabática reversible.

Ahora, existe algo llamado máquina de Carnot que puede ser motor o frigorífico, el cual ofrece la base para comprender a los ciclos que forman diferentes fluidos de trabajo.

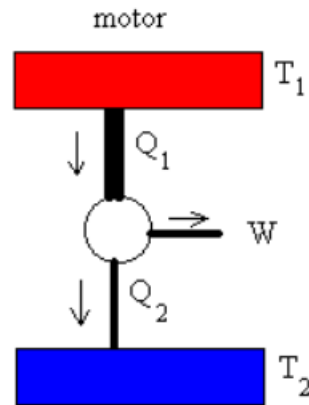


Imagen 67 Motor de Carnot (García Á. F., 2010)

La Imagen 67 muestra un motor de Carnot, el cual, es un dispositivo ideal que describe un ciclo de Carnot. Trabaja entre dos focos, tomando calor Q_1 del foco caliente a la temperatura T_1 , produciendo un trabajo W , y cediendo un calor Q_2 al foco frío a la temperatura T_2 . (García Á. F., 2010)

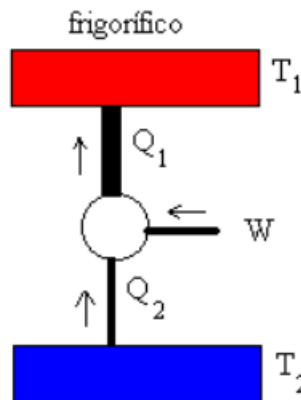


Imagen 68 Frigorífico de Carnot (García Á. F., 2010)

Al ser un ciclo reversible, podemos invertir los procesos. La Imagen 68 enseña una máquina de Carnot que funciona en sentido inverso, se extraería calor Q_2 del foco frío aplicando un trabajo W , y cedería Q_1 al foco caliente. (García Á. F., 2010) Este ciclo sienta las bases para el de refrigeración que se utiliza en una BC. Sin embargo, el ciclo de refrigeración no es un ciclo internamente reversible puesto que incluye un proceso irreversible, el estrangulamiento por la válvula de expansión. (Cengel & Boles, 2011)

3.2 TRANSFERENCIA DE CALOR

Otros de los antecedentes que se debe poseer para entender en su totalidad esta tesis son los principios de la transferencia de calor para comprender la transformación, mejor dicho, los cambios de fase que el refrigerante tiene al pasar por las tuberías y los equipos al interior de la BCG.

Lo primero que hay que tener en consideración es la segunda ley de la termodinámica (Yunus A. Cengel, 2011), que dice que *el calor siempre fluye desde el cuerpo con mayor temperatura hacia el de menor temperatura*. Este hecho funciona al considerar el ciclo del refrigerante pues: en el evaporador, el aire cede calor al refrigerante y este se evapora, mientras que en el condensador el refrigerante cede calor al aire y se condensa.

Existen tres mecanismos de transferencia de calor: *conducción, convección y radiación*.

3.2.1 CONDUCCIÓN

La conducción es el resultado de interacciones moleculares, las moléculas de un objeto que está a una temperatura más alta vibran con mayor rapidez, estas chocan contra las moléculas menos energéticas situadas en la parte de menor temperatura. Como resultado del choque las moléculas que se mueven a mayor velocidad transfieren una parte de su energía a las que se mueven más despacio. (Carballo C. A., 2022) La conducción puede tener lugar en sólidos, líquidos o gases; en los últimos dos estados la conducción se debe a las colisiones y difusión de las moléculas durante su movimiento aleatorio, mientras que en los sólidos se debe a la combinación de las vibraciones de las moléculas en una retícula y al transporte de energía por parte de los electrones libres. (Yunus A. Cengel, 2011) La Imagen 69 muestra el flujo de calor de una zona de mayor temperatura a una de menor temperatura.

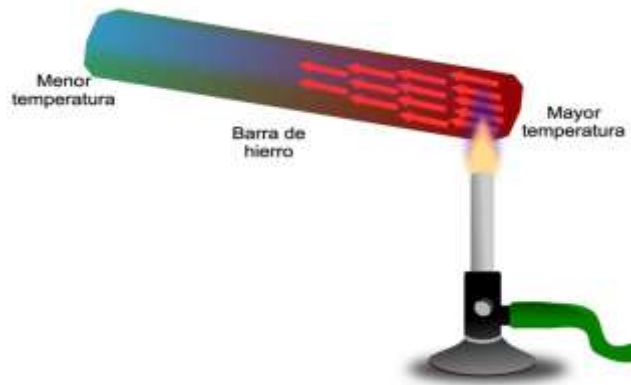


Imagen 69 Transferencia de calor por conducción (Materia, 2021)

La razón matemática que describe a este tipo de transferencia de calor es la **Ley de Fourier de la conducción de calor**, ésta, dicta que la razón de la conducción de calor a través de una capa plana es proporcional a la diferencia de temperatura a través de esta y al área de transferencia de calor, pero es inversamente proporcional al espesor de esa capa (Yunus A. Cengel, 2011), y cuya expresión matemática es:

$$\dot{Q}_{cond} = kA \frac{T_1 - T_2}{\Delta x} = -kA \frac{\Delta T}{\Delta x} [W] . \text{ (Yunus A. Cengel, 2011)}$$

Donde k es la conductividad térmica del material y es la capacidad de un material para conducir calor. (Yunus A. Cengel, 2011), sus unidades son W/m k.

El calor es conducido en la dirección de la temperatura decreciente y el gradiente de temperatura $\left(\frac{dT}{dx}\right)$ se vuelve negativo cuando esta última decrece al crecer x , es por ello que el signo negativo garantiza que la transferencia de calor en la dirección x positiva sea una cantidad positiva; se debe especificar que el área de transferencia de calor, A , siempre es normal a la dirección de esa transferencia.

3.2.2 CONVECCIÓN

El segundo tipo de transferencia de calor es por convección el cual es una transferencia de energía entre una superficie sólida y el líquido o gas adyacente que está en movimiento. Entre más rápido es el movimiento de un fluido, mayor es la transferencia de calor por convección. En ausencia de cualquier movimiento masivo de fluido, la transferencia de calor entre una superficie sólida y el fluido adyacente es por conducción pura. La convección recibe el nombre de convección forzada si el fluido es forzado a fluir sobre la superficie mediante medios externos como un ventilador, una bomba o el viento. Como contraste, se dice que es convección natural (o libre) si el movimiento del fluido es causado por las fuerzas de empuje que son inducidas por las diferencias de densidad debidas a la variación de la temperatura en ese fluido (Yunus A. Cengel, 2011), las moléculas frías descienden mientras que las que tienen mayor temperatura ascienden. La Imagen 70, muestra la transferencia de calor por convección forzada haciendo uso de un equipo externo que mueva el aire mientras que en la convección natural solo es por diferencia de densidades.

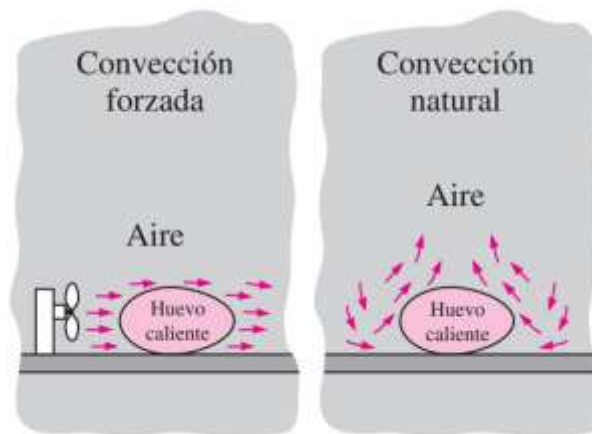


Imagen 70 Transferencia de calor por convección (Yunus A. Cengel, 2011)

La ley que matemáticamente describe a este tipo de transferencia de calor es la **Ley de Newton del enfriamiento**, la cual estipula que la rapidez de la transferencia de calor por convección es proporcional a la diferencia de temperatura, es decir:

$$\dot{Q}_{conv} = hA_s(T_s - T_\infty) \text{ [W]} \text{ (Yunus A. Cengel, 2011)}$$

Donde h es el coeficiente de transferencia de calor por convección (cuyo valor no es propiedad del fluido sino es un parámetro que se determina de forma experimental y es dependiente

de la geometría de la superficie, el movimiento del fluido, sus propiedades y velocidad masiva) sus unidades son $\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$ o $\frac{Btu}{h \cdot m^2 \cdot ^\circ C}$, A_s el área superficial donde es la transferencia por convección, T_s es la temperatura de la superficie y T_∞ la del fluido suficientemente alejado de esta superficie. (Yunus A. Cengel, 2011)

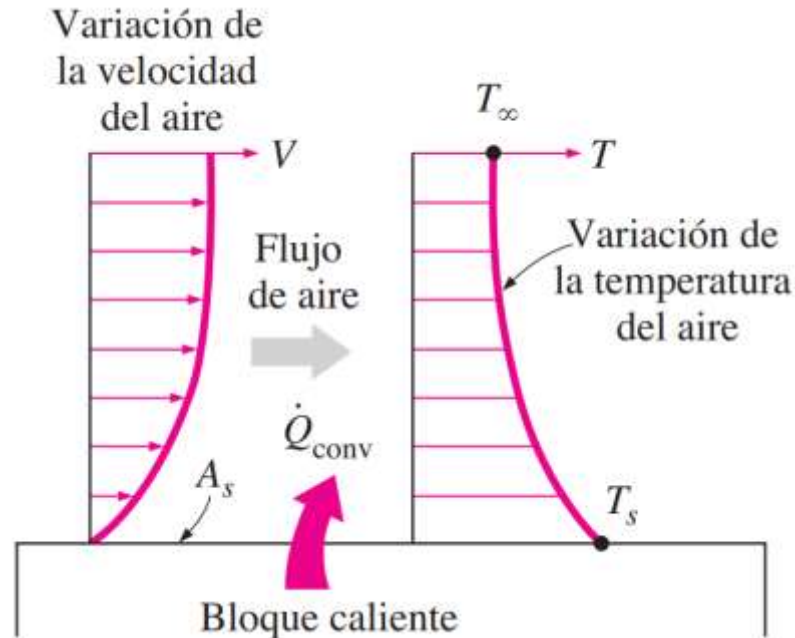


Imagen 71 Transferencia de calor de una superficie caliente al aire (Yunus A. Cengel, 2011)

3.2.3 RADIACIÓN

El último tipo de transferencia de calor es por radiación, esta se entiende como la energía emitida por la materia en forma de ondas electromagnéticas (o fotones) como resultado de los cambios en las configuraciones electrónicas de los átomos o moléculas. A diferencia de la conducción y la convección, la transferencia de calor por radiación no requiere la presencia de un medio interventor. (Yunus A. Cengel, 2011)

La radiación es un fenómeno volumétrico y todos los sólidos, líquidos y gases emiten, absorben o transmiten radiación en diversos grados. Sin embargo, la radiación suele considerarse como un fenómeno superficial para los sólidos que son opacos a la radiación térmica, como los metales, la madera y las rocas, ya que las radiaciones emitidas por las regiones interiores de un material de ese tipo nunca pueden llegar a la superficie, y la radiación incidente sobre esos cuerpos suele absorberse en unas cuantas micras hacia adentro de dichos sólidos. (Yunus A. Cengel, 2011)

La **ley de Stefan-Boltzmann** expresa la razón máxima de la radiación de una superficie a cierta temperatura (T_s [K] o [R]), matemáticamente esta razón es:

$$\dot{Q}_{emitida,max} = \sigma A_s T_s^4 [W] \text{ (Yunus A. Cengel, 2011)}$$

σ es la constante de Stefan-Boltzmann y su valor es $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} W/m^2 K^4 = 0.1714 \times 10^{-8} Btu/h ft^2 R^4$; el **cuerpo negro** es la superficie idealizada que emite radiación a esta razón máxima, mientras que la fórmula que incluye a todas las superficies es:

$$\dot{Q}_{emitida,max} = \varepsilon \sigma A_s T_s^4 [W]$$

Donde ε es la emisividad y se define como la medida de cuán próxima está una superficie a ser un cuerpo negro, sus valores rondan entre el 0 y 1. La **ley de Kirchoff** afirma que la emisividad y la absorptividad¹⁴ de una superficie a una temperatura y longitud de onda dadas son iguales. Las temperaturas de la superficie y de la fuente de radiación incidente son del mismo orden de magnitud, y la absorptividad promedio de una superficie se considera igual a su emisividad promedio. (Yunus A. Cengel, 2011)

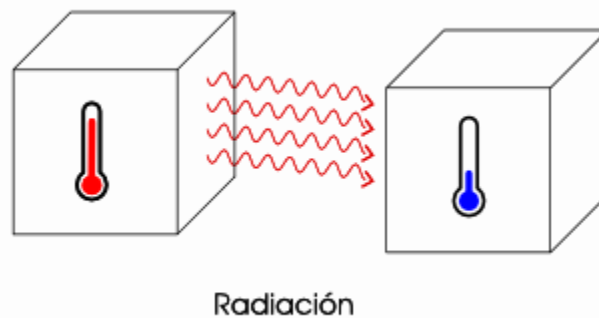


Imagen 72 Transferencia de calor por radiación (Life, 2022)

Para mejor comprensión de este fenómeno a continuación se presentan los siguientes diagramas que muestran la transferencia de calor por radiación tomando en consideración una superficie opaca (donde la radiación incidente no es absorbida por la superficie se refleja) y la interacción de la superficie con aquellas que la circundan. Dentro de estas ilustraciones se especifican las fórmulas que se emplean.

¹⁴ Su símbolo es α e igual que la emisividad sus valores son $0 \leq \alpha \leq 1$ y es la fracción de la energía de radiación incidente sobre una superficie que es absorbida por ésta. (Yunus A. Cengel, 2011)

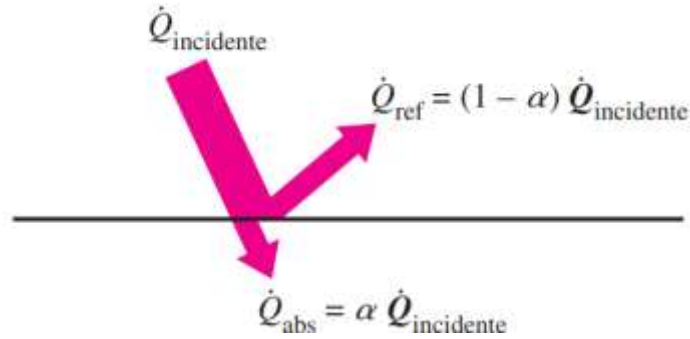


Imagen 73 Absorción y reflejo de la radiación por una superficie opaca (Yunus A. Cengel, 2011)

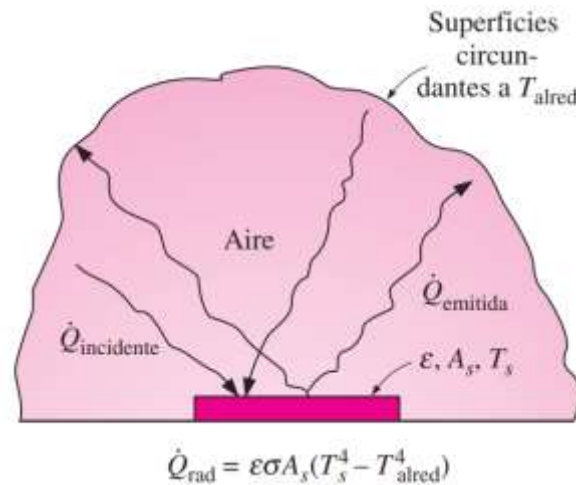


Imagen 74 Radiación entre superficie y superficies circundantes (Yunus A. Cengel, 2011)

Estos tres principios físicos de transferencia de calor son las bases para realizar el diseño de intercambiadores de calor, los cuales son los responsables de realizar cambios de temperatura entre fluidos y objetos. Estos se dividen de la siguiente manera:

- Arreglo del flujo
 - Flujo paralelo: fluido caliente y frío en la misma dirección.
 - Contraflujo: cuando el fluido caliente y frío van en sentido contrario.

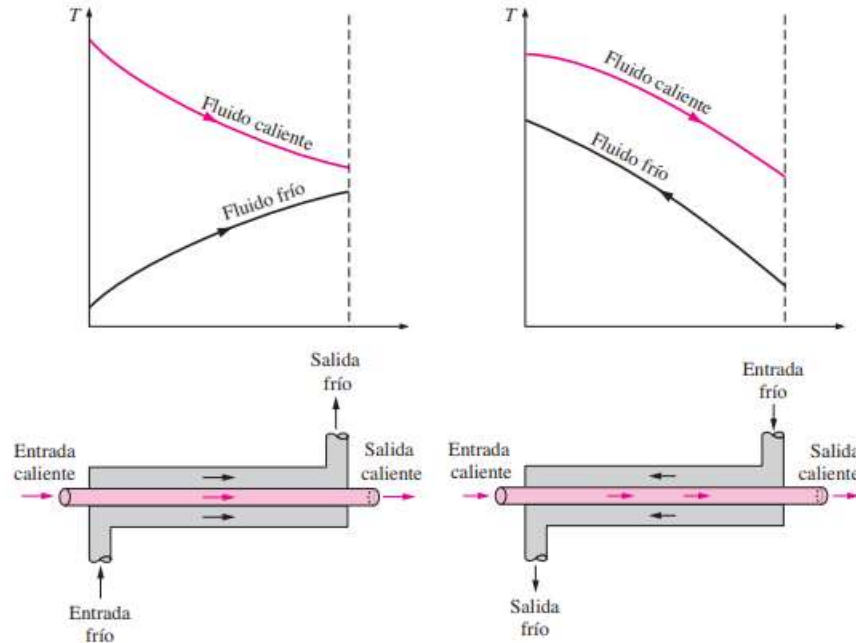


Imagen 75 Sentido de los fluidos en paralelo y contraflujo (Yunus A. Cengel, 2011)

Las gráficas que se muestra en la Imagen 75 demuestran que los intercambiadores que están en configuración de contraflujo tienen una delta de temperatura (entre el fluido caliente y el fluido frío) más estable a lo largo del proceso, aumentando así, la eficacia. (industrial, 2020)

- **Construcción**

El arreglo de tubo y coraza que se mostró en el apartado 1.2.2 **CONDENSADOR** es la configuración más básica dentro de la clasificación por manufactura de los intercambiadores de calor. Otro de los factores que influyen en la transferencia es el aumento del área de transferencia de calor; esta expansión de área se hace por medio de *aletas*. Estos son sólidos que transfieren energía por conducción a lo largo de su geometría y por convección y/o radiación entre sus límites y los alrededores (UNEFM, 2022).

A su vez, las aletas se dividen según su forma y su aplicación. Se dividen en:

- 1.- Longitudinal: Superficies adicionales unidas a paredes planas o cilíndricas.
- 2.- Radiales: Unidas coaxialmente a superficies cilíndricas.
- 3.- Aguja: Superficie extendida en forma cónica o cilíndrica.

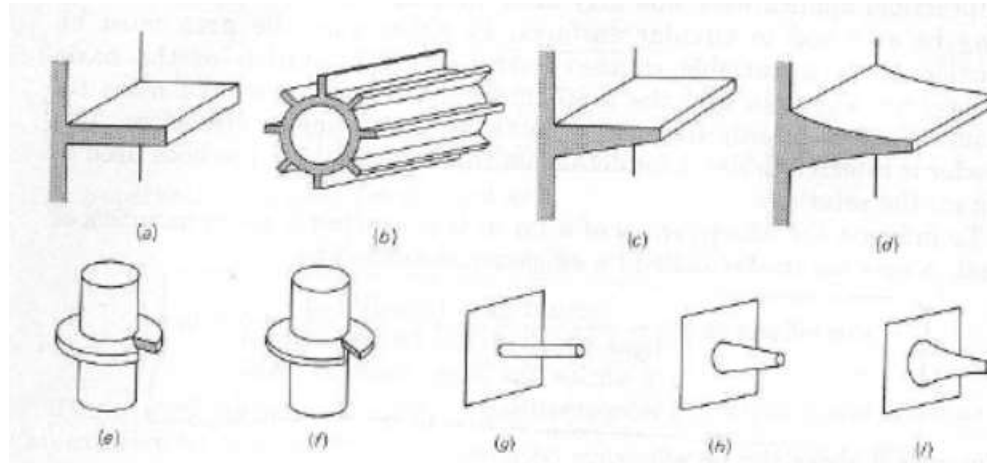


Imagen 76 Tipos de aletas. (a), (b), (c) y (d) longitudinal; (e) y (f) radial; (g), (h), (i) aguja (Zambrano, 2019)

Si es necesario tener una mayor superficie de transferencia de calor, se utilizan intercambiadores compactos que son arreglos de una superficie con las configuraciones de aletas mencionadas con anterioridad. Este aumento en área ayuda al incremento del coeficiente global de intercambio de calor (Marín G. , 2018). Una de las características de estos intercambiadores es que los dos fluidos se mueven de manera perpendicular entre sí y a esta configuración se le llama **flujo cruzado**. Este tipo a su vez se clasifica en flujo no mezclado o mezclado; el *no mezclado* sucede cuando las aletas de placa fuerzan al fluido a moverse por un espaciamiento particular entre ellas e impiden su desplazamiento de forma paralela a los tubos, mientras que en la configuración *mezclado* el fluido tiene la libertad para moverse en la dirección transversal (paralelo a los tubos) (Yunus A. Cengel, 2011). La siguiente imagen (Imagen 77) es una representación gráfica sobre lo que se mencionó anteriormente; en el caso del evaporador de la BCG 3 TR, éste es un intercambiador de flujo cruzado en donde los dos fluidos son no mezclados.

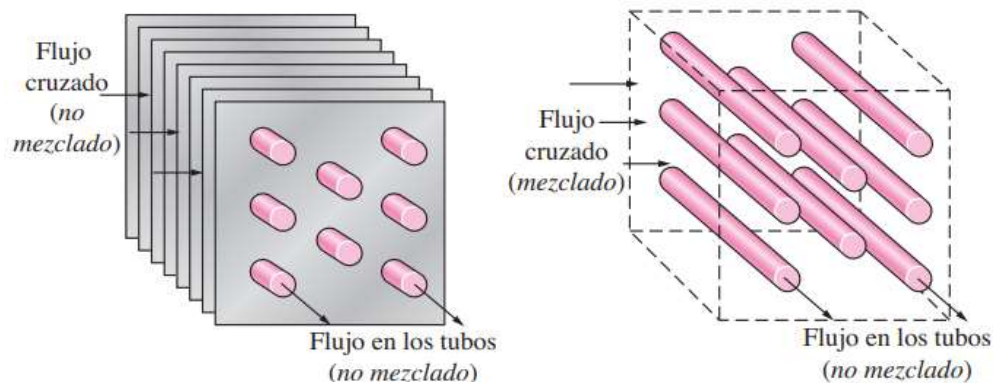


Imagen 77 Configuraciones de flujo en intercambiadores de flujo cruzado (Yunus A. Cengel, 2011)

La ecuación de conducción es un cimiento fuerte dentro del diseño de intercambiadores de calor; sin embargo, se usan casos específicos de esta ecuación considerando la conducción en varias superficies continuas y tubos concéntricos.

Para empezar con el diseño de los intercambiadores de calor se debe iniciar por comprender la conducción en paredes compuestas.

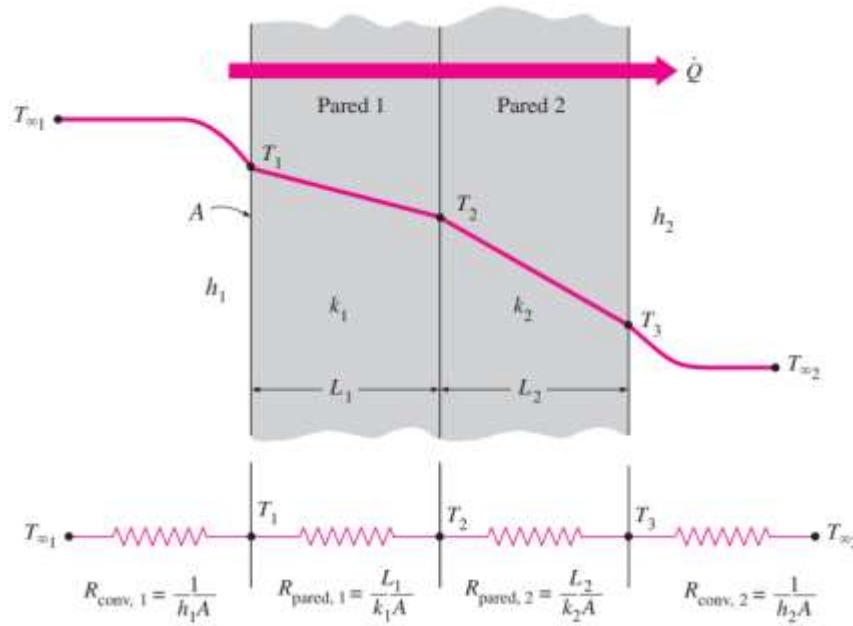


Imagen 78 Resistencias térmicas en la transferencia de calor de dos fluidos con diferente temperatura (Yunus A. Cengel, 2011)

La razón de transferencia de calor se establece como lo explica la siguiente ecuación.

$$q = \frac{\Delta T}{R_{total}} = \frac{T_{\infty 1} - T_{\infty 2}}{\frac{1}{h_1 A} + \frac{L_1}{k_1 A} + \frac{L_2}{k_2 A} + \frac{1}{h_2 A}} \quad (\text{Yunus A. Cengel, 2011})$$

Esta expresión matemática se le conoce como la *Ley de Fourier para paredes compuestas*; donde ΔT es la diferencia de temperatura entre los fluidos, h es el coeficiente convectivo, L son el espesor de la pared, k es la conductividad térmica y A es el área transversal.

En el caso de la resistencia térmica en una pared cilíndrica, el calor se transfiere a través de la pared de material K , por un área transversal A (que depende del radio interior y exterior), a lo largo de L , con transferencia por parte de la convección realizada en los fluidos frío y caliente, por lo que la transferencia resulta de ambos fenómenos (Rodríguez, 2021).

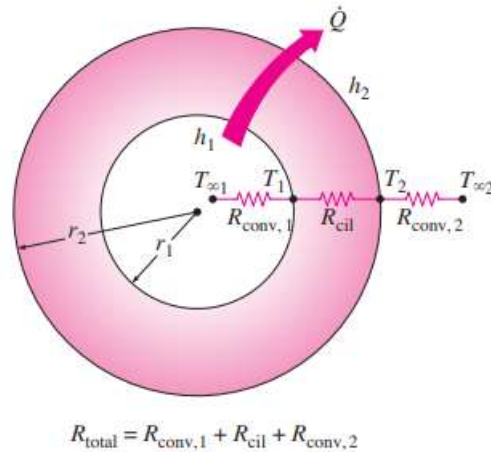


Imagen 79 Resistencias térmicas para una capa cilíndrica (o esférica) sujeta a convección en el interior o exterior (Yunus A. Cengel, 2011)

La fórmula que describe este fenómeno de transferencia de energía es:

$$q = \frac{\Delta T}{R_{total}} = \frac{T_{\infty 1} - T_{\infty 2}}{\frac{1}{2\pi r_1 L h_1} + \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi L k} + \frac{1}{2\pi r_2 L h_2}} \quad (\text{Yunus A. Cengel, 2011})$$

Asimismo, al igual que en una razón de transferencia de paredes múltiples se puede hacer lo mismo para un cilindro.

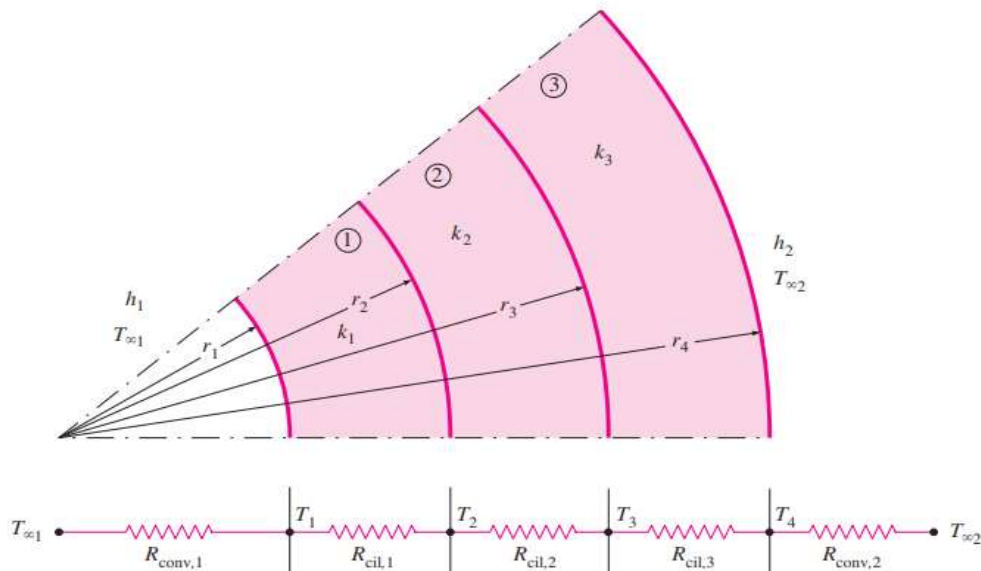


Imagen 80 Transferencia de calor a través de un cilindro compuesto (Yunus A. Cengel, 2011)

3.3 AIRE ACONDICIONADO (CARTA PSICROMÉTRICA)

El acondicionamiento del aire es controlar su temperatura, humedad, distribución y pureza; su objetivo es procurar la comodidad de los ocupantes de residencias, teatros, escuelas, etc. o mantener muy bajas temperaturas para evitar contaminación en productos alimenticios, productos químicos etc. (GORIBAR, 1999) La Tabla 5 muestra que el aire está compuesto por una mezcla de gases como nitrógeno, oxígeno y argón.

Tabla 5 Composición del aire seco (GORIBAR, 1999)

ELEMENTO	VOLUMEN EN %	PESO EN %
Nitrógeno	78.1	76
Oxígeno	20.9	23.1
Argón	1	0.9

Sin embargo, ya considerando una composición más detallada del aire, se puede elaborar una tabla como la que se muestra a continuación:

Tabla 6 Composición del aire atmosférico (GORIBAR, 1999)

GASES %	NITRÓGENO	78.03
	OXÍGENO	20.99
	ARGÓN	0.94
	BIÓXIDO DE CARBONO	0.03
	HIDRÓGENO, XENÓN, KRIPTÓN, ETC.	0.01
IMPUREZAS	HUMOS DE SULFUROS HUMOS DE ÁCIDOS CO_2 POLVO CENIZAS MINERALES VEGETALES ANIMALES MICROORGANISMOS	

Una de las ramas más importantes del aire acondicionado es la psicrometría, ésta se define como la medición de humedad del aire o es la ciencia que involucra las propiedades termodinámicas del aire húmedo y la humedad atmosférica sobre los materiales y el confort humano. (CLEMENTE, 2017) Asimismo, la psicrometría trata al aire como mezcla de dos gases que no reaccionan entre sí y se comportan como gases ideales: aire seco y vapor de agua. (INAC, 2022)

Estas propiedades termodinámicas se plasman en la *carta psicrométrica*, la cual es la representación gráfica de las propiedades de la mezcla de aire seco y vapor de agua que constituyen el aire húmedo (atmosférico) (CLEMENTE, 2017) y que se muestra en la página siguiente:

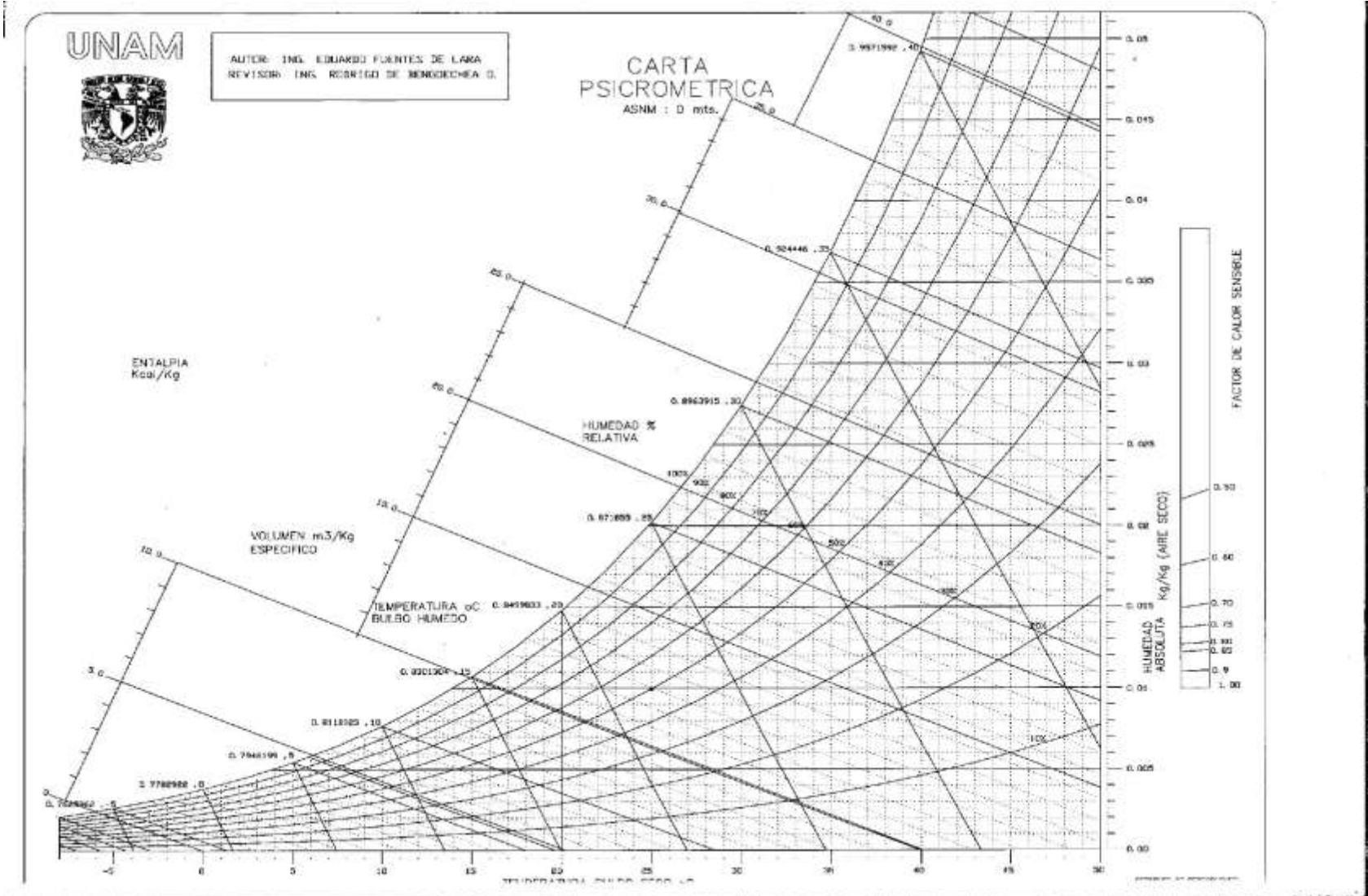


Imagen 81 Carta psicrométrica (Rodrigo de Bengoechea)

Dentro de la carta psicrométrica se encuentran las propiedades con las que se puede describir al aire, así como los procedimientos que se requieren para poder acondicionarlo. Al momento de querer hacer uso de la carta solo se requieren dos propiedades para obtener un resultado; las propiedades son:

1. Temperatura de bulbo seco (Tbs).
2. Temperatura de bulbo húmedo (Tbh).
3. Temperatura de rocío (Tw).
4. Humedad relativa (hr).
5. Humedad absoluta (H).
6. Entalpía (h).
7. Volumen específico (Ve).

3.3.1 TEMPERATURA DE BULBO SECO

Esta temperatura es la que se toma con un termómetro cualquiera; su escala se encuentra en el eje de las abscisas de la carta y los valores de esta temperatura se extienden de manera constante en las líneas rectas verticales manteniendo el valor de esta temperatura a lo largo de esta línea. La Imagen 82 muestra la localización de estas líneas de temperatura de bulbo seco en la carta psicrométrica.

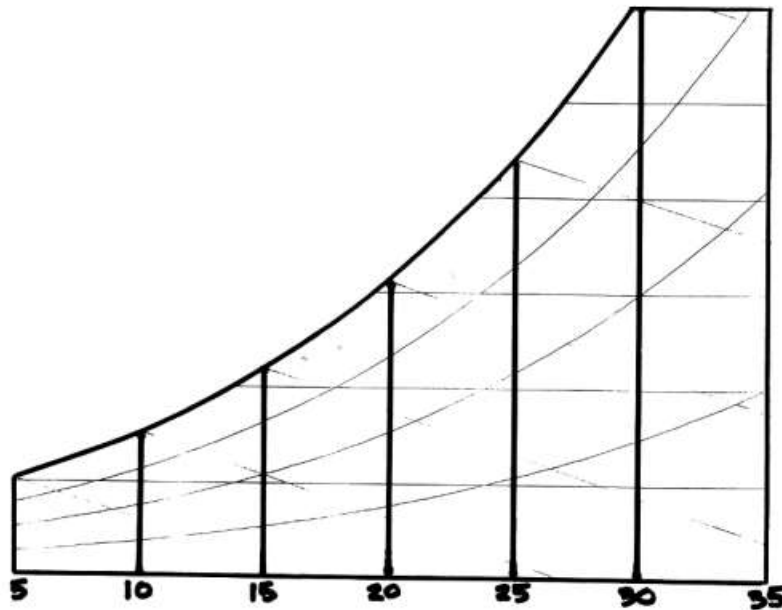


Imagen 82 Temperatura de bulbo seco (INAC, 2022)

3.3.2 TEMPERATURA DE BULBO HÚMEDO

Indica la cantidad de calor total en el aire, ésta se determina cubriendo el bulbo de un termómetro con franela o con un trapo húmedo y haciendo pasar aire rápidamente haciendo que la humedad comience a evaporarse y así registrar esta temperatura como la de bulbo húmedo. (GORIBAR, 1999)

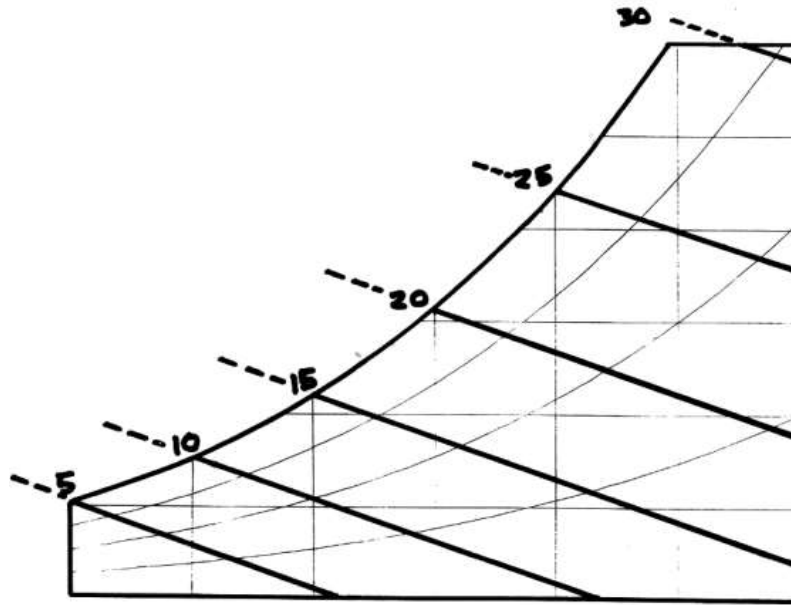


Imagen 83 Temperatura de bulbo húmedo (INAC, 2022)

3.3.3 TEMPERATURA DE ROCÍO

Es la temperatura a la cual el vapor de agua en el aire se comienza a condensar si se enfría el aire a presión constante. (CLEMENTE, 2017) Esta temperatura comparte la escala junto con la temperatura de bulbo seco, exceptuando que la de rocío es una línea horizontal como lo muestra la Imagen 84.

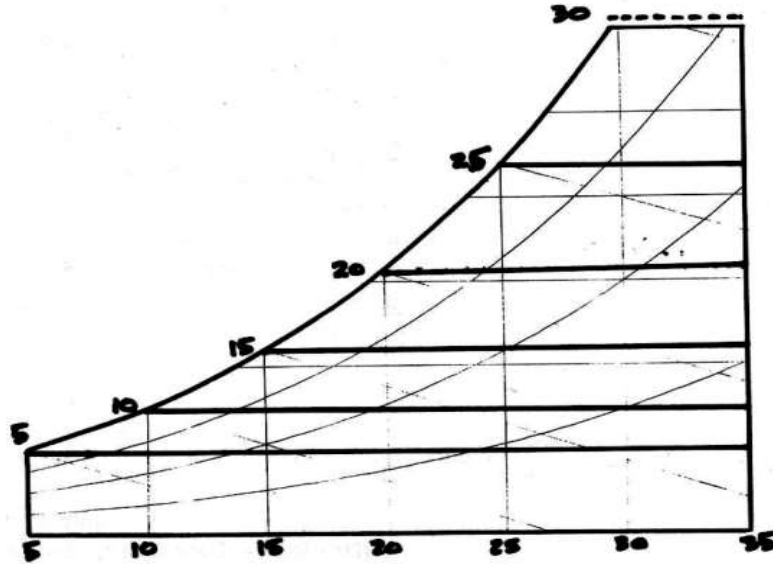


Imagen 84 Temperatura de rocío (INAC, 2022)

3.3.4 HUMEDAD RELATIVA

Es la relación de presión real de vapor de agua en el aire con la presión de vapor de agua, si el aire estuviera saturado a la misma temperatura de bulbo seco y esta propiedad siempre se expresa en porcentaje. La línea de 100% de humedad relativa, es la misma que la escala de temperaturas de bulbo húmedo y de punto de rocío. (CLEMENTE, 2017)

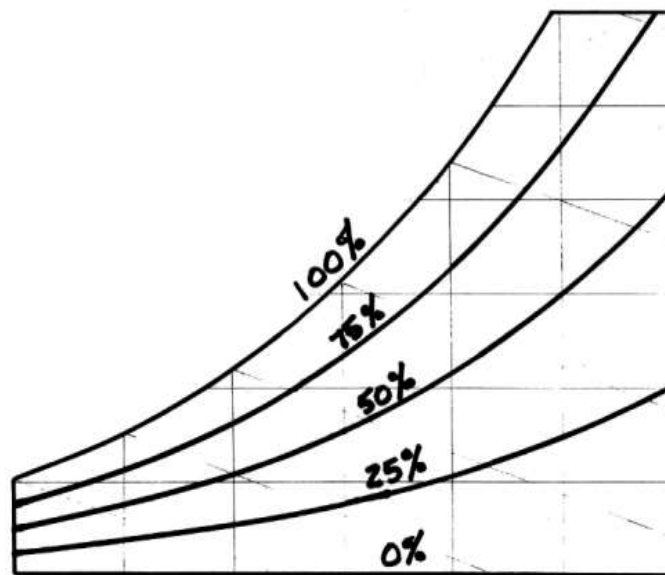


Imagen 85 Humedad relativa (INAC, 2022)

3.3.5 HUMEDAD ABSOLUTA

Es el peso real de vapor de agua en el aire. La escala de la humedad específica o absoluta, es la escala vertical (ordenada) que se encuentra al lado derecho de la carta psicrométrica. Las líneas de humedad absoluta, corren horizontalmente de derecha a izquierda, y son paralelas a las líneas de punto de rocío y coinciden con éstas. Así pues, podemos ver que la cantidad de humedad en el aire, depende del punto de rocío del aire. (CLEMENTE, 2017)

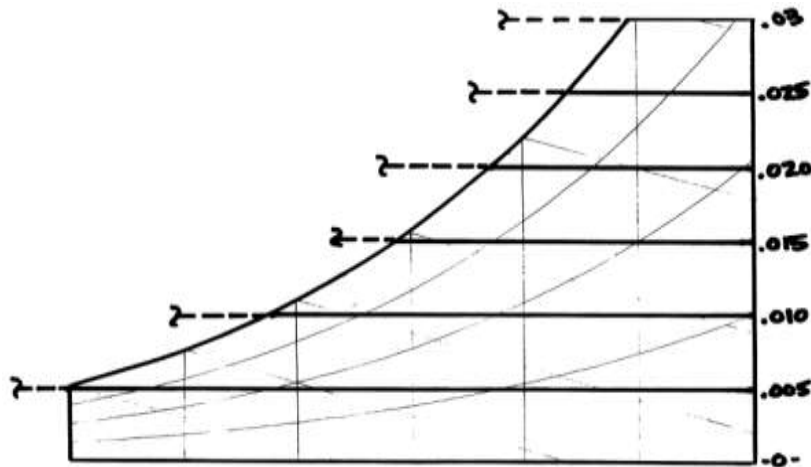


Imagen 86 Humedad absoluta (INAC, 2022)

3.3.6 ENTALPÍA

Contenido de calor del aire por unidad de peso. Estas líneas, son meramente extensiones de las líneas de bulbo húmedo puesto que el calor total del aire, depende de la temperatura de bulbo húmedo. (CLEMENTE, 2017)

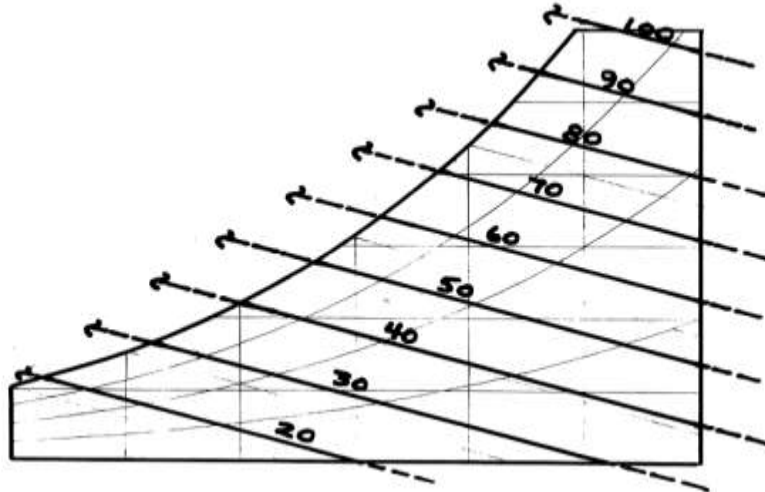


Imagen 87 Entalpía dentro de la carta psicrométrica

3.3.7 VOLUMEN ESPECÍFICO

El volumen específico es el recíproco del peso específico (GORIBAR, 1999), es decir:

$$v = \frac{1}{W}$$

Y dentro de la carta psicrométrica se representa de la siguiente manera:

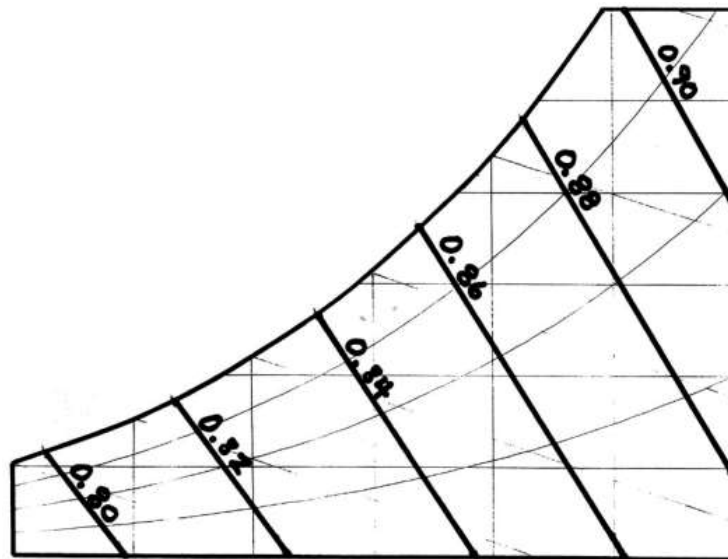


Imagen 88 Volumen específico dentro de la carta psicrométrica (INAC, 2022)

Ya que se tiene un panorama más amplio de la carta psicrométrica, sus valores e interpretación, se especificará los procesos que se tienen que seguir para alcanzar la humedad y la temperatura de confort para que las personas que se encuentren dentro del recinto a acondicionar no

se sientan con ninguna incomodidad debido al aire que ingresa. Los procesos que se siguen para llegar a esta temperatura y humedad se llaman procesos psicrométricos.

La Imagen 89 muestra los procesos psicrométricos más conocidos dentro de la industria del acondicionamiento del aire, estos, se describen con mayor detalle a continuación:

- *Humidificación:* Proceso mediante el cual se aumenta la humedad específica y la cantidad de calor en el aire. En algunos procesos la humedad específica se aumenta agregando agua, que se absorbe en forma de vapor.
- *Calentamiento y Humidificación:* El aire pasa a través de un humidificador. Durante este proceso el aire incrementa su humedad específica y su entalpía y la temperatura de bulbo seco aumenta o disminuye según la temperatura inicial del aire y del agua.
- *Calentamiento:* Dicho proceso actuará en la dirección del aumento de temperatura de bulbo seco siguiendo una línea de humedad específica constante en la carta psicrométrica la cual aparece como una línea horizontal. La humedad relativa del aire disminuye.
- *Calentamiento y Deshumidificación:* Este proceso se puede realizar pasando el aire por un absorbente sólido o a través de un líquido absorbente. En ambos casos el absorbente tendrá una presión de agua menor a la del aire. La humedad se condensa fuera del aire, en consecuencia, el calor latente se libera y aumenta el calor sensible del aire.
- *Deshumidificación:* La humedad puede removerse por absorción en líquidos o en sólidos o enfriamientos por debajo del punto de rocío. Los cambios de entalpía para este proceso no producen cambios de calor sensible, teniéndose solamente cambio de calor latente.
- *Enfriamiento y Deshumidificación:* Si el aire pasa a través de un rociador de agua o a través de una superficie cuya temperatura sea menor que el punto de rocío del aire, se condensará parte de la humedad del aire y la mezcla se enfriará simultáneamente.
- *Enfriamiento:* El aire baja su temperatura en este proceso. La temperatura de bulbo seco de la superficie tiene un valor menor que la temperatura de rocío. Por lo tanto, la humedad específica se mantiene constante y no llegará a la condensación.
- *Enfriamiento y Humidificación:* Siempre que el aire saturado pasa a través de un aspersor de agua, la humedad específica aumenta y la temperatura de bulbo seco baja. Esto constituye el proceso de saturación adiabática que es un proceso a bulbo húmedo y entalpía constante. También puede suceder que el agua esté a una temperatura menor que a la de bulbo húmedo pero mayor que la del punto de rocío entonces el proceso enfría y humidifica simultáneamente (CLEMENTE, 2017).

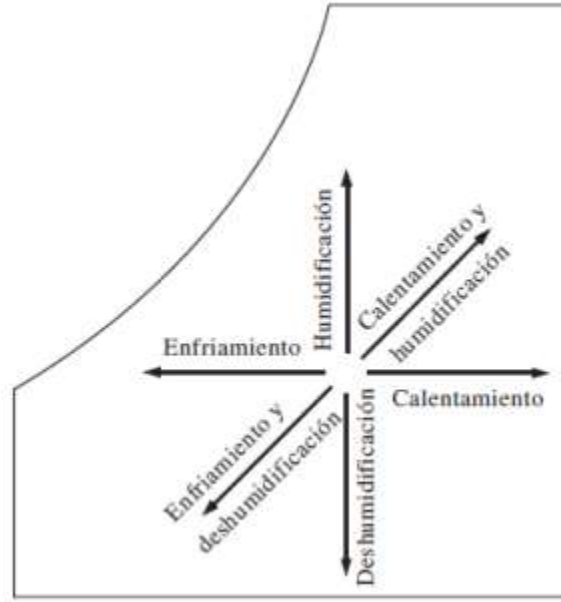


Imagen 89 Procesos básicos para el acondicionamiento del aire (MONTAÑA, 2017)

Después de esta breve introducción hacia los antecedentes que se deben de tener para la comprensión de esta tesis, el capítulo siguiente es acerca del proceso de diseño de la bomba de calor geotérmica de 3 TR desde el desarrollo del ciclo de refrigeración hasta el diseño en CAD de dicho equipo.

4. DISEÑO DE LA BOMBA DE CALOR GEOTÉRMICA

Después de que en los capítulos anteriores se ha puesto en contexto al lector acerca de los antecedentes que se deben conocer para entender en su totalidad el trabajo presentado se dará paso a redactar el proceso que se llevó a cabo para el diseño de la BCG dentro de los laboratorios de grupo IDEEA, desde el cálculo ideal y real del ciclo de refrigeración junto con las consideraciones correspondientes para llevarlo a cabo, información del lugar de instalación en el que se pretende colocar la BCG, el proceso de selección de los equipos que integran a la bomba y los CAD de la BCG en conjunto del programa de ensamble para facilitar la manufactura del equipo.

4.1 POTENCIA DE LA BOMBA DE CALOR

La potencia que se busca conseguir con la construcción de esta bomba de calor geotérmica es de tres toneladas de refrigeración (**3 TR¹⁵**) siendo esto **36,000 BTU/h** y en unidades del sistema internacional **10.5 kW**. Cabe mencionar que una tonelada de refrigeración se define como el efecto de refrigeración igual a la fusión de una tonelada de hielo en 24 h (HERNÁNDEZ, 2005) o, de igual manera, se considera como la proporción del intercambio de calor de 12,000 BTU/h, 200 BTU/min o 3,024 kcal/h (BOHN, 2005).

4.2 CARACTERÍSTICAS DEL LUGAR DE INSTALACIÓN (COMPOSTELA, NAYARIT)

El sitio en el que se llevará a cabo la instalación de esta BCG 3 TR será en el estado de Nayarit específicamente en el municipio de Compostela. La Imagen 90 enseña la localización de Nayarit dentro de la República Mexicana mientras que la Imagen 91 señala al municipio de Compostela.



Imagen 90 Localización de Nayarit dentro de la República Mexicana (mexicoreal, 2021)

¹⁵ Capacidad seleccionada por el dimensionamiento del recinto entre 15,000-24,000 m². Incluye número de ventanas y orientación, así como número de personas y equipos en el lugar.

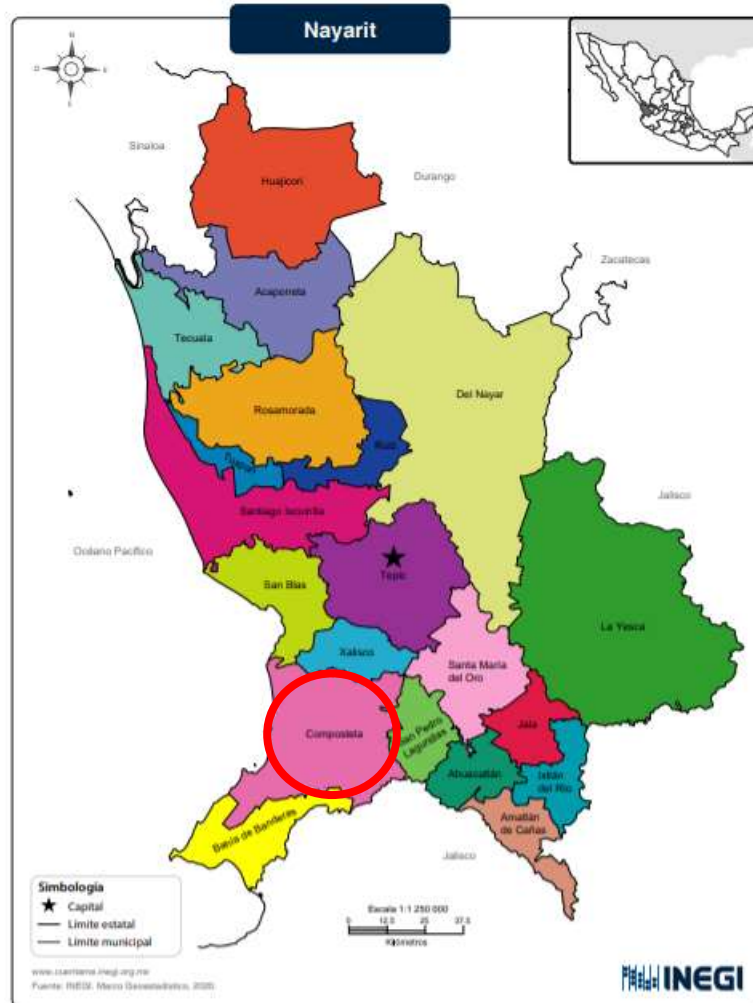


Imagen 91 Compostela, Nayarit (INEGI, Marco Geoestadístico Municipal 2020, 2020)

Y como cualquier proyecto de instalación se tienen que conocer las condiciones del sitio para así tomar las decisiones pertinentes y realizar los cálculos correctos evitando así problemas posteriores al diseño y montaje de equipos. La Tabla 7 muestra las condiciones climáticas dentro de Compostela.

Tabla 7 Condiciones climáticas de Compostela, Nayarit (Munters, 2020)

Propiedad	Valor
Temperatura máxima de verano Bs °C	38
Temperatura máxima de verano Bh °C	28
Temperatura mínima de verano Bs °C	34
Temperatura mínima de verano Bh °C	25
Temperatura máxima de invierno Bs °C	11
Temperatura mínima de Invierno Bs °C	8
Humedad relativa %	65.31
Altura sobre el nivel del mar (m)	874
Presión barométrica media atm mmHg	692

Los valores a los que se les debe poner especial atención son los de temperatura máxima de verano y la mínima en invierno pues son lo más extremos a los que se puede llegar y es mejor realizar los cálculos previniendo dichas condiciones.

Ahora, ya que se mencionó el estado y municipio, el sitio donde específicamente se espera poder instalar la BCG 3 TR es dentro del Domo de San Pedro (Imagen 92) localizado a 20 km al oeste del Volcán Ceboruco, en la porción sur del Estado de Nayarit en el sector más occidental del Eje Neovolcánico en el graben Tepic-Chapala y es el edificio volcánico ácido más importante de la zona con 700 m de altura, con una base de 4 km elongada en sentido NW-SE¹⁶ (D. Castillo H., 1992).

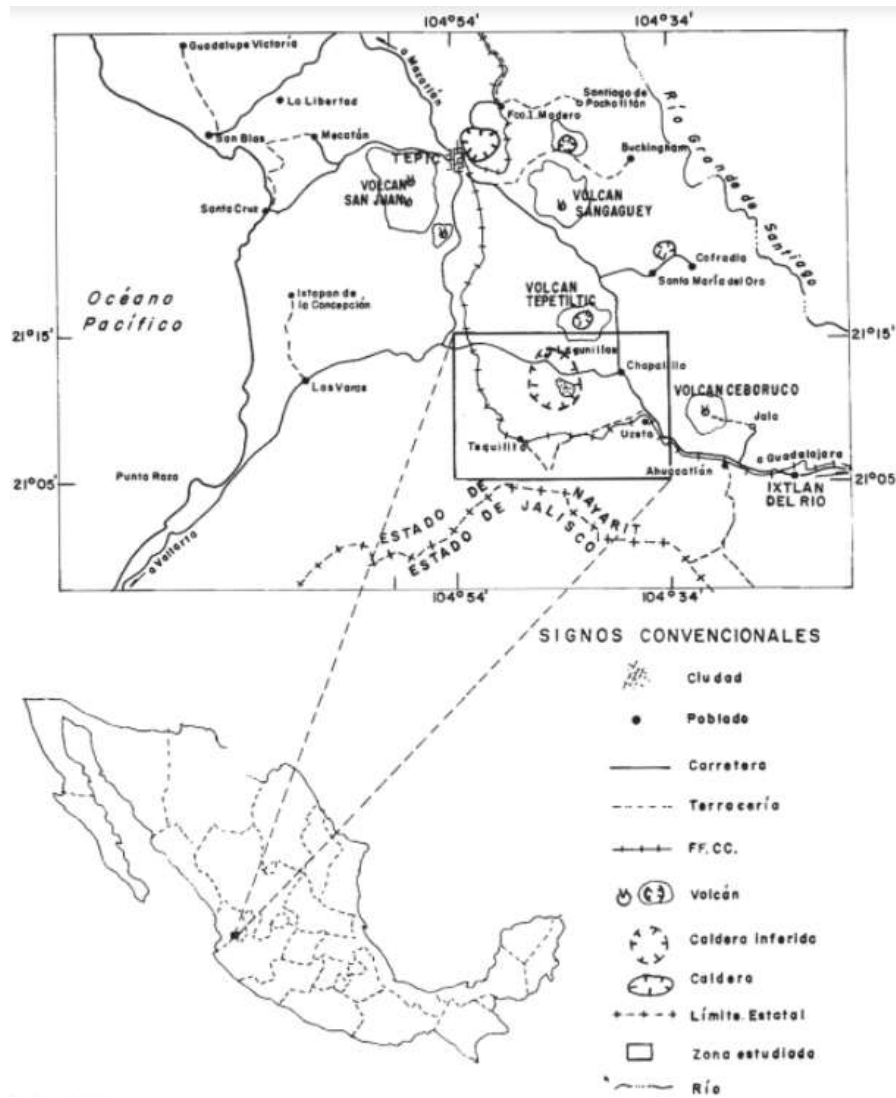


Imagen 92 Domo de San Pedro en Compostela, Nayarit (D. Castillo H., 1992)

Sin embargo, es importante el conocer por qué la zona es propicia para la instalación de un equipo que trabaje a partir de energía geotérmica. Se han identificado localidades termales frías con temperaturas entre los 25 y 26 °C, mientras que para las restantes se conoce un rango de temperatura

¹⁶ Noroeste-Sureste.

entre 28 y 48 °C, las mayores temperaturas se encuentran en Las Cuevas a 8 km del sureste de Domo. (D. Castillo H., 1992) De igual manera en el cauce del Río Tetitlán (Noreste del área) brotan manantiales termales en su margen derecho y a la izquierda brotan y/o descargan manantiales fríos provenientes de la zona de captación del Volcán Ceboruco.

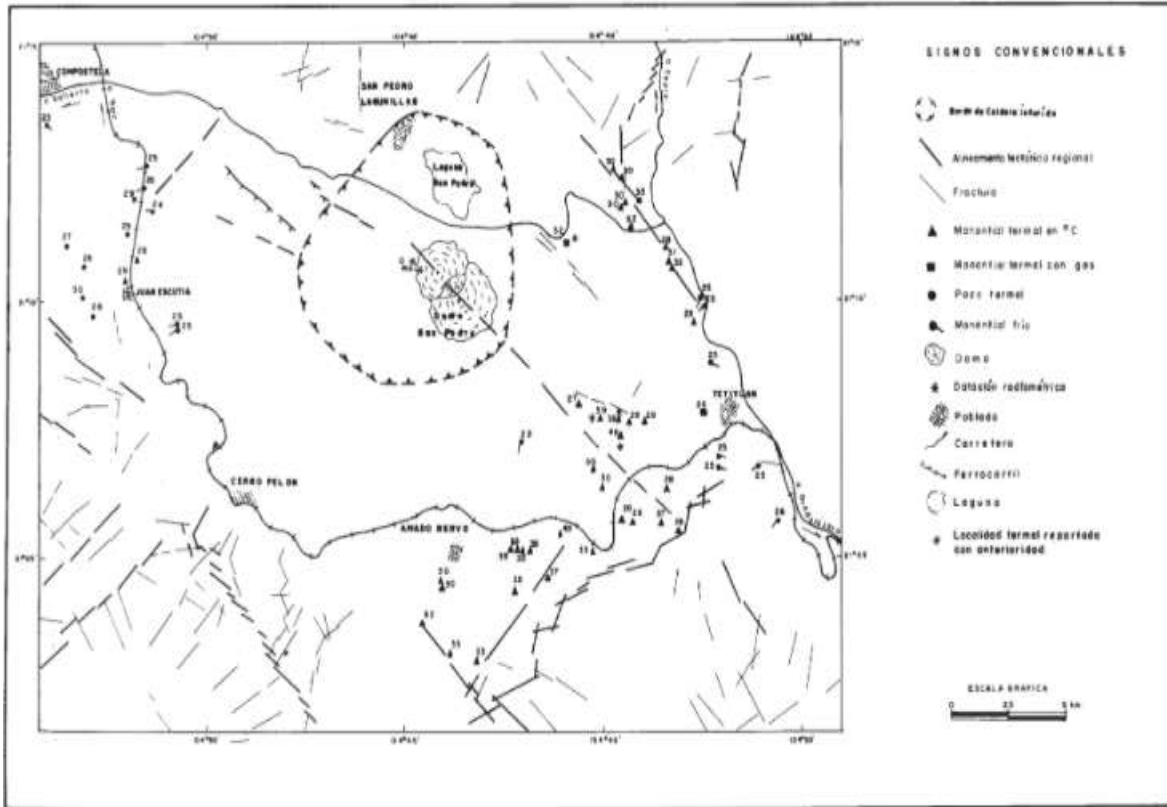


Imagen 93 Distribución del termalismo en el Domo de San Pedro (D. Castillo H., 1992)

La Imagen 93 deja ver que las localidades frías y termales están en disposición radial de los complejos de domos y volcanes y teniendo como centro común al Domo de San Pedro, teniendo en sus aguas proporciones de elementos como el boro, litio, cloruros y sulfatos a la vez que se presenta una disminución de estos elementos conforme se alejan del Domo, revelando así un proceso de dilución por aguas subterráneas someras pero teniendo en cuenta que los manantiales de esa zona son manifestaciones secundarias de un sistema hidrotermal profundo. (D. Castillo H., 1992)

Finalmente, después de conocer todas las características del lugar de instalación se mencionará el proceso que se siguió para el diseño de la BCG con capacidad de 3 TR.

4.3 DESARROLLO DEL CICLO DE REFRIGERACIÓN

Para empezar con el diseño de la BCG 3 TR se comenzó por buscar en la literatura ejemplos sobre el dimensionamiento de los equipos que comprenden a una bomba de calor y como primer objetivo era comprender completamente cómo es que funciona el ciclo de refrigeración ideal, así como el propósito de cada uno de los equipos que lo forman y cuáles son las propiedades del refrigerante conforme pasa los equipos a lo largo del ciclo.

4.3.1 MEMORIA DE CÁLCULO TÉRMICO DE EQUIPOS PRINCIPALES

Se debe conocer que el planteamiento del ciclo de refrigeración de esta BCG 3 TR se hizo tomando en cuenta las presiones de trabajo de alta y baja al igual que las condiciones de temperatura mostradas en la Tabla 7.

A lo largo de este apartado se dará a conocer por qué se escogió el refrigerante R-410a para la BCG 3 TR, el ciclo de refrigeración interno en la BC, el cálculo para condiciones de invierno (es decir, con la mínima temperatura registrada) y finalmente el cálculo para las condiciones en verano (la máxima temperatura registrada), todo esto a partir de la información recabada de Compostela, Nayarit.

4.3.1.1 SELECCIÓN DEL REFRIGERANTE (R410a Y R32)

Para llevar a cabo la selección del refrigerante a emplear en la bomba de calor se tuvo que investigar cuál era el más empleado dentro del mundo de la climatización y cuál sería el sucesor, si es que había, que podría estarse desarrollando o ya empleando en otras partes del mundo.

Se decidió utilizar el refrigerante R-410a debido a que se usa en el 92% (Arguello Arguello, 2016) de los sistemas de refrigeración; sin embargo, el sucesor de este es el refrigerante R-32 y que, como se mostrará a continuación, tiene mejores resultados, pero las limitaciones de disponibilidad de este refrigerante y de equipos que lo usaran dentro del país fue un factor por el cual no se seleccionó.

Uno de los refrigerantes más conocidos y recordados dentro del gremio de la climatización es el R-134a; sin embargo, éste se dejó fuera debido al grave impacto que tiene al medio ambiente (Xu, Hwang, & Radermacher, 2013) y como se mostró desde un principio de este trabajo se quiere que esta BC se fabrique buscando la sustentabilidad.

Primeramente, la Tabla 8 muestra las propiedades de ambos refrigerantes.

Tabla 8 Propiedades de los refrigerantes considerados en la BCG 3 TR (Xu, Hwang, & Radermacher, 2013)

Propiedad/Refrigerante	R-410a	R32
GWP ¹⁷	2088	675
Peso molecular g/mol	72.6	52
Presión crítica Bar	49.3	57.8
Temperatura crítica °C	72.1	78.1
Densidad crítica kg/m ³	489	424.1
Punto de ebullición °C	-51.5	-51.7

Posteriormente, es importante conocer el comportamiento de estos refrigerantes en condiciones de condensación y evaporación por lo que en la Tabla 9 se enlistan sus propiedades.

Tabla 9 Propiedades en condensación y evaporación de los refrigerantes (Xu, Hwang, & Radermacher, 2013)

Propiedad/Refrigerante		R-410a		R32	
		Condensación	Evaporación	Condensación	Evaporación
Temperatura	°C	44	10	44	10
Presión de saturación de vapor	Bar	26.53	10.81	27.29	11.07
Densidad líquida	kg/m ³	953.2	1133	872.6	1020
Densidad de vapor	kg/m ³	115.6	41.9	82.4	30.2
Calor latente	kJ/kg	151.7	209.9	226.7	298.9
Conductividad térmica líquida	mW/mK	75.1	98.1	105.1	136.4
Conductividad térmica de vapor	mW/mK	18.7	13.6	21.4	15.3

Después de observar las propiedades de ambos refrigerantes se puede observar que el R32 es la mejor opción; sin embargo, para la correcta selección se decidió simular en Excel, con ayuda de la macros REFPROP, el ciclo correspondiente a la BC determinando así parámetros como el COP, flujo másico, etc. que sirvieron para tomar la decisión del refrigerante que mejor se acopla al proyecto.

REFPROP es una herramienta para evaluar numéricamente las propiedades termodinámicas y de transporte de sustancias puras o mezclas de ellas. El cálculo de propiedades como temperatura, entalpías, entropía, calidad, densidad, viscosidad, etc. se hace por medio de comandos en donde se requieren conocer dos de las propiedades de dicha sustancia para poder obtener un resultado. Las regiones termodinámicas que se incluyen corresponden a líquido subenfriado, región de saturación, líneas de saturación y región de gas sobrecalentado. (Arias, 2016)

La Tabla 10 muestra los resultados de esta simulación.

¹⁷El GWP (Global Warming Potencial o Potencial de Calentamiento global) es el impacto que tiene un refrigerante al medio ambiente, se trata de un valor relativo que compara el impacto de 1 kg de CO₂ durante un periodo de 100 años. (DAIKIN, 2018)

Tabla 10 Parámetros del ciclo de refrigeración (elaboración propia)

Propiedad/Refrigerante	R-410a	R32
COP _{pref.} ¹⁸	4.48	7.92
COP _{b.c.} ¹⁹	5.48	8.92
Flujo másico kg/s	0.074	0.044
GWP	2088	675

La tabla anterior permite enfatizar en lo que se comentó con anterioridad que es el mejor desempeño del R32 por encima del R-410a pues tanto el COP, que es la cantidad de calor extraída a partir de un trabajo hecho (del compresor), en modo refrigeración y en calefacción es mayor con el R32 indicando mejor rendimiento, este parámetro se mostrará su cálculo más adelante; además de que este último tiene un GWP mucho más bajo que el 410a; sin embargo, por cuestiones de disponibilidad (se consultó con proveedores nacionales tales como CORESA, Refrigeración estratégica, Frigus center, etc.) se tomó la decisión de hacer uso del R-410a que estará vigente hasta el año 2030 y los equipos que se requieren sí se encuentran con disponibilidad si se usa el R-410a a través de proveedores mexicanos.

Ahora, ya que seleccionamos el R-410a como refrigerante, se verá en los siguientes párrafos cuáles son las características de éste.



Imagen 94 Refrigerante R-410a (Refrigeration, 2021)

¹⁸ COP de la BCG 3 TR en modo refrigeración.

¹⁹ COP de la BCG 3 TR en modo calefacción.

El R-410a es una mezcla de dos gases refrigerantes: el R-32 y el R-125, ambos pertenecientes a los hidrofluorocarbonos (HFC) y con casi nula afectación a la capa de ozono. Este refrigerante es de baja toxicidad, no inflamable en presencia del aire atmosférico a temperatura inferior a 100 °C y a presión atmosférica, químicamente estable y con un bajo deslizamiento²⁰. (The Linde group, 2009)

Es miscible con los aceites poliésteres (POE) y su inflamabilidad se clasifica en A1 grupo L1, es decir, no es inflamable y tiene baja toxicidad con un valor de 1000 ppm en el valor de AEL (Allowance Exposure Limit) (8 horas TWA). (Gas-Servei S.A., 2010)

En la nueva normativa para gases refrigerantes de la Unión Europea, para la eliminación de los gases fluorados, se dejará de comercializar el R-410 en 2025 para equipos de hasta 3 kg (capacidad equivalente en TR).

Al tener un alto índice GWP (Según la normativa mencionada el valor máximo permitido es de 750 GWP (Solana, 2020)) y ser un contaminante al medio ambiente es que el Reglamento (UE) No. 517/2014 del Parlamento Europeo y del consejo del 16 de abril de 2014 sobre los gases fluorados de efecto invernadero ha decidido prohibir su comercialización. Esto se hará efectivo el 1 de enero de 2025, con el objetivo de prevenir el aumento del calentamiento global. (Gesman soluciones, 2019)

Sin embargo, por lo mencionado anteriormente se continuará con el diseño de la BCG de 3 TR al no contar con equipos para una capacidad pequeña que utilicen R32.

4.3.1.2 CÁLCULO TÉRMICO DEL CICLO DE REFRIGERACIÓN

El primer análisis que se llevó a cabo fue proponiendo un ciclo ideal, teniendo como base el 'Postulado de Estado' (Cengel & Boles, 2011) y el refrigerante R-410a seleccionado. Los números en el diagrama de la Imagen 96 marcan las salidas de cada uno de los equipos que conforman a la BC; asimismo en el diagrama se pueden observar dos isobaras que representan la presión de alta y baja del refrigerante seleccionado, en la literatura (Imagen 95) se identificaron las presiones típicas de operación del R-410a para bombas de calor agua-aire, el valor de presión baja de 8.96 bar (118 psi) mientras que en alta fue 28.82 bar (400 psi). (Prah, 2001)

²⁰ El deslizamiento o 'glide' aplica a los refrigerantes que son una mezcla y por lo tanto poseen diferentes temperaturas de saturación a la misma presión; los gases más volubles se evaporan primero aumentando la temperatura de ebullición en fase líquida y por ende la temperatura del circuito va a variar cuando la mezcla empiece a hervir. La ventaja que tiene el R-410a es que la temperatura de saturación del R-32 junto con R-125 no varían en gran medida. **Fuente especificada no válida.**

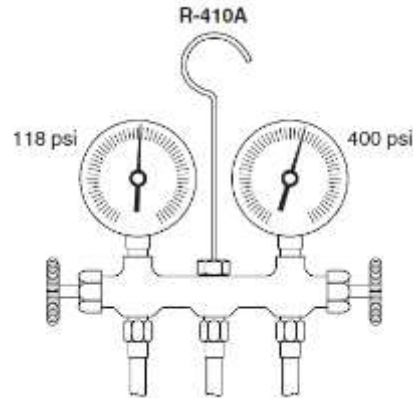


Imagen 95 Presiones típicas de operación para el R-410a (Prah, 2001)

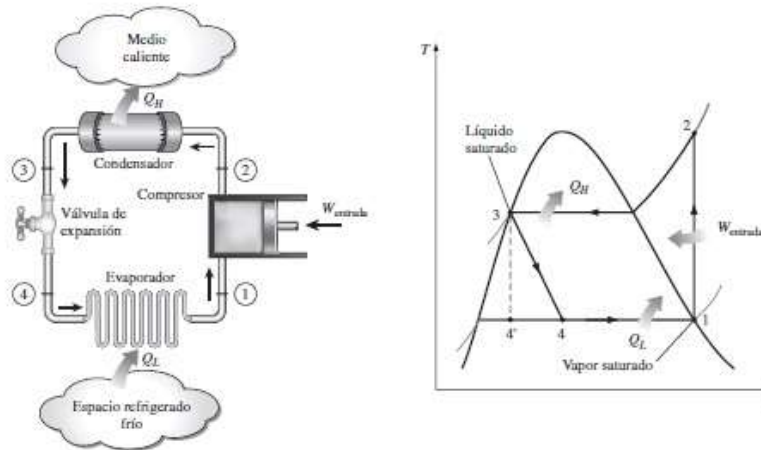


Imagen 96 Ciclo ideal de refrigeración representado en el diagrama de Mollier (Cengel & Boles, 2011)

A continuación, se detallarán las consideraciones que se tomaron en cuenta de acuerdo al postulado de Estado para realizar los cálculos correspondientes al ciclo ideal.

PUNTO 1 (SALIDA DEL EVAPORADOR)

El punto 1 se localiza a la salida del evaporador por ello, siguiendo el postulado de Estado, se consideró que el refrigerante en ese momento era 100% vapor, es decir, poseía una calidad de 1; con este valor junto con la presión baja se calculó la temperatura, la entropía y entalpía en ese punto. (Cengel & Boles, 2011)

PUNTO 2 (SALIDA DEL COMPRESOR)

Al ser un ciclo ideal, del punto 1 al 2 (salida del compresor) se considera un proceso isoentrópico; con este valor de entropía junto con la presión alta se obtuvieron las demás propiedades para el punto 2, desde la temperatura hasta la entalpía. (Cengel & Boles, 2011)

PUNTO 3 (SALIDA DEL CONDENSADOR)

Para el estado 3 a la salida del condensador, al igual que en el estado 1, se tomó por sentado que el refrigerante era 100% líquido, es decir, posee una calidad de cero. Para conocer las propiedades de estado en dichas condiciones se hizo uso de REFPROP donde se ingresó la presión alta, pues se sabe que idealmente es un proceso isobárico, y el valor de la calidad. (Cengel & Boles, 2011)

PUNTO 4 (SALIDA DE LA VÁLVULA DE EXPANSIÓN)

Finalmente, del estado 3 al 4 se conoce que el proceso es isoentálpico, por consiguiente, teniendo en cuenta que se regresó a la presión baja después de pasar por la válvula de expansión, para entrar al REFPROP se ingresaron los datos de entalpía junto con presión con los cuales, igual que en los puntos anteriores, se consiguió la temperatura, entalpía y entropía. (Cengel & Boles, 2011)

La Imagen 97 muestra el diagrama de Mollier del ciclo ideal para este trabajo, recalcando los puntos antes mencionados.

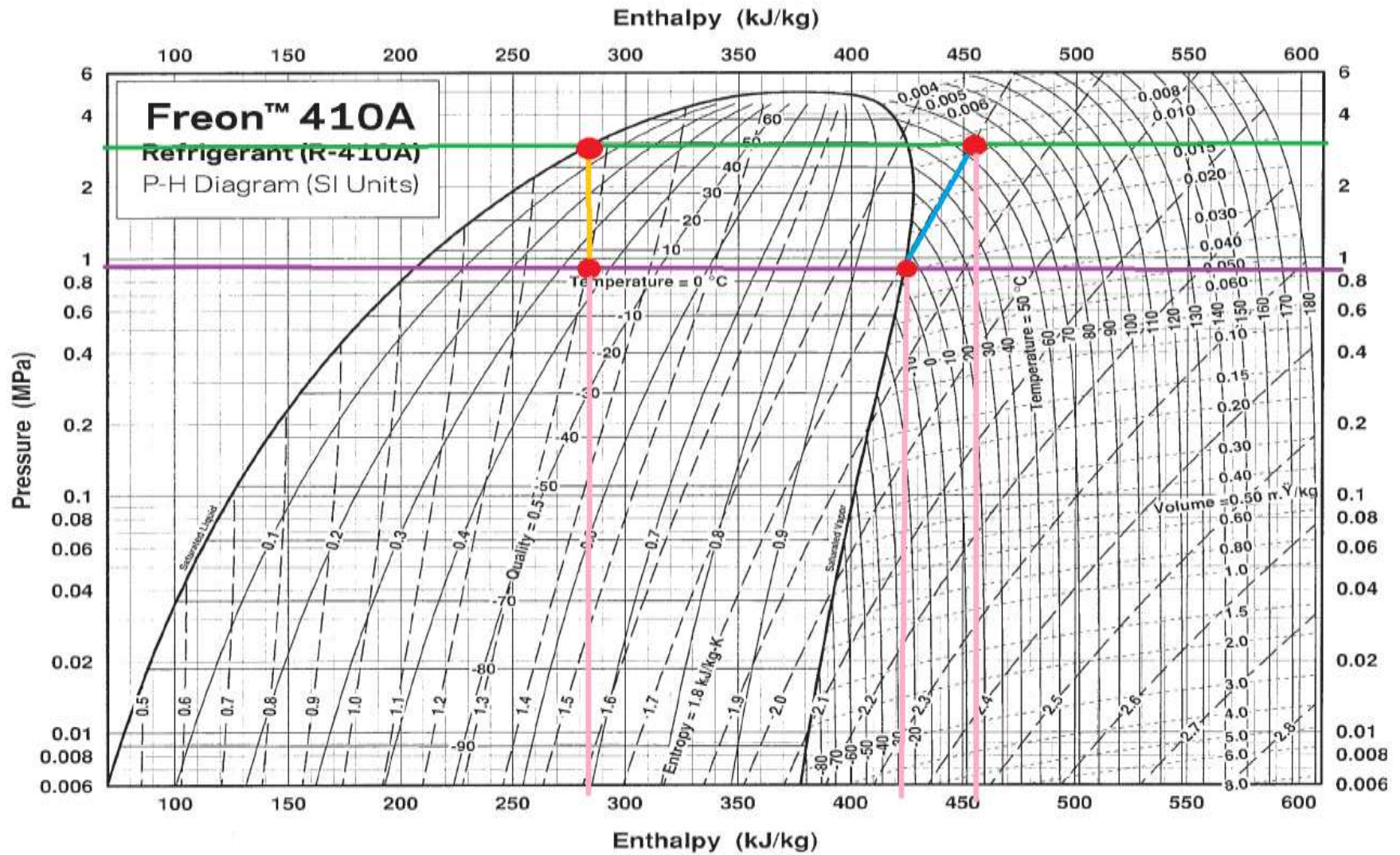


Imagen 97 Diagrama de Mollier para el R 410a (Chemours, 2019)

4.3.2 BALANCE DE MASA Y ENERGÍA DEL CICLO DE REFRIGERACIÓN

La Tabla 11 demuestra los resultados de los cálculos tomando en consideración lo dicho con anterioridad.

Tabla 11 Balance de masa y energía del ciclo de refrigeración ideal (elaboración propia)

Estado termodinámico	1	2	3	4
Estado físico	Vapor	Vapor sobre calentado	Líquido	Mezcla
Presión bar	8.963	28.82	28.82	8.963
Temperatura °C	3.69	65.77	47.26	3.61
Flujo másico kg/s	0.0742	0.0742	0.0742	0.0742
Entalpía kJ/kg	422.37	454.06	280.28	280.28
Entropía kJ/kgK	1.8	1.8	1.26	1.29

4.3.2.1 DIMENSIONAMIENTO BÁSICO DE LOS EQUIPOS PRINCIPALES Y PARÁMETROS IMPORTANTES

Haciendo uso de los resultados obtenidos a través de la simulación con REFPROP mostrados en la Tabla 11 se puede dimensionar la capacidad de los equipos principales que forman parte de la BCG.

Condensador

$$Q_A = h_2 - h_3 = 454.06 - 280.28 = 173.78 \frac{kJ}{kg}$$

Evaporador

$$Q_B = h_1 - h_4 = 422.37 - 280.28 = 142.09 \frac{kJ}{kg}$$

Compresor

$$W_C = h_2 - h_3 = 454.06 - 422.37 = 31.69 \frac{kJ}{kg}$$

Ahora, de los parámetros más importantes que se tienen al estar diseñando equipos de climatización son los coeficientes de rendimiento: COP, EER y SEER. El COP ya se ha mencionado con anterioridad en este trabajo, se define como la relación entre la potencia calorífica y la potencia absorbida útil del equipo según la norma UNE-EN-14511. Este parámetro expresa que tan bien se está aprovechando la energía entregada por el motor del compresor para poder acondicionar el medio ambiente. (Herrero Fuerte, 2021)

Como muestra la Tabla 10 el COP se calcula tanto para cuando la BC actúa en modo refrigeración como calefacción y es el calor necesario por el evaporador dividido entre el trabajo requerido por el compresor.

$$COP_{REF} = \frac{Q_B}{W_C} = \frac{Q_B}{Q_A - Q_B} = \frac{1}{\frac{Q_A}{Q_B} - 1}$$

$$COP_{REF} = \frac{Q_B}{W_C} = \frac{142.09 \frac{kJ}{kg}}{31.69 \frac{kJ}{kg}} = 4.48$$

Se ha mencionado con anterioridad que el propósito del diseño de un BC es el poder actuar tanto en verano como en invierno sin la necesidad de cambiar de equipo en el interior del recinto, solo activando la válvula de cuatro vías, para que el intercambiador de calor que actuaba como evaporador ahora lo haga como condensador y viceversa es por ello que:

$$COP_{REF} = \frac{Q_A}{W_C} = \frac{Q_A}{Q_A - Q_B} = \frac{1}{1 - \frac{Q_B}{Q_A}}$$

Tomando en consideración la ecuación: $Q_A = Q_B + W_C$

Y dividiendo entre el trabajo del compresor: $\frac{Q_A}{W_C} = \frac{Q_B}{W_C} + 1$

Por lo tanto, $COP_{BC} = COP_{REF} + 1$

Sustituyendo el valor del COP de refrigeración en la fórmula anterior:

$$COP_{BC} = COP_{REF} + 1 = 4.48 + 1 = 5.48$$

Comprobando dicho resultado:

$$COP_{BC} = \frac{Q_A}{W_C} = \frac{173.78 \frac{kJ}{kg}}{31.69 \frac{kJ}{kg}} = 5.48$$

Estos resultados nos permiten comprobar las estipulaciones que se dicen que el COP en modo refrigeración puede ser mayor a 1 pero para modo calefacción siempre será mayor a 1. (College, 2022)

El otro parámetro es el EER (Energy Efficiency Rating) y es la medición del rendimiento del equipo en modo refrigeración. Su definición matemática es el cociente entre la capacidad de refrigeración del equipo en BTU ²¹ y la energía utilizada por todos los equipos en la bomba de calor (compresor, ventilador, accesorios, etc.) en watts. Es la relación entre la cantidad de calor retirado por el equipo de aire acondicionado y el consumo de electricidad; indica que cuanto mayor sea el valor de la relación de la eficiencia energética de un equipo de refrigeración, la tecnología empleada será mejor y más moderna, siendo el principal objetivo la utilización del mínimo de energía eléctrica para realizar el trabajo de refrigerar un espacio. (PEER, 2007)

Siguiendo la definición anterior de EER se tiene que la energía consumida en la BC para que lleve a cabo su funcionamiento es tomando en cuenta al compresor y al ventilador.

$$\dot{W}_c = 2353 \text{ W}$$

$$\dot{W}_{vent} = 372.85 \text{ W}$$

La cantidad de potencia deseada son las 3 TR, pero se tiene que recordar que este valor tiene que estar en una unidad en específico: BTU/h.

$$T_{refrigeración} = 3 \text{ TR} = 10.551 \text{ kW} = 36001.51 \frac{\text{BTU}}{\text{h}}$$

Por lo tanto:

$$EER = \frac{Pot_{deseada}}{Pot_{requerida}} = \frac{T_{refrigeración}}{\dot{W}_{vent} + \dot{W}_{PC}} = \frac{36001.51 \frac{\text{BTU}}{\text{h}}}{372.85 + 2353 \text{ W}}$$

$$EER = 13.21 \frac{\text{BTU} - \text{h}}{\text{W}}$$

Finalmente, el SEER se define como el cociente de eficiencia en frío que adoptó el Departamento de Energía de los Estados Unidos (CONUEE, 2021) y su cálculo es:

$$SEER = (1.12 - \sqrt{1.2544 - EER * 0.08})/0.04$$

$$SEER = \frac{1.12 - \sqrt{1.2544 - 13.21 * 0.08}}{0.04}$$

²¹ BTU es la cantidad de energía necesaria para elevar 1 °F a una libra de masa. (Cengel & Boles, 2011)

$$SEER = 16.88 \frac{BTU - h}{W}$$

Potencia del evaporador

Dadas las condiciones que se tienen en el diseño, se ha establecido desde el inicio que se pretende que el equipo tenga una potencia de 3 TR.

$$\dot{Q}_B = 3 TR = 10.551 kW$$

Flujo másico de refrigerante

Dada la potencia requerida del evaporador y el calor que este requiere para el ciclo de refrigeración se calcula el flujo másico de la siguiente manera:

$$\dot{m}_{ref} = \frac{\dot{Q}_B}{Q_B} = \frac{10.551 \frac{kJ}{s}}{142.089 \frac{kJ}{kg}} = 0.074 \frac{kg}{s}$$

Potencia del condensador

Con el flujo másico necesario de refrigerante se puede encontrar la potencia del condensador.

$$\dot{Q}_{PA} = \dot{m} \times Q_A = 0.074 \times 173.78 = 12.9 kW$$

Potencia del compresor

Es similar con el motor del compresor, cabe recalcar que esto es en un proceso ideal por lo que después se debe hacer un ajuste con la eficiencia del compresor y del motor eléctrico que lo conforma.

$$\dot{W}_C = \dot{m} * W_C = 0.074 * 31.69 = 2.35 kW = 3.15 HP$$

4.3.5 CICLO REAL

Es bien conocido que los ciclos ‘ideales’ que se calcularon con anterioridad sirvieron como referencia para pasar a la realidad el ciclo de la bomba de calor. Se hicieron muchas consideraciones para poder armar el ciclo ideal; sin embargo, las modificaciones que se le realizaron fueron con el propósito de conocer las potencias reales que los equipos que se usan en el ciclo de la bomba de calor poseen.

El dimensionamiento básico de los equipos que se vio en el apartado 3.3.2.1 fue el siguiente:

Tabla 12 Dimensionamiento básico de equipos en ciclo ideal (elaboración propia)

Condensador kW	12.90
Evaporador kW	10.551
Compresor kW	2.35

Para pasar de un caso ideal a uno real se tomaron en consideración tanto un rango de temperatura de sobrecalentamiento como de subenfriamiento, basándonos en los valores más comúnmente utilizados en la industria estas temperaturas fueron:

Tabla 13 Temperaturas de sobrecalentamiento y subenfriamiento (elaboración propia)

Temperatura de sobrecalentamiento °C	5
Temperatura de subenfriamiento °C	5

Estos datos se operan a la salida de cada uno de los intercambiadores de calor, por lo tanto, las nuevas temperaturas resultantes son:

Temperatura real a la salida del evaporador

$$T_{real\ ev.} = 3.69 + 5 = 8.69\ ^\circ\text{C}$$

Temperatura real a la salida del condensador

$$T_{real\ cond.} = 47.26 - 5 = 42.26\ ^\circ\text{C}$$

Con estos datos ya actualizados se realiza nuevamente el balance de masa y energía obteniendo los resultados a partir del uso de REFPROP:

Tabla 14 Balance de masa y energía del ciclo de refrigeración real (elaboración propia)

Estado termodinámico	1	2	3	4
Estado físico	Vapor	Vapor sobrecalentado	Líquido	Mezcla
Presión ²² bar	8.963	28.82	28.82	8.963
Temperatura °C	8.69	65.77	42.26	3.61
Flujo másico kg/s	0.067	0.067	0.067	0.067
Entalpía kJ/kg	428.049	465.49	270.09	270.09
Entropía kJ/kgK	1.82	1.94	1.23	1.25

Cabe recalcar que para la entalpía del punto dos (a la salida del compresor) se tuvo que hacer ciertos cálculos que se enlistan en seguida:

$$h_{2i} = 460.99 \frac{kJ}{kg}$$

Pero para obtener la entalpía real se tiene que considerar tanto el trabajo ideal, así como la eficiencia adiabática del compresor.

$$W_{iso} = 460.99 - 428.049 = 32.941 \frac{kJ}{kg}$$

La eficiencia adiabática del compresor es:

$$\eta_{a.c.} = \frac{W_{iso}}{W_{real}} = \frac{32.941}{h_{2r} - h_1}$$

El valor de esta eficiencia para la industria se tiene aproximadamente de $\eta_{a.c.} = 88\%$, por lo tanto, despejando el valor de h_{2r} :

$$h_{2r} = \frac{32.941}{0.88} + 428.049 = 465.49 \frac{kJ}{kg}$$

²² En este ciclo se consideraron las mismas presiones del ideal debido a que esta tesis solo llega a el diseño y construcción mecánica de la BCG, por lo que aún no existen manómetros instalados para medir la presión real.

De igual manera, el dimensionamiento del equipo cambia debido a la modificación de las entalpías.

Evaporador

$$Q_B = h_1 - h_4 = 428.049 - 270.09 = 157.96 \frac{kJ}{kg}$$

$$\dot{Q}_B = 10.551 kW$$

Flujo másico de refrigerante

$$\dot{m}_{ref} = \frac{\dot{Q}_B}{Q_B} = \frac{10.551 \frac{kJ}{s}}{157.96 \frac{kJ}{kg}} = 0.067 \frac{kg}{s}$$

Condensador

$$Q_A = h_{2r} - h_3 = 465.49 - 270.09 = 195.4 \frac{kJ}{kg}$$

$$\dot{Q}_A = \dot{m}Q_A = 0.067(195.4) = 13.09 kW$$

Compresor

$$W_C = h_{2r} - h_1 = 465.49 - 428.049 = 37.44 \frac{kJ}{kg}$$

$$\dot{W}_C = \dot{m}W_C = 0.067(37.44) = 2.5 kW = 3.35 HP$$

Asimismo, se puede calcular tanto la potencia al eje como la potencia del motor en el compresor. Al igual que en la entalpía del punto dos se emplean eficiencias, la eficiencia mecánica y la eficiencia del motor cuyos valores, comúnmente usados en la industria, son 90% y 80% respectivamente.

$$Pot_{eje} = \frac{\dot{W}_C}{\eta_{mec}} = \frac{3.35}{0.9} = 3.72 HP$$

$$Pot_{motor} = \frac{Pot_{eje}}{\eta_{mM}} = \frac{3.72}{0.8} = 4.65 HP$$

Ahora, se calculará nuevamente los parámetros más importantes (COP, EER y SEER) pero tomando como resultados aquellos arrojados en el cálculo del ciclo real.

$$COP_{REF} = \frac{Q_B}{W_C} = \frac{157.96 \frac{kJ}{kg}}{37.44 \frac{kJ}{kg}} = 4.22$$

$$COP_{BC} = \frac{Q_A}{W_C} = \frac{195.4 \frac{kJ}{kg}}{37.44 \frac{kJ}{kg}} = 5.22$$

Comparando con los valores de una bomba de calor comercial obtenemos la siguiente tabla comparativa:

Tabla 15 Comparación del parámetro COP (elaboración propia)

PARÁMETRO DE UNA BOMBA DE CALOR COMERCIAL CON LA BCG 3 TR			
TRANE GEV036		BCG 3 TR	
COP ref	4.3	COP ref	4.22
COP bc	5.3 ²³	COP bc	5.22

PORCENTAJE DE ERROR COP_{ref}

$$\%E = \frac{|4.22 - 4.3|}{4.3} \times 100 = 0.0186 \times 100 = 1.86 \%$$

PORCENTAJE DE ERROR COP_{bc}

$$\%E = \frac{|5.22 - 5.32|}{5.32} \times 100 = 0.01879 \times 100 = 1.88 \%$$

$$EER = \frac{Pot_{deseada}}{Pot_{requerida}} = \frac{T_{refrigeración}}{\dot{Q}_{ventilador} + \dot{Q}_{compresor}} = \frac{36001.51 \frac{BTU}{h}}{372.85 + 2501.1 W}$$

$$EER = 12.52 \frac{BTU - h}{W}$$

$$SEER = (1.12 - \sqrt{1.2544 - EER * 0.08}) / 0.04$$

$$SEER = (1.12 - \sqrt{1.2544 - 12.52 * 0.08}) / 0.04$$

$$SEER = 15.45 \frac{BTU - h}{W}$$

²³ (TRANE, 2015)

Después de finalizar los cálculos de estos parámetros se puede decir que existe una variación como siempre entre el resultado de un ciclo ideal y uno real.

4.3.2.2 TEMPERATURA DE AIRE DE INYECCIÓN

El aire que tiene que salir de la bomba de calor tiene que estar diferido de la temperatura de confort que se espera tener dentro del recinto a climatizar, debido a que se debe considerar los factores externos como la carga térmica debido al sol en ventanas, techos y muros, el calor de los aparatos electrónicos, el número de personas dentro del recinto, la actividad que se realizará en el cuarto, etc. que traerán consigo una carga térmica que debe ser complementada con la temperatura del aire que se inyectará.

Para conocer el valor de la temperatura de inyección se empieza por encontrar el factor de calor sensible (FCS) el cual se define por el *calor sensible* y el *calor latente*; y cuya fórmula matemática es:

$$FCS = \frac{q_s}{q_s + q_L}$$

El calor sensible (q_s) se define como la cantidad de calor que el aire proporciona al enfriarse desde la temperatura de entrada (la cual debe ser mayor pues debe existir el calor suficiente para compensar las fugas de calor) a la temperatura del espacio. (GORIBAR, 1999) Mientras que el calor latente abarca desde la humedad generada por el personal hasta el calor de equipos como cafeteras, estufas de gas, horno de microondas, etc.

Para el caso de esta BCG de 3 TR se va a considerar un valor de FCS igual a 0.75 esto debido a que cuando se trata de acondicionar el aire en lugares pequeños se asume que la ganancia de calor latente es la tercera parte del calor sensible (GORIBAR, 1999), es decir:

$$FCS = \frac{1}{1 + \frac{1}{3}} = 0.75$$

Para resolver esto se hace uso de la carta psicrométrica

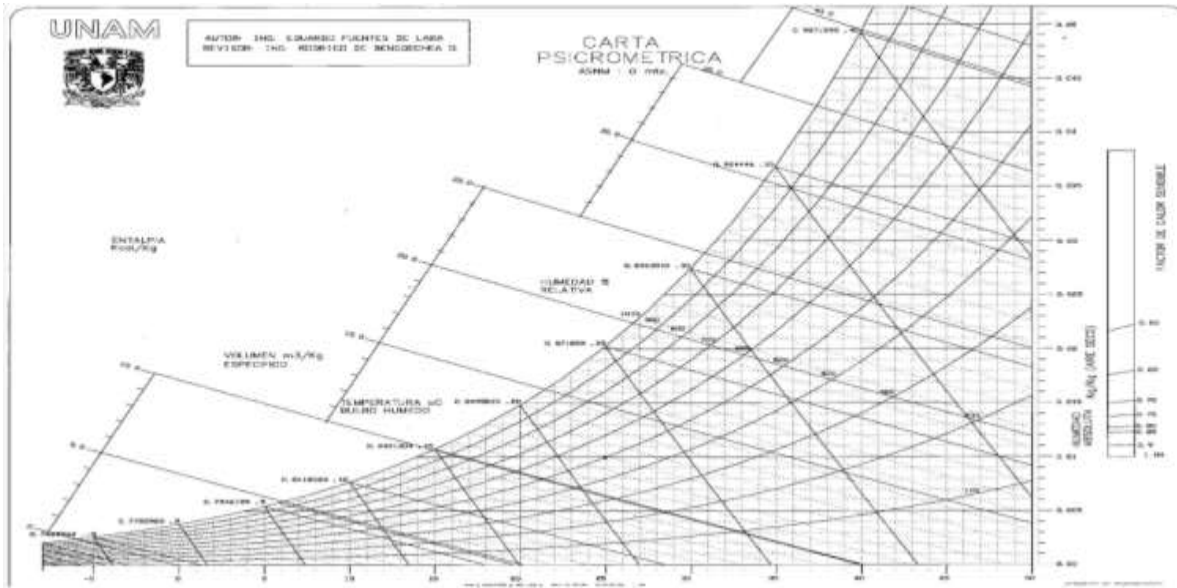


Imagen 98 Carta psicrométrica

Es importante considerar que el aire que se ingrese dentro del recinto donde se ubique el usuario final debe poseer las características necesarias para lograr una zona de confort. La zona de confort es definida como las condiciones de la mente que expresan satisfacción del ambiente térmico. (ISO 7730). En otras palabras, la confortabilidad es el conjunto de condiciones del ambiente en el que el mayor número de personas manifiestan sentirse bien. (García F. F., 1994)

La temperatura efectiva no debe exceder de 85 °F (29.4 °C) (GORIBAR, 1999), de igual manera las temperaturas de bulbo seco recomendables durante el verano varían desde 71 a 85 °F (21.6 a 29.4 °C) con humedades relativas que van desde 40 a 60% como máximo, mientras que para el invierno la temperatura efectiva es 72-70 °F (22-21 °C), una humedad relativa de 35 % y temperatura de bulbo seco de 54.2 °F (12.3 °C) (GORIBAR, 1999)

El procedimiento para conocer la temperatura del aire de inyección se explica a continuación:

1. Dentro de la carta psicrométrica se ubica el *punto cero*, es decir, una temperatura de 25°C junto con una humedad relativa de 50%. (Imagen 99)
2. Ubicar al FCS, con valor de 0.75, en la parte derecha de la carta.
3. Una vez localizado el factor, trazar una línea que pase por el punto cero como lo muestra la Imagen 100.
4. Marcar las condiciones de confort a la que queremos que nuestro recinto se encuentre, por ello se traza una línea a los 21 °C y una humedad relativa de 55% como se muestra en la Imagen 101.
5. La Imagen 102 muestra que el siguiente paso es desplazar de forma paralela la línea de FCS al punto en donde se localiza las condiciones de confort determinadas.
6. Una vez que se cruce por la curva de 90% (el aire nunca saldrá saturado) de humedad relativa se baja una línea hacia el eje de temperatura de bulbo seco y es así como se encuentra la temperatura de inyección. (Imagen 103)

El resultado que se obtuvo de este análisis fue:

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

Este valor entra en el rango común de la temperatura de inyección de los equipos el cual va de los 7 a los 15 °C (Bengoechea, 2021). Esta temperatura será a la que el aire saldrá de la bomba de calor para poder alcanzar la temperatura de confort cuando se utilice a la BCG como aire acondicionado.

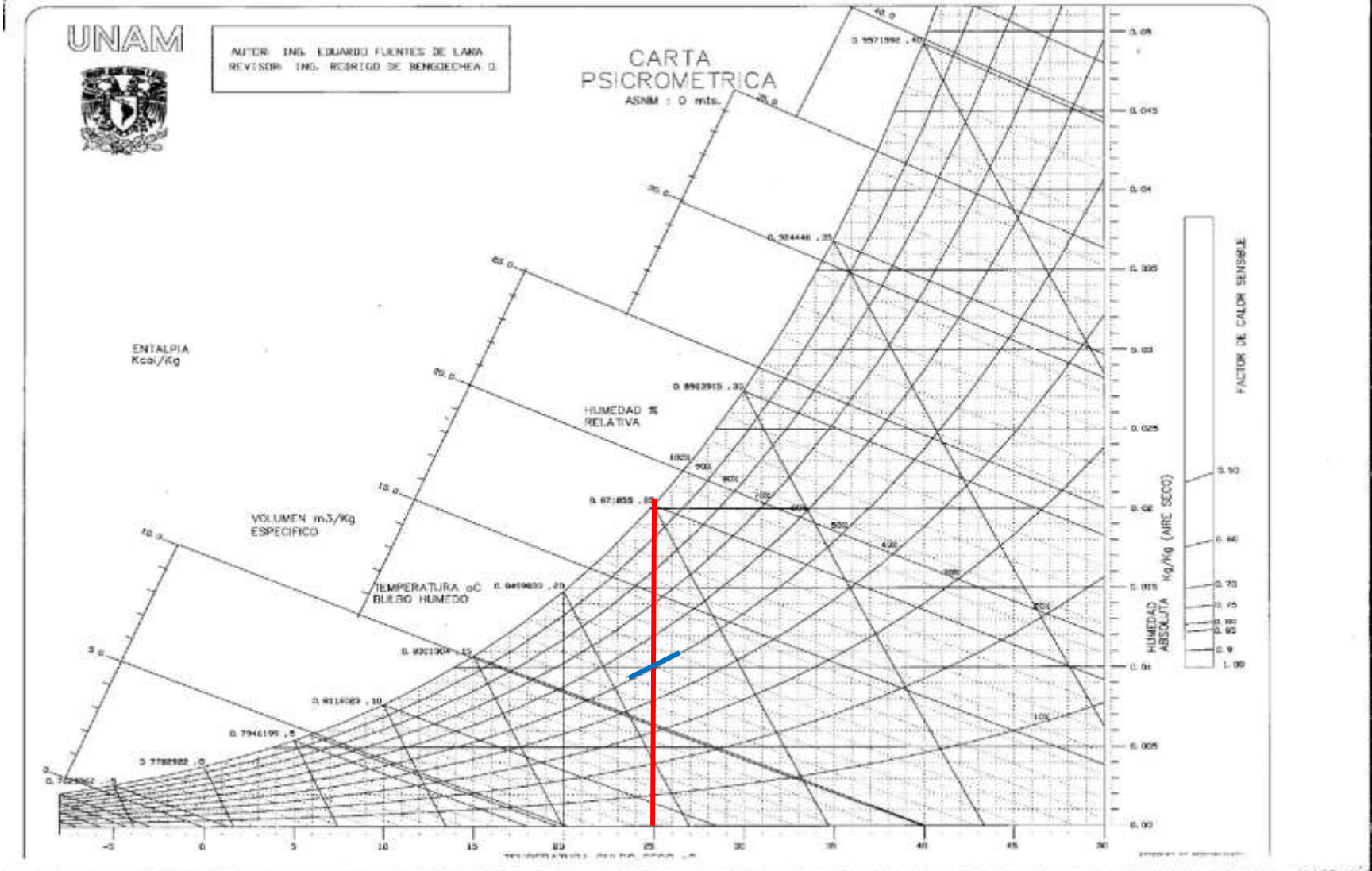


Imagen 99 Punto cero dentro de la carta psicrométrica

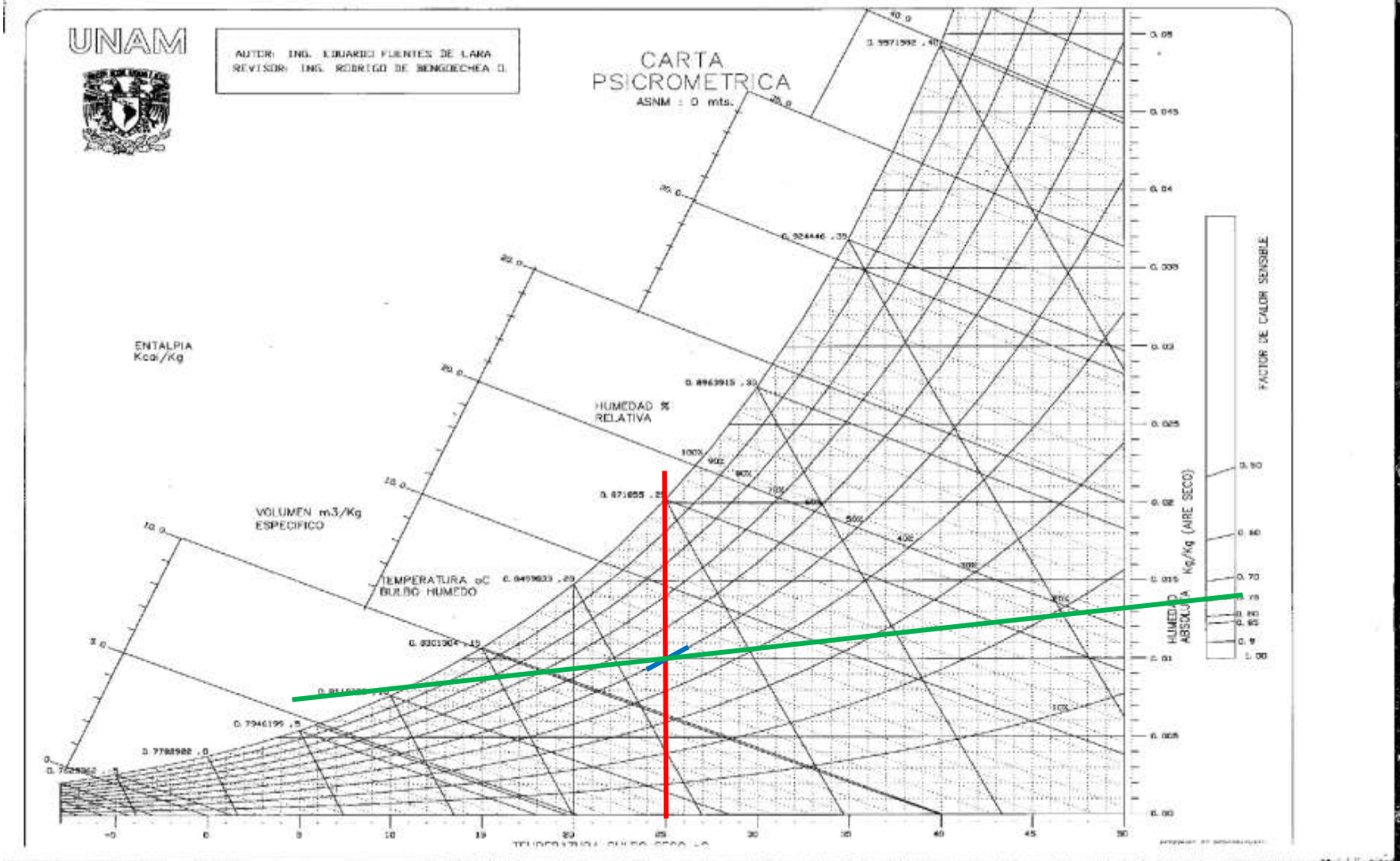


Imagen 100 FCS en la carta psicrométrica

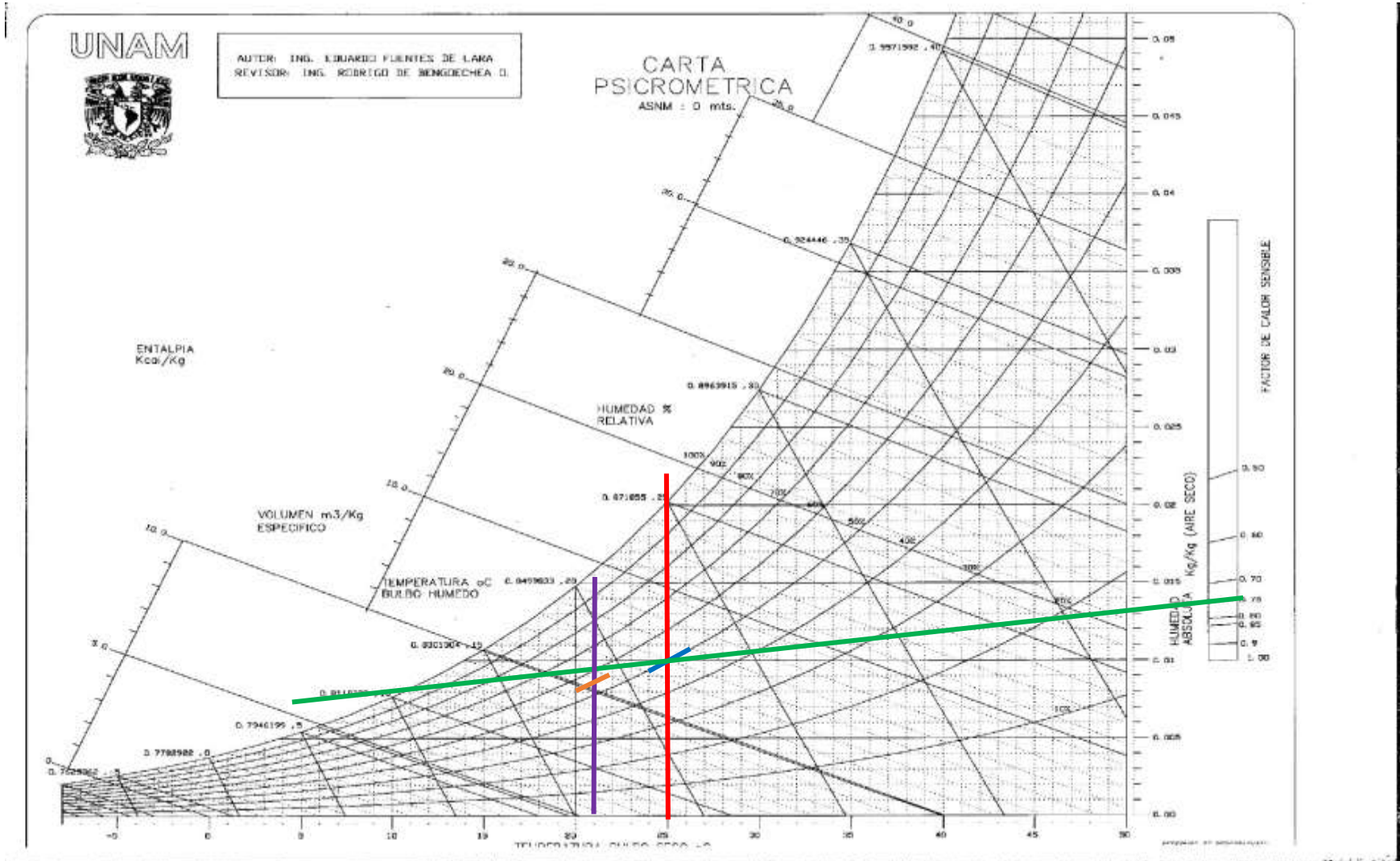


Imagen 101 Condiciones de confort dentro de la carta psicrométrica

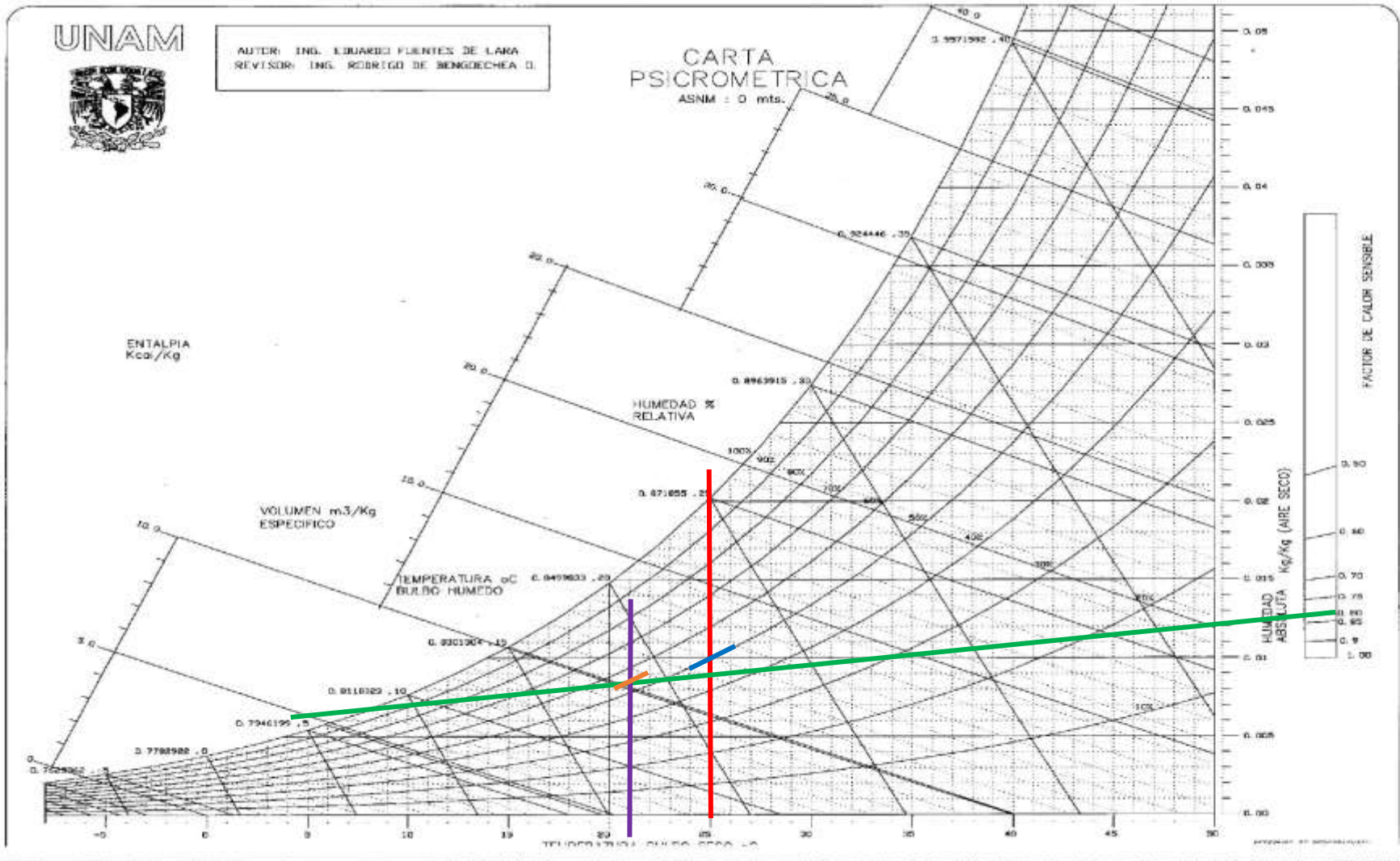


Imagen 102 Línea de FSC desplazada a las condiciones de confort

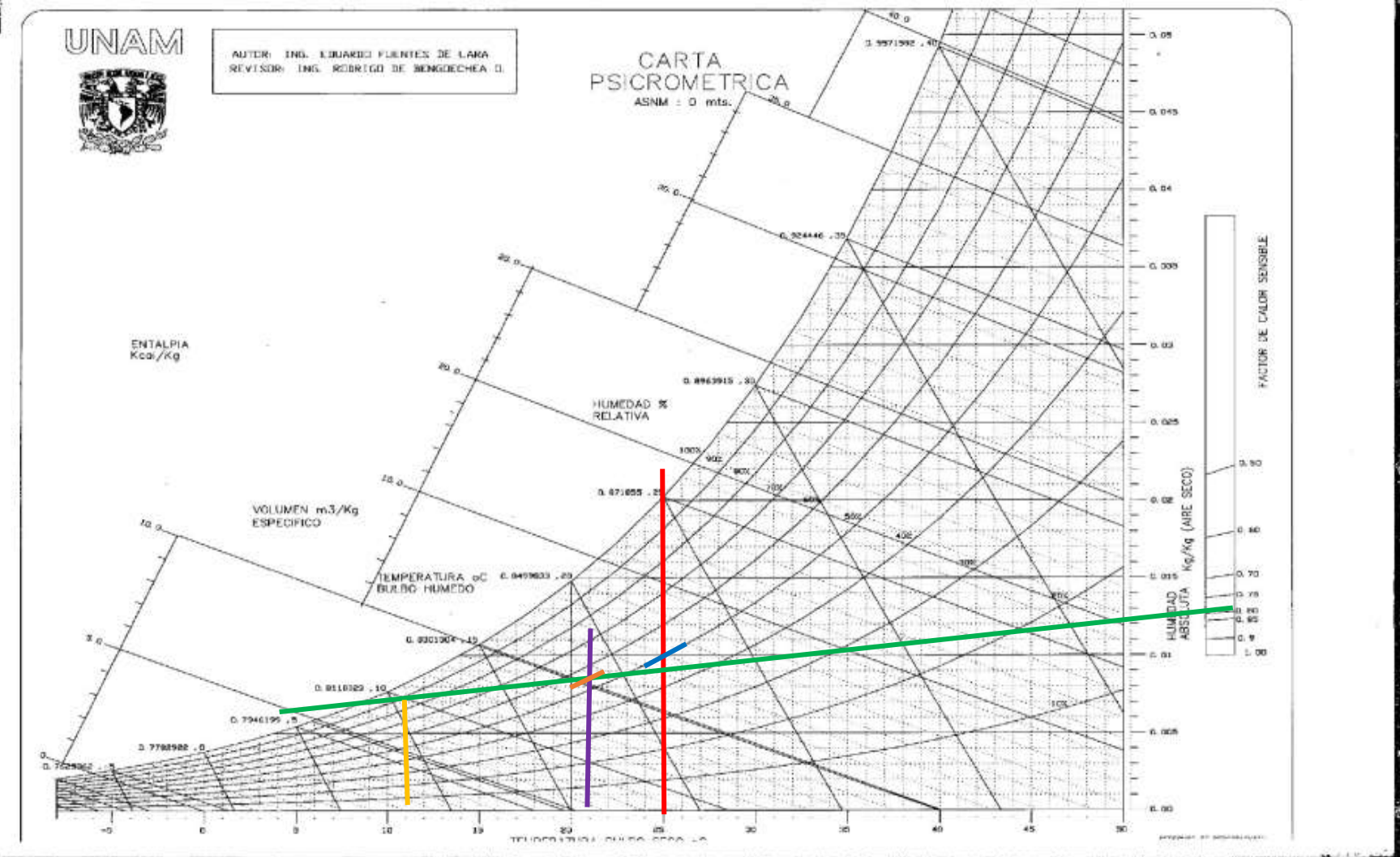


Imagen 103 Temperatura de inyección

4.3.3 CÁLCULO TÉRMICO PARA EL INVIERNO

Durante la época de invierno lo que se busca es que la temperatura del aire en el interior del recinto sea mayor a aquella del exterior, es por ello que se requiere que el intercambiador de calor que está dentro del hogar sea aquel que expulsa calor por lo tanto el equipo que se selecciona es el condensador pues éste cede energía para que el refrigerante cambie de fase vapor a líquida. El segundo intercambiador que se debe tener en consideración es el de calor geotérmico el cual absorberá calor del subsuelo.

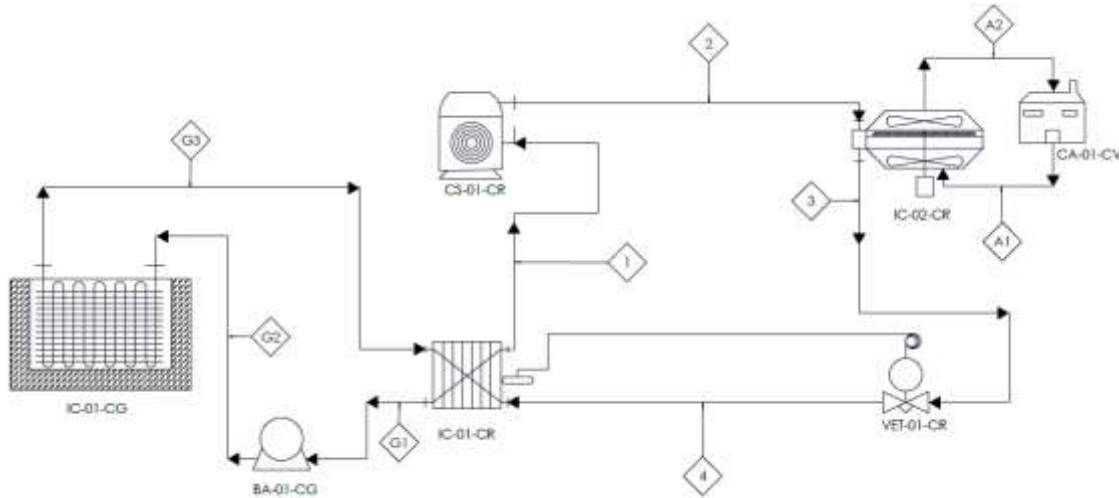


Imagen 104 Diagrama de flujo de proceso de una BCG en modo calefacción (elaboración propia)

La Imagen 104 plasma el proceso que se sigue al momento de querer operar la BC en modo calefacción, donde se pueden observar los puntos de salida de los equipos (1, 2, 3 y 4), al igual que los valores del aire (A1 antes de estar condicionado y A2 al momento de entrar al recinto) y finalmente los valores geotérmicos (G1, G2 Y G3).

4.3.3.1 CÁLCULO DEL SISTEMA DE AIRE ACONDICIONADO EN INVIERNO

Tomando en consideración los datos de la Tabla 7 con los valores más comunes de temperatura en Compostela se seleccionó un valor cerca del mínimo de temperatura; por lo que la temperatura del aire antes de ser condicionado es de:

$$T_{A1} = 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Según la tabla de confort de ASHRAE, la temperatura a la que debe encontrarse una habitación para una buena comodidad del usuario es de 21 °C; hay que tener en consideración que el aire que entre al recinto tiene que estar por encima de esta temperatura pues la temperatura exterior

es baja y existe una transferencia de calor por lo que se busca que después de esta transferencia se llegue a los 21 °C, por lo tanto, la temperatura a la que se espera salga el aire en el condensador es:

$$T_{A2} = 24 \text{ °C}$$

Este valor fue consultado con el ing. Rodrigo de Bengoechea quien dijo que la determinación certera de esta temperatura es muy complicada y no existe un procedimiento bien definido; sin embargo, sabe por experiencia que este valor tiene que ser menor a los 45 °C sino el aire empieza a quemar de lo caliente que se encuentra. Se recomienda la realización de pruebas para comprobar el valor que se propuso con anterioridad.

De igual manera se conoce que la potencia del condensador es de:

$$Q_{PA} = 13.05 \text{ kW}$$

Tomando en consideración la ecuación del balance de energía, se puede despejar y conocer el flujo másico.

$$Q_{PA} = \dot{m}_{aire} * C_{pAire} * (T_{A2} - T_{A1})$$

$$\dot{m}_{aire} = \frac{Q_{PA}}{C_{pAire} * (T_{A2} - T_{A1})} = \frac{13.05 \frac{kJ}{s}}{1.006 \frac{kJ}{kg * °C} * (24 - 10 \text{ °C})} = 0.928 \frac{kg}{s}$$

Finalmente, haciendo uso de REFPROP, el balance de masa y energía del aire acondicionado en invierno se muestra a continuación.

Tabla 16 Balance de masa y energía del aire acondicionado en Invierno (elaboración propia)

Estado termodinámico	A1	A2
Estado físico	Vapor	Vapor
Presión bar	1.01325	1
Temperatura °C	10	24
Flujo másico kg/s	0.928	0.928
Entalpía kJ/kg	283.35	297.44

4.3.3.2 CÁLCULO DEL SISTEMA GEOTÉRMICO EN INVIERNO

Al igual que en el aire, el subsuelo varía sus propiedades de acuerdo a la época del año ya que en invierno el equipo absorberá calor del subsuelo llevando a cabo la evaporación.

Según la investigación del ing. Luis Armando Saldívar Flores en la tesis *Diseño de un intercambiador de calor para usos directos de la geotermia* se debe considerar que la temperatura de entrada del agua en el intercambiador de calor del subsuelo en invierno es:

$$T_{G1} = 10 \text{ °C}$$

Mientras que la temperatura de salida del agua en el intercambiador de calor del subsuelo en invierno es:

$$T_{G3} = 17.2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

La potencia del evaporador que está en contacto con el circuito geotérmico es la misma que la que posee el intercambiador de calor geotérmico, por lo tanto:

$$Q_{PHES} = Q_{PB} = 10.551 \text{ kW}$$

Es igual que en el apartado anterior, ocupando la ecuación del balance de energía se puede conocer el flujo másico y con él, junto con la macros REFPROP, completar el balance de masa y energía para el circuito geotérmico.

$$Q_{PHES} = \dot{m}_{geo} * C_{p_{Agua}} * (T_{G2} - T_{G1})$$

$$\dot{m}_{geo} = \frac{Q_{PHES}}{C_{p_{Agua}} * (T_{G2} - T_{G1})} = \frac{10.551 \frac{\text{kJ}}{\text{s}}}{4.186 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} * ^\circ\text{C}} * (17.2 - 10 \text{ } ^\circ\text{C})} = 0.35 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Tabla 17 Balance de masa y energía del sistema geotérmico en invierno (elaboración propia)

Estado termodinámico	G1	G2	G3
Estado físico	Líquido	Líquido	Líquido
Presión bar	11.84	4.82	4.82
Temperatura °C	10	10	17.2
Flujo másico kg/s	0.35	0.35	0.35
Entalpía kJ/kg	43.17	42.49	72.65

Con estos valores se dimensiona un equipo de intercambio de calor con el subsuelo que posee las siguientes características:

Tabla 18 Características del intercambiador geotérmico (Flores, 2021)

Capacidad TR	3
Material de Tubería	Cobre
Número de tubos	260
Diámetro in	5/8
Tipo de aleta	Recta
Aleta in	1 3/8

La geometría de este intercambiador es la siguiente:

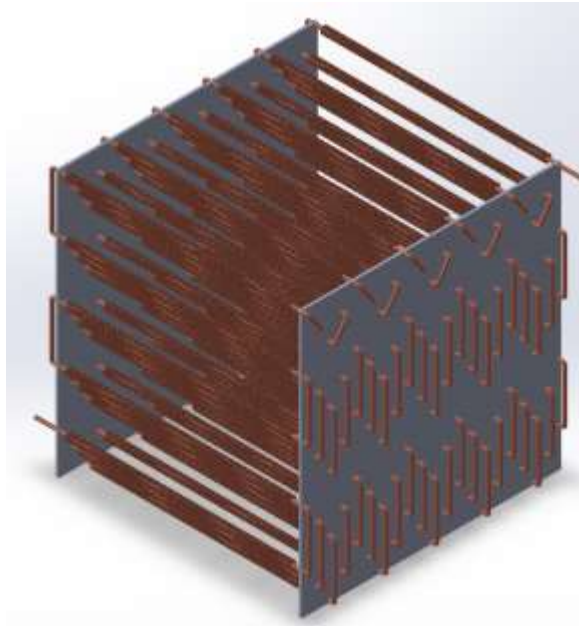


Imagen 105 Intercambiador geotérmico (Flores, 2021)

4.3.4 CÁLCULO TÉRMICO PARA EL VERANO

Durante la época de verano lo que se busca es que la temperatura del aire en el interior del recinto se encuentre menor a aquella del exterior, es por ello que se requiere que el intercambiador de calor que está dentro del hogar sea aquel que absorbe calor por lo tanto el equipo que se selecciona es el evaporador pues éste toma energía para que el refrigerante cambie de fase líquida a vapor. El segundo intercambiador que se debe tener en consideración es el de calor geotérmico el cual sirve como sumidero de calor para verter el exceso de temperatura en el subsuelo del lugar.

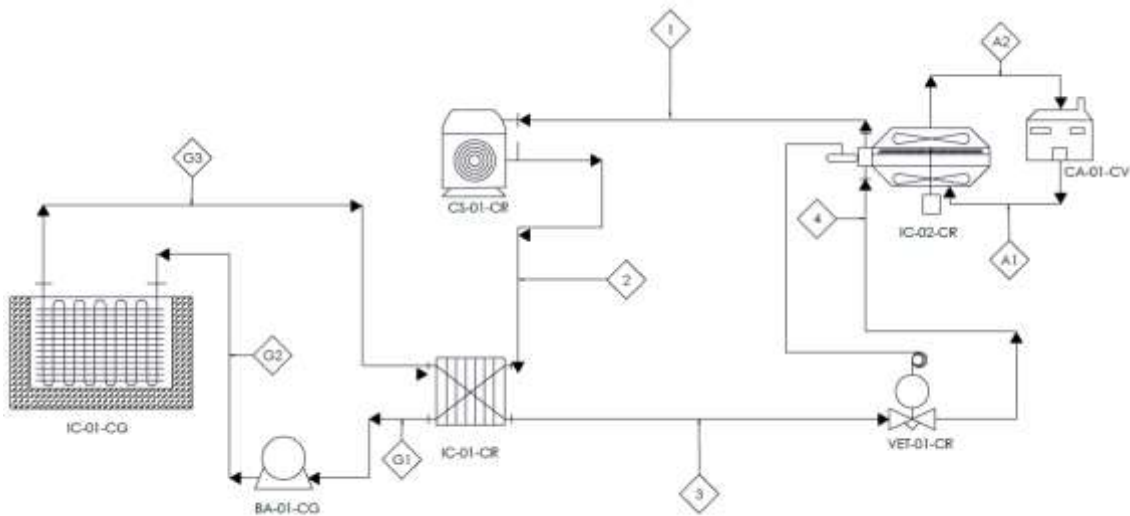


Imagen 106 Diagrama de flujo de proceso de la BCG en modo refrigeración (elaboración propia)

4.3.4.1 CÁLCULO DEL SISTEMA DE AIRE ACONDICIONADO EN VERANO

Tomando en consideración los datos de la Tabla 7 con los valores más comunes de temperatura en Compostela se seleccionó el valor máximo de temperatura; por lo que la temperatura del aire antes de ser condicionado es de:

$$T_{A1} = 38 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Mientras que, según la tabla de confort de ASHRAE, la temperatura a la que debe encontrarse una habitación para una buena comodidad del usuario es de 21 °C; sin embargo, y al igual que en el caso del invierno, se debe de considerar una temperatura que se inyecte por debajo de los 21°C para que así se llegue a este valor considerando ya las cargas térmicas por ventanas, techos y muros además del calor expedido por aparatos electrónicos y personas. El procedimiento para obtener el valor del aire de inyección se explicó con detenimiento en el apartado 4.3.2.2 TEMPERATURA DE AIRE DE INYECCIÓN por lo que:

$$T_{A2} = 11 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

De igual manera se conoce que la potencia del evaporador es de:

$$Q_{PA} = 10.551 \text{ kW}$$

Tomando en consideración la ecuación del balance de energía, se puede despejar y conocer el flujo másico.

$$Q_{PA} = \dot{m}_{aire} * C_{pAire} * (T_{A2} - T_{A1})$$

$$\dot{m}_{aire} = \frac{Q_{PA}}{C_{pAire} * (T_{A2} - T_{A1})} = \frac{10.5 \frac{kJ}{s}}{1.006 \frac{kJ}{kg * ^{\circ}C} * (11 - 38 \text{ }^{\circ}\text{C})} = 0.388 \frac{kg}{s}$$

Finalmente, haciendo uso de REFPROP, el balance de masa y energía del aire acondicionado en verano se muestra a continuación.

Tabla 19 Balance de masa y energía del aire acondicionado en verano (elaboración propia)

Estado termodinámico	A1	A2
Estado físico	Vapor	Vapor
Presión bar	1.01325	1
Temperatura °C	38	11
Flujo másico kg/s	0.388	0.388
Entalpía kJ/kg	311.54	284.36

4.3.4.2 CÁLCULO DEL SISTEMA GEOTÉRMICO EN VERANO

Al igual que en el aire, el subsuelo varía sus propiedades de acuerdo a la época del año ya que en verano el equipo cederá calor del subsuelo llevando a cabo la condensación.

Siguiendo la misma investigación del ing. Armando Saldívar se debe considerar que la temperatura de entrada del agua en el intercambiador de calor del subsuelo en verano es:

$$T_{G1} = 38 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Mientras que la temperatura de salida del agua en el intercambiador de calor del subsuelo en invierno es:

$$T_{G3} = 24.7 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

La potencia del condensador que está en contacto con el circuito geotérmico es la misma que la que posee el intercambiador de calor geotérmico, por lo tanto:

$$Q_{PHES} = Q_{PB} = 13.05 \text{ kW}$$

E igual que en el apartado anterior, ocupando la ecuación del balance de energía se puede conocer el flujo másico y con él, junto con la macros REFPROP, completar el balance de masa y energía para el circuito geotérmico.

$$Q_{PHES} = \dot{m} * C_{p_{Agua}} * (T_{G2} - T_{G1})$$

$$\dot{m} = \frac{Q_{PHES}}{C_{p_{Agua}} * (T_{G2} - T_{G1})} = \frac{13.05 \frac{\text{kJ}}{\text{s}}}{4.186 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} * ^{\circ}\text{C}} * (24.7 - 38 \text{ }^{\circ}\text{C})} = 0.234 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Tabla 20 Balance de masa y energía del sistema geotérmico en verano (elaboración propia)

Estado termodinámico	G1	G2	G3
Estado físico	Líquido	Líquido	Líquido
Presión bar	1.01	0.196	0.196
Temperatura °C	38	38	24.7
Flujo másico kg/s	0.234	0.234	0.234
Entalpía kJ/kg	159.26	159.34	103.66

Y, de igual manera, con estos parámetros se obtiene nuevamente el intercambiador mostrado en la sección 4.3.3.2 CÁLCULO DEL SISTEMA GEOTÉRMICO EN INVIERNO.

4.4 DIAGRAMA DE TUBERÍAS E INSTRUMENTACIÓN

Para el correcto diseño de la bomba se debe colocar la instrumentación en conjunto con los equipos de medición que tienen como propósito llevar a cabo el control de la BCG 3 TR. De igual manera se incluyen dos DTI dependiendo de la época del año, ya sea para verano o invierno.

3.4.1 DTI EN INVIERNO

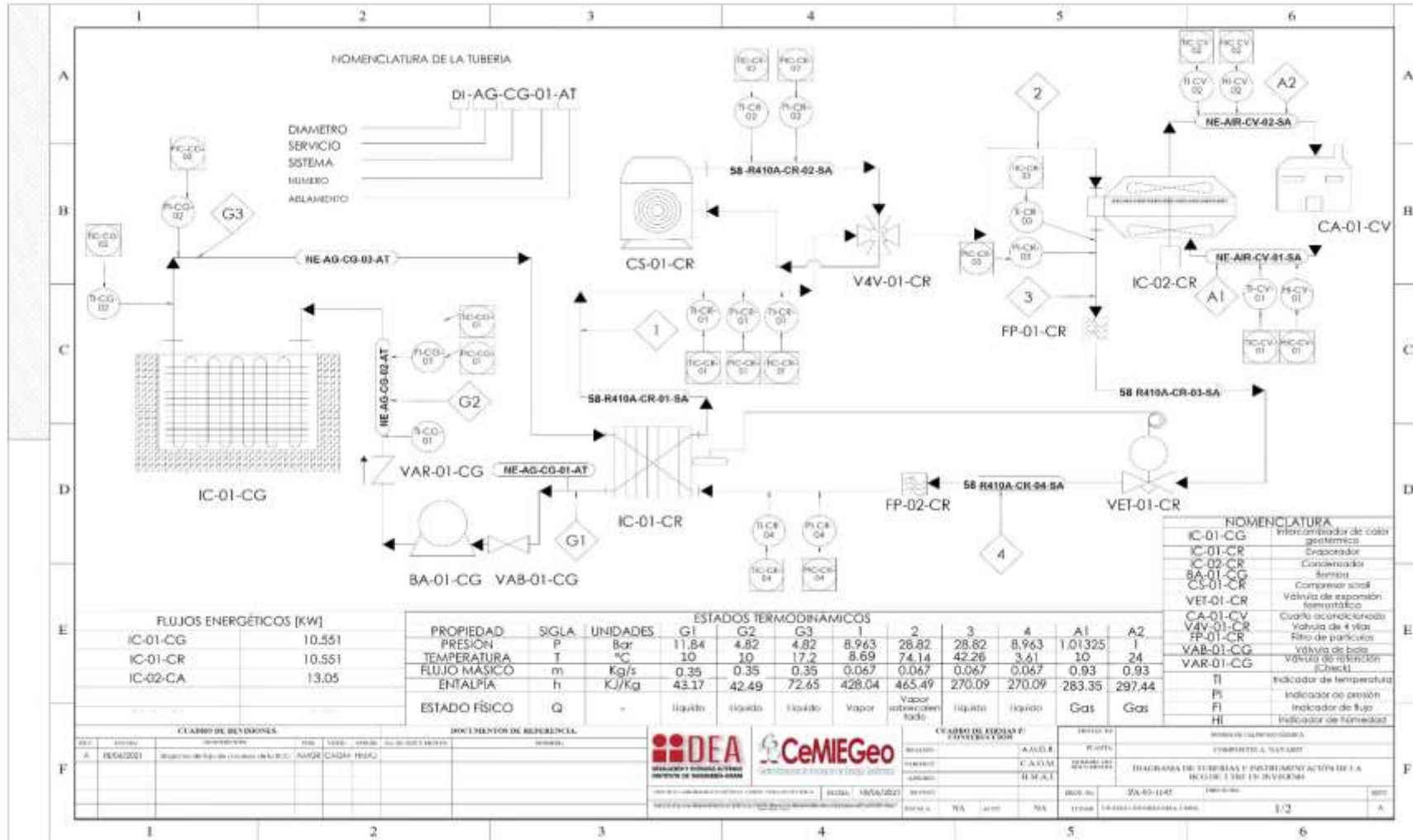


Imagen 107 DTI de la BCG 3 TR en invierno (elaboración propia)

3.4.2 DTI EN VERANO

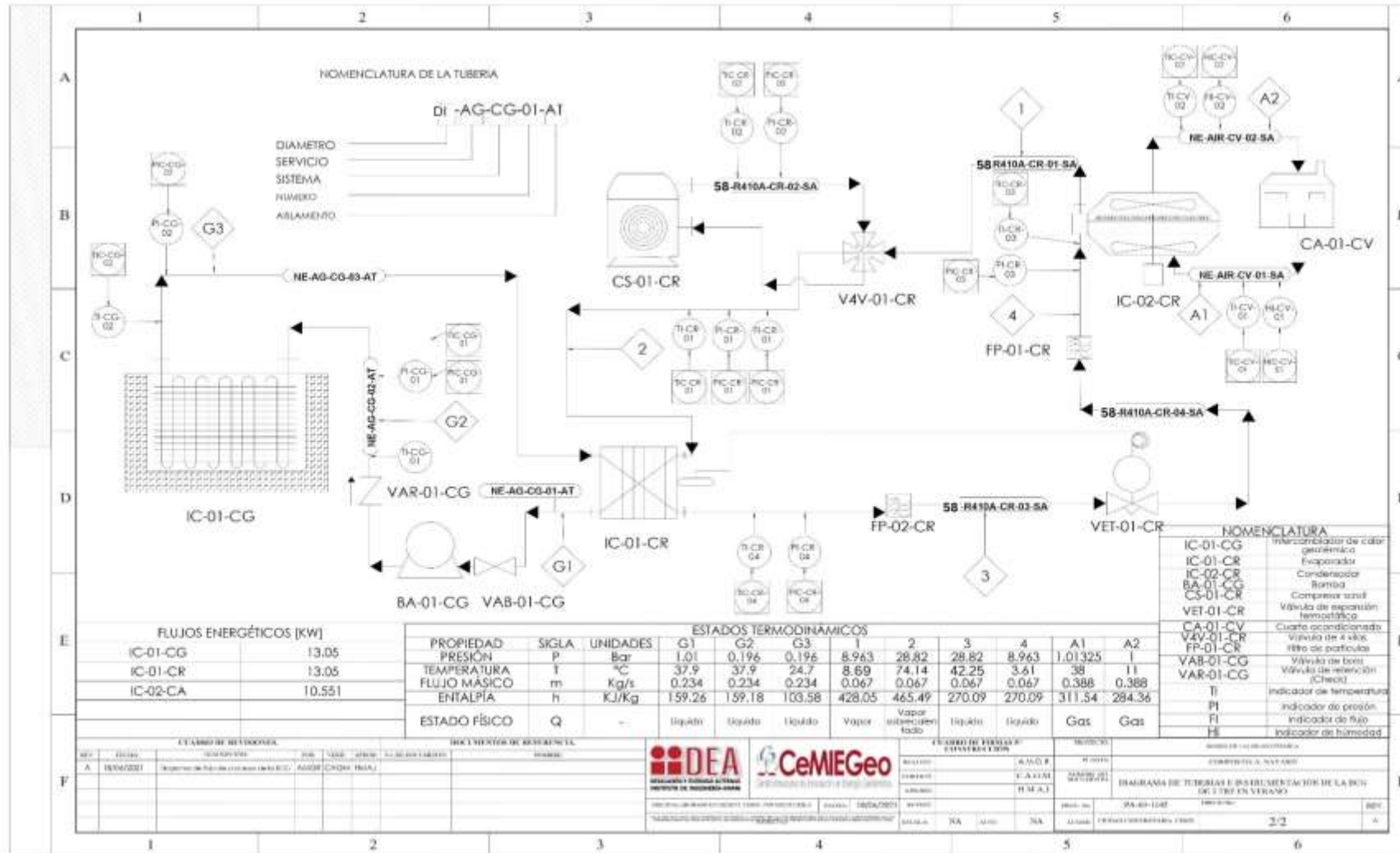


Imagen 108 DTI de la BCG 3 TR en verano (elaboración propia)

4.5 ESPECIFICACIÓN DE AISLAMIENTO

Para llevar a cabo el aislamiento térmico y acústico en la bomba, evitando así una gran transferencia de calor y ruido a los exteriores arriesgando la salud y confort de las personas que la adquieran, se hace uso de lana mineral.

Los productos de Lana Mineral o Lana de Roca son aislamientos térmicos y acústicos formados principalmente por fibras minerales de roca (Centro, 2021). Su origen mineral y composición química aseguran una perfecta estabilidad a altas temperaturas (650 °C / 1100 °F). Son químicamente inertes y resistentes a los agentes externos. Sus características los hacen resistentes a vibraciones y son estables aún en medios húmedos. No poseen contraindicaciones de ninguna índole por razones de higiene y seguridad, ni exigen precauciones especiales para su uso. (RATSA, 2021)

En las tuberías se decidió poner espuma elastomérica, este material se usa para retardar el aumento de temperatura e impedir la condensación o formación de escarcha en tuberías de agua fría, agua enfriada y tuberías de refrigeración. Además, reduce el flujo de calor para las tuberías de agua caliente y calentamiento de líquidos (INSUL-TUBE). El espesor mínimo de aislamiento de tuberías de diámetro exterior menor o igual a 25 mm y de longitud menor de 10 m, contada a partir de la conexión a la red general de tuberías hasta la unidad terminal será de 10 mm (armacell); las tuberías dentro de la bomba de calor geotérmica cumplen con las condiciones descritas anteriormente es por ello que se decidió seguir las indicaciones del valor del espesor.



Imagen 109 Lana mineral para aislar las paredes y techo de la bomba (Skintec, 2022)



Imagen 110 Espuma elastomérica que aísla las tuberías (ACMISA, 2022)

4.6 ESPECIFICACIÓN DE REFRIGERANTE (LLENADO)

En el apartado 4.3.1.1 SELECCIÓN DEL REFRIGERANTE (R410a Y R32) se mencionó con profundidad las características que el refrigerante R-410a posee; sin embargo, el proceso que se tiene al momento de querer introducir el refrigerante dentro de la BCG tiene una serie de pasos que se tienen que seguir al pie de la letra para evitar problemas.

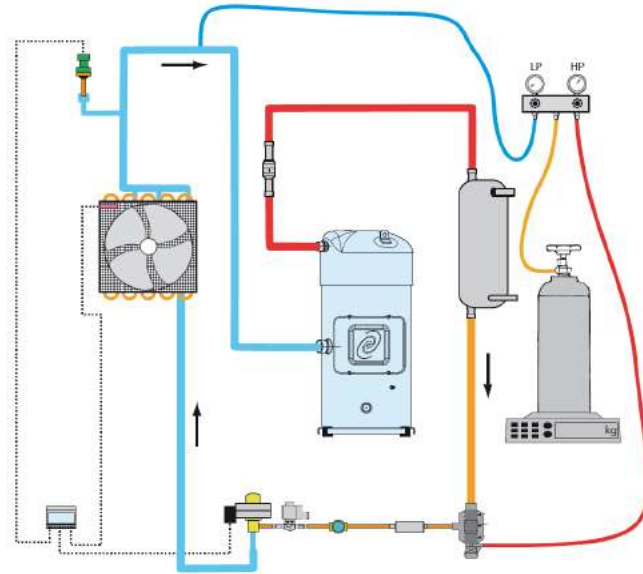


Imagen 111 Posición de las válvulas para el llenado del refrigerante (SACIFIA, 2022)

La Imagen 111 enseña que las válvulas para llenar de refrigerante la bomba se deben localizar en la tubería de baja y alta presión (entrada y salida del compresor respectivamente); de igual manera es crucial mencionar que todo este proceso se debe realizar con la mayor precaución posible y ocupando equipo de seguridad como guantes, careta y bata.

Los materiales que se requieren para hacer esta tarea son:

- Juego de manómetros estándar (manifold).



Imagen 112 Manifold (FRILAV, 2022)

- Báscula electrónica de carga de refrigerante.



Imagen 113 Báscula para carga de refrigerante (mercadolibre, Elitech Lmc-200a Báscula Electrónica De Carga De Refrigerant, 2022)

- Tanque con refrigerante.



Imagen 114 Tanque de refrigerante R-410a (mercadolibre, Gas Refrigerante Boya Genetron R410a Quimobasicos 5.0 Kg, 2022)

- Bomba de vacío.



Imagen 115 Bomba de vacío (TRS, 2022)

1. El primer paso que se hace para el llenado del refrigerante es, realizar el vacío a los equipos y tuberías al interior de la bomba de calor.
 - a. Llenar de aceite hasta donde indique la mirilla de la bomba de vacío.
 - b. Conectar manguera azul a la válvula de la tubería de baja presión (succión del compresor).
 - c. Conectar manguera roja a la válvula de la tubería de alta presión (salida del compresor).
 - d. Conectar manguera amarilla o de servicio al puerto de la bomba de vacío.
 - e. Abrir completamente el manifold.
 - f. Prender bomba de vacío.
 - g. Dejar este proceso durante dos horas.
2. Una vez que se termina este procedimiento se prosigue al llenado de refrigerante al equipo.
 - a. Cerrar llaves del manifold.
 - b. Apagar bomba de vacío.
 - c. Desconectar manguera de servicio de la bomba y conectarla a la boya de refrigerante.
 - d. Abrir válvula de la boya.
 - e. Aflojar la manguera amarilla del manifold para purgar el aire (este paso es rápido, aproximadamente dos segundos)

- f. Voltar la boya de cabeza, esto se debe a que el refrigerante R-410a es una mezcla y debe entrar al circuito de manera líquida. Se recomienda que esté a una altura mayor que la bomba para que la gravedad ayude al refrigerante a fluir.
- g. Configurar la balanza para que marque cero.
- h. Abrir ambas llaves del manifold hasta que la balanza marque la carga de refrigerante estipulada.
- i. Cuando se esté llegando a la carga deseada empezar a cerrar poco a poco las llaves del manifold.
- j. Cerrar completamente las válvulas del manifold.
- k. Volver a voltear la boya a una posición normal y retirar la manguera de servicio.

4.7 SELECCIÓN DE EQUIPOS

Después de haber pasado por todo el proceso de cálculo y diseño de la BCG se tomó la decisión de encontrar los equipos que mejor se adecuaron a lo que se está buscando conseguir con el diseño de la bomba. Los equipos seleccionados se mencionan a continuación.

4.7.1 COMPRESOR

El compresor que se seleccionó para formar parte de la bomba de calor fue el scroll debido a que se utilizan para potencias térmicas de hasta 30 kW (Zárraga, 2009), son herméticos (se aprovecha más el calor generado en el motor), permiten la aspiración y descarga simultánea sin necesidad de una válvula; debido a su reducción en partes móviles el desgaste es casi mínimo lo que aumenta tanto su eficiencia como duración, son silenciosos (mejor para una aplicación residencial) y presentan mejoras en el control de la temperatura y humedad.

El compresor que se busca tiene las siguientes características:

Tabla 21 Características que debe cumplir el compresor (elaboración propia)

COMPRESOR SCROLL	
Refrigerante	R-410a
Presión de baja bar	8.963
Presión de alta bar	28.82
Relación de compresión	3.21
Potencia del compresor HP	3.35
Potencia del motor HP	4.65
Fase	Monofásico

El equipo que se seleccionó fue el siguiente:

Tabla 22 Selección de compresor Scroll (elaboración propia)

PROVEEDOR	MODELO	CAPACIDADES	TOTAL MXN
Danfoss	HRH036U1	208-230 V 1	\$ 35,050.00

Este compresor fue primero el resultado del software de selección de *Danfoss “CoolSelector2”* donde solamente se ingresaron los datos del refrigerante, presión de alta y baja además de la temperatura de sobrecalentamiento y subenfriamiento.

El compresor se muestra en la siguiente imagen:



Imagen 116 Compresor Danfoss HRH036U1 (Equipo dentro de la BCG 3 TR)

4.7.2 CONDENSADOR

El intercambiador de placas fue la mejor opción que encontramos para la bomba de calor; los demás condensadores presentan grandes pérdidas de presión y al contar con aletas pequeñas las incrustaciones pueden hacerse presentes ya que al pasar líquido es posible que partículas se arrastren y obstruyan a las aletas provocando una disminución en la eficiencia del equipo. En cambio, un condensador de placas controla las pérdidas de presión de una mejor manera y al estar soldadas resisten mayores presiones y esto es algo que se requiere en un ciclo de refrigeración pues el refrigerante al salir del compresor va presurizado, además es compacto y su mantenimiento es más sencillo. El condensador debe poseer las siguientes características:

Tabla 23 Características del condensador (elaboración propia)

CONDENSADOR	
Refrigerante	R-410a
Potencia kW	13.05
Aplicación	A/C

El intercambiador de calor por el que se decidió fue uno marca “FC” pues posee las características siguientes:

Tabla 24 Selección de condensador (elaboración propia)

PROVEEDOR	MODELO	CAPACIDADES	PRECIO MXN
Friguscenter	FC-3-P-1C	R-410a, 3 TR; presión de diseño 435 psi; número de placas: 32	\$ 11,920.00



Imagen 117 Intercambiador de placas FC

4.7.3 EVAPORADOR

Se conoce que es un intercambiador de calor que transfiere calor de la sustancia que se desea enfriar al refrigerante que se evapora, la remoción de calor (efecto refrigerante) se lleva a cabo en este equipo.

El evaporador que se seleccionará debe poseer las características siguientes:

Tabla 25 Características del evaporador (elaboración propia)

EVAPORADOR	
Refrigerante	R-410a
Potencia kW	10.551
Aplicación	A/C

El evaporador se mandó a fabricar con la compañía 'Radiadores Espinosa' ya que no se pudo encontrar algún proveedor que vendiera estos equipos de línea. Dicho intercambiador se diseñó en el siguiendo el procedimiento mostrado en la tesis *Diseño y construcción de un evaporador para refrigeración de tiro forzado y expansión directa* de Fernando Gordillo Díaz y Silvio Rodrigo Patiño Orejuela.

Los resultados que se obtuvieron siguiendo la metodología en la tesis son los siguientes:

Tabla 26 Dimensionamiento del intercambiador de tubos y aletas

DIMENSIONES DEL EVAPORADOR		
Dimensión aleta	Ancho mm	65
	Altura mm	450
Longitud del panel aletado mm		550
Atura de la aleta mm		500
Espesor de las aletas mm		1
Paso entre aletas mm		2
Diámetro de los tubos in		¼
Número de aletas		274
Número de tubos		54
Material tubos		Cobre
Material aletas		Aluminio

El diseño del intercambiador de tubos y aletas que se obtuvo a partir de estos parámetros se muestra en la siguiente imagen.



Imagen 118 Intercambiador de tubos y aletas sin cubierta (elaboración propia)

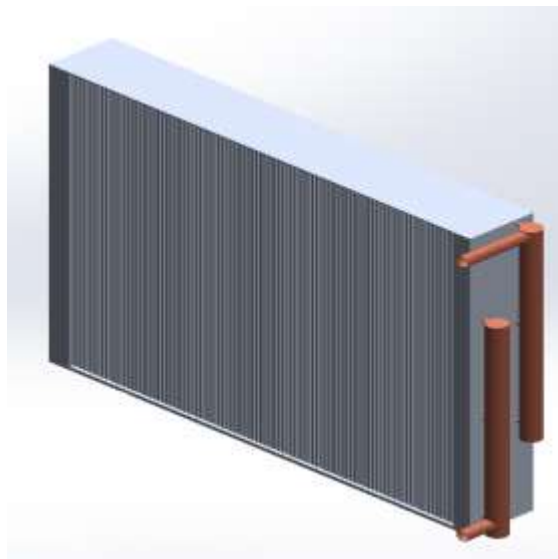


Imagen 119 Intercambiador de tubos y aletas con cubierta (elaboración propia)

El intercambiador que se mandó a fabricar fue el siguiente.

Tabla 27 Fabricación del evaporador (elaboración propia)

MARCA	CLAVE	DESCRIPCIÓN	TOTAL MXN
Radiadores Espinosa	25174000	Fabricación de evaporador con tubo de cobre, aleta de aluminio	\$ 24,970.00

La imagen siguiente muestra el intercambiador real que se obtuvo siguiendo las dimensiones que se mostraron anteriormente.



Imagen 120 Intercambiador de tubos y aletas físico

4.7.4 VÁLVULA DE EXPANSIÓN

Para nuestro sistema el tubo capilar no se tomó en cuenta debido a que no son ajustables a cambios en las condiciones de operación, es decir, se requiere que la carga de refrigerante se mantenga casi constante y son susceptibles a obstruirse fácilmente debido a su área seccional pequeña (Hernández A. M., 1990), es por ello que se decidió instalar una válvula termostática que cumpla con ser bidireccional para así funcionar en las bombas de calor.

La válvula debe cumplir con los siguientes criterios:

Tabla 28 Características de la válvula de expansión (elaboración propia)

VÁLVULA DE EXPANSIÓN	
Refrigerante	R-410a
Caída de presión bar	19.857
Capacidad del evaporador kW	10.551
Presión de evaporación bar	8.963
Presión de condensación bar	28.82

Las válvulas de expansión que mejor se integran con el ciclo de refrigeración tiene las siguientes características:

Tabla 29 Selección de la válvula de expansión (elaboración propia)

MARCA	MODELO	CAPACIDAD NOMINAL TR	TOTAL MXN
SPORLAN	ERZ-3	3	\$3,484.00



Imagen 121 Válvula de expansión SPORLAN

4.7.5 TUBERÍAS

Las tuberías de cobre que se seleccionaron para acarrear el refrigerante R-410a a lo largo del ciclo de la bomba de calor tienen que poseer una gran densidad, resistencia a la compresión, altos grados de limpieza al igual que paredes uniformes ya que la presión generada por este refrigerante es 1.6 veces mayor que la del R-22 el cual ocupa tuberías de cobre ordinarias (Yu, 2020).

Es por ello que la aleación de cobre más utilizada con este refrigerante es la No. C12200 (cobre desoxidado con fósforo) compuesto por 99.9% de cobre (Cu) y 0.02% de Fósforo (P), este cobre es el material de excelencia para la transferencia de calor del vapor al agua o aire debido a su resistencia a la corrosión y gran capacidad de conductividad térmica (Metalium, 2020).

La tubería que más comúnmente se usa en los equipos de HVAC son del *tipo L*, debido a que tiene paredes más gruesas y un índice de presión más alto.

La información del proveedor que se escogió es la siguiente:

Tabla 30 Selección de tuberías (elaboración propia)

PROVEEDOR	CANTIDAD	DESCRIPCIÓN	TOTAL MXN
IRL	2 m	Tubo flexible de cobre tipo L de 5/8" x 15.24 m	\$244.88

La imagen siguiente muestra los rollos de tubería que se encuentran en las inmediaciones del laboratorio.



Imagen 122 Rollos de tubería de cobre tipo L

4.7.6 VÁLVULA DE CUATRO VÍAS

Se ha mencionado con anterioridad que este dispositivo es considerado el corazón de las bombas de calor pues es el que provoca que los intercambiadores modifiquen su posición para actuar como evaporador o condensador.

Las características de la válvula de cuatro vías que se seleccione deben ser:

Tabla 31 Características de la válvula de cuatro vías (elaboración propia)

VÁLVULA DE CUATRO VÍAS	
Refrigerante	R-410a
Coficiente caudal kg/s	0.067

La válvula de cuatro vías seleccionada fue gracias al proveedor IRL quien hizo la propuesta de un equipo que cumple con los requerimientos que el circuito de la bomba de calor necesita. La válvula seleccionada se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 32 Selección de la válvula de cuatro vías (elaboración propia)

MARCA	MODELO	DESCRIPCIÓN	TOTAL MXN
DANFOSS	STF-H0351	Válvula de expansión 4 vías 3 TR R.410 5/8x1/2 OD	\$3,548.00

La siguiente fotografía muestra la válvula de cuatro vías seleccionada:



Imagen 123 Válvula de cuatro vías seleccionada

4.7.7 FILTROS

Como se mencionó con anterioridad los filtros filtran las partículas y los residuos que fluyen en el circuito y también absorben cualquier humedad.

Se acudió con el proveedor ‘EQUIPOS DE REFRIGERACIÓN CUITLAHUAC, S.A. DE C.V.’ el cual confirmó la existencia y disponibilidad dentro de territorio nacional del filtro deshidratador marca SPORLAN de 3 a 5 TR.

Tabla 33 Selección de filtro deshidratador (elaboración propia)

MARCA	MODELO	DESCRIPCIÓN	TOTAL MXN
SPORLAN	C-163-S	Deshidratador 3 a 5 TR 3/8 S SPORLAN	\$1,149.00



Imagen 124 Filtro deshidratador SPORLAN

4.7.8 VENTILADOR

El ventilador en la bomba de calor geotérmica es el encargado de succionar el aire para que este pase por el radiador y después sea expulsado para así climatizar el ambiente del recinto ya sea en modo calefacción o refrigeración.

Los tipos de ventiladores que se consideraron para la construcción de la BCG fueron aquellos que atienden a la trayectoria del aire enfocándose principalmente en los axiales o los centrífugos. En los ventiladores centrífugos el aire entra en dirección axial y sale en dirección radial mientras que en los axiales el flujo de aire sigue la dirección del eje del ventilador (S&P, ¿Cuál es el mejor ventilador? Conoce los tipos de ventiladores, 2018). El ventilador que se seleccionó fue un ventilador centrífugo, ya que tiene más capacidad de brindar el flujo necesario para llenar el recinto, con ayuda del software de selección de Soler & Palau “*EasyVent*” en el cual se tiene que especificar diferentes parámetros, por ejemplo:

Tabla 34 Parámetros para la selección de ventilador (elaboración propia)

CAUDAL kg/s	0.388
PRESIÓN Pa	122.5 ²⁴
CONDICIONES DEL AIRE $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$	1.01

A continuación, se adjuntan capturas de pantalla con el software selector de Soler & Palau ingresando los datos que se mencionaron con anterioridad.

²⁴ Valor típico utilizado dentro del aire acondicionado según el ing. Rodrigo de Bengoechea.

- Criterios de selección

Hertz **60 HZ**

Caudal

Tolerancia -20% 20%

Presión

Tolerancia -20% 20%

Condiciones del aire

Ref:

Seleccionar Reiniciar

Imagen 125 Captura de pantalla del software EasyVent para la selección del ventilador

Y con lo cual dio como mejor resultado la opción el ventilador 5CEB2000.



Imagen 126 Ventilador centrífugo S&P (S&P, Centrífugos serie CEB-T, 2021)

Tabla 35 Selección de ventilador (elaboración propia)

MARCA	MODELO	PRECIO MXN
S&P	5CEB-2000-CEB-2000 (127~1)	\$12,780.00

4.8 LISTA DE MATERIALES Y PRECIO FINAL DE LA BCG 3 TR

Tabla 36 Precio total de los equipos principales dentro de la BCG 3 TR (elaboración propia)

Lista de materiales real para la BCG 3 TR					
LISTA DE MATERIALES Y PRECIO PARA LA MANUFACTURA DE LA BCG 3 TR					
No.	Descripción	Cantidad	Unidad	Precio unitario	Importe
1	Tornillos autoperforantes acero al carbón No.8 x 1/2" (1 pzas.)	100	Caja	\$ 0.46	\$ 46.40
2	Perfil Zintro 1"x1" Cal. 16 x6.10 m	3	Pieza	\$ 960.00	\$ 2,880.00
3	Lámina galvanizada cal.24 (1.22x2.44m)	2	Pieza	\$ 1,300.00	\$ 2,600.00
4	Tubo flexible de cobre tipo L de 5/8"x1m (rollo)	2	Pieza	\$ 122.44	\$ 244.88
5	Válvula de expansión 4 vías 3 TR R-410 7/8" x 1/2" OD	1	Pieza	\$ 3,548.00	\$ 3,548.00
6	Compresor Danfoss Scroll 3HP-10 220/1/60 (AC)	1	Pieza	\$ 35,050.00	\$ 35,050.00
7	Intercambiador de calor placas Brazed Plate Heat Exchanger R410, 3 TON, 1 circuito, marca "FC" (aplicación agua-refrigerante)	1	Pieza	\$ 11,920.00	\$ 11,920.00
8	Deshidratador 3 a 5 TR 3/8" Sporlan	1	Pieza	\$ 1,149.00	\$ 1,149.00
9	Válvula de expansión EMERSON 3 TR R-410	1	Pieza	\$ 3,484.00	\$ 3,484.00
10	Ventilador Soler & Palau 5CEB-2000	1	Pieza	\$ 12,780.00	\$ 12,780.00
11	Fabricación de evaporador de cobre y aluminio	1	Pieza	\$ 24,970.00	\$ 24,970.00
12	Filtro de aire plisado 20"x 20"x 2" MERV8 Capacidad std. Material del marco cartón, material de la microfibra flujo de aire a 300PPM 1000 PCM	1	Pieza	\$ 463.00	\$ 463.00
13	Reducción campana de cobre 5/8" x 3/8"	4	Pieza	\$ 21.00	\$ 84.00
14	Reducción campana de cobre 5/8" x 3/4"	4	Pieza	\$ 39.00	\$ 156.00
15	Reducción campana de cobre 5/8" x 7/8"	4	Pieza	\$ 28.00	\$ 112.00
16	Hembras de latón 1"	4	Pieza	\$ 93.00	\$ 372.00
17	Manguera industrial de 1" x 1 m	0.5	m	\$ 63.00	\$ 31.50
18	Insultube 5/8" x 1/2" Espesor x 1.80 m Cerrado	0.5	Pieza	\$ 300.00	\$ 150.00
19	Insultube 3/8" x 1/2" Espesor x 1.80 m Negro	0.5	Pieza	\$ 278.00	\$ 139.00
20	Válvulas de servicio para llenado de refrigerante	2	Pieza	\$ 40.00	\$ 80.00
TOTAL					\$ 100,259.78

La Tabla 36 muestra la suma total del precio de los equipos principales que conforman a la bomba de calor; en ella, no se incluyen los precios de los equipos que se adquirieron para hacer uso de ellos por mucho tiempo y con mucha frecuencia cuando se dedica a la fabricación de las bombas de calor, pues estos, aumentaban en gran medida el precio de la bomba. Asimismo, dentro de esta tabla se excluyen los consumibles que se usan en la manufactura de la BCG, sin embargo, en las siguientes tablas se incluyen estos gastos.

Tabla 37 Lista de equipos que se usan en la fabricación de la bomba de calor (elaboración propia)

Lista de materiales real para la BCG 3 TR					
LISTA DE EQUIPOS					
No.	Descripción	Cantidad	Unidad	Precio unitario	Importe
1	Tanque de oxiacetileno	1	Pieza	\$ 23,654.00	\$ 23,654.00
2	Refrigerante Gefriren 140 Boya de 11.3 kg	1	Pieza	\$ 3,834.00	\$ 3,834.00
3	Manifold Yellow Jacket R-410 Mangueras de 60"	1	Pieza	\$ 7,355.00	\$ 7,355.00
4	Bomba de vacio Redco 6CFM 1/2 HP 115/220 V 2Etapas	1	Pieza	\$ 11,110.00	\$ 11,110.00
5	Báscula para refrigerante	1	Pieza	\$ 9,000.00	\$ 9,000.00
6	Cilindro tipo M para nitrógeno industrial	1	Pieza	\$ 22,618.00	\$ 22,618.00
TOTAL					\$ 77,571.00

Tabla 38 Consumibles en la fabricación de la bomba de calor (elaboración propia)

Lista de materiales real para la BCG 3 TR					
CONSUMIBLES					
No.	Descripción	Cantidad	Unidad	Precio unitario	Importe
1	Electrodo revestido 6013 de 1/16" Convertida a 3/32" (1 kg)	0.25	Caja	\$ 95.00	\$ 23.75
2	Soldadura de estaño para soldar cobre rollo (0.45kg)	0.25	Pieza	\$ 400.00	\$ 100.00
3	Soldadura fosco de 1/16" para soldar cobre tipo "L"	25	Pieza	\$ 12.00	\$ 300.00
TOTAL					\$ 423.75

Cabe mencionar que a estos importes aún se le debe sumar los componentes electrónicos y la mano de obra para poder tener un alcance más realista; sin embargo, esto no es el objetivo ni alcance de esta tesis es por ello que solo se consideró lo mostrado en las tablas anteriores.

4.9 PROGRAMA DE ENSAMBLE

Se mostrará cómo se llevó a cabo el ensamblaje de la BCG 3 TR a partir de los componentes que la conforman desde la estructura hasta las conexiones de tubería entre los equipos. La estructura se encuentra formada por PTR calibre 16 1"x1" para después ser soldada y acomodada como lo muestra la Imagen 127.



Imagen 127 PTR con el que se forma la estructura de la BCG 3 TR (elaboración propia)

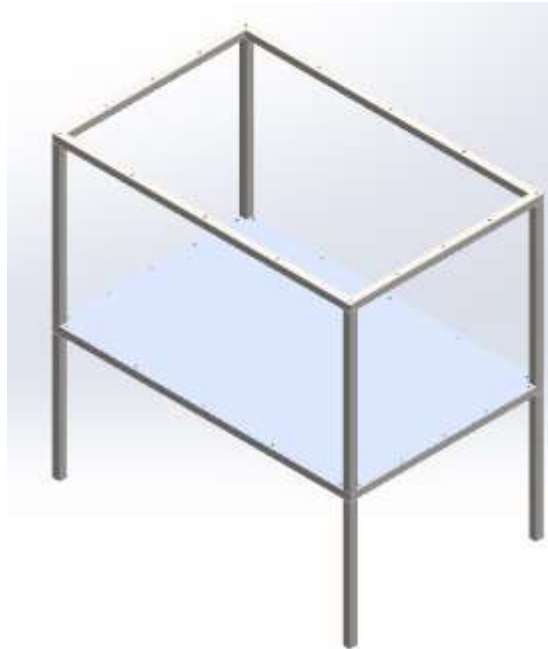


Imagen 128 Lámina inferior para el acomodo de los equipos (elaboración propia)

La Imagen 128 muestra la primera lámina de acero galvanizado que tiene que atornillarse por medio de los tornillos autoperforantes a la estructura de PTR; este primer paso se realiza con el propósito de acomodar los equipos más grandes al interior de la bomba de calor.

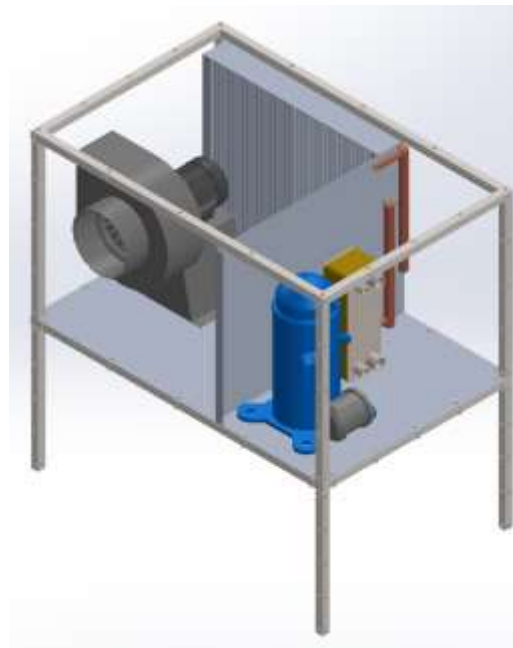


Imagen 129 Acomodo de los equipos más grandes al interior de la BCG 3 TR (elaboración propia)

La imagen anterior muestra el acomodo propuesto de los equipos más grandes dentro de la bomba de calor para así medir el espacio disponible para los demás equipos y la tubería de cobre que los interconectará. Asimismo, en la misma imagen se observa una pared interna, que irá atornillada tanto a la lámina inferior como al PTR, de medidas 568.28 mm x 511.21 mm con el propósito de separar al evaporador y el ventilador de los demás equipos para que así solamente el aire atraviese el intercambiador con el que tendrá interacción y no influya la temperatura despedida por los demás equipos o las tuberías.

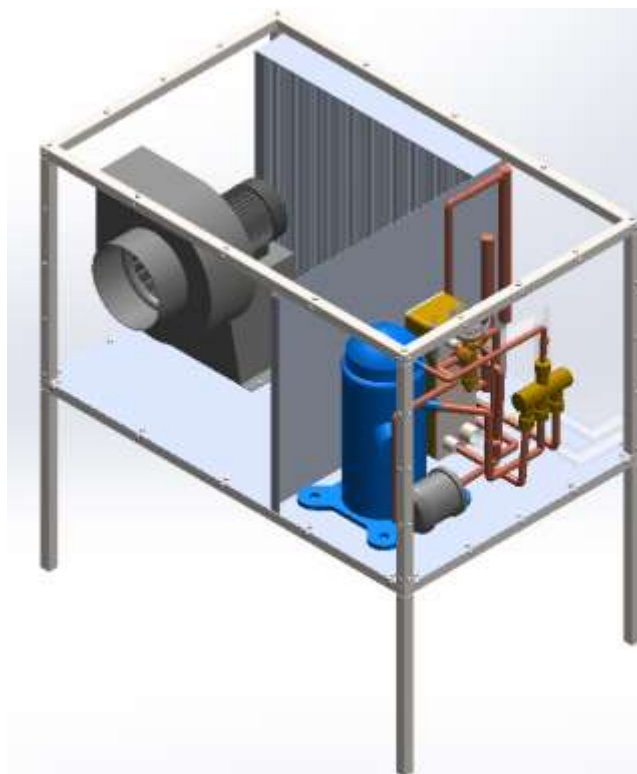


Imagen 130 Conexión de tuberías de equipos (elaboración propia)

Se realizó la conexión, por soldadura de oxiacetileno, de los equipos por medio de las tuberías de cobre tipo L de 5/8" como lo muestra la Imagen 130; igualmente, se incluyen las Tees donde se pondrán las válvulas con las que el refrigerante se llenará, estas se encuentran localizadas en la zona de baja y alta presión, es decir, a la entrada y salida del compresor respectivamente, esto se puede ver en la Imagen 131.

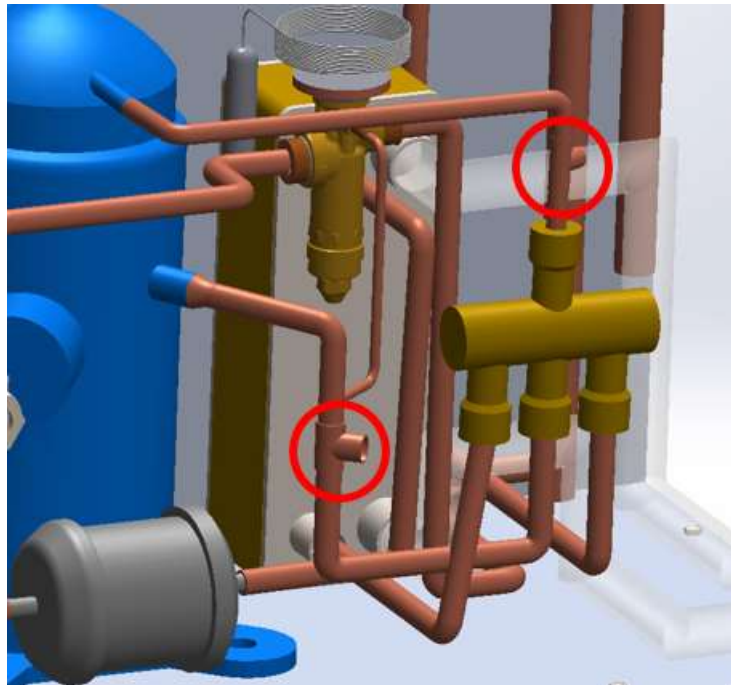


Imagen 131 Localización de las Tees donde se realiza la carga de refrigerante (elaboración propia)

Es importante dejar en claro las entradas y salidas de los equipos. La imagen siguiente muestra las tuberías de entrada y salida del agua que pasará por el intercambiador geotérmico; las mangueras que se conectarán con dicho intercambiador son de plástico PVC de 1", se escogieron de este material debido a que no se manejarán presiones muy grandes ni temperaturas elevadas, además de que el líquido que fluye dentro de ellas es agua.

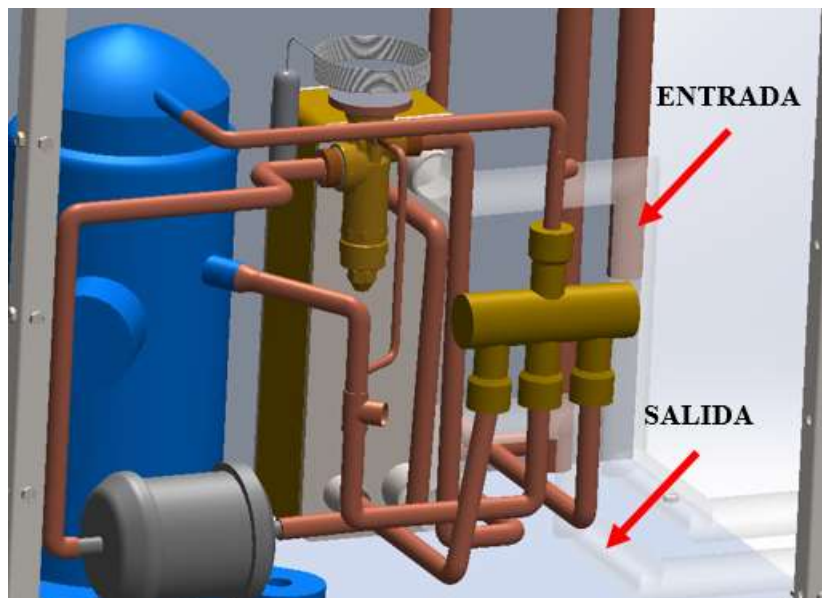


Imagen 132 Tuberías de entrada y salida para el ciclo geotérmico (elaboración propia)

Una vez que se interconectaron con tubería de cobre los equipos, se hizo el llenado de refrigerante y se conectaron toda la parte eléctrica, se decidió cerrar con las láminas faltantes el resto de la bomba de calor, sin antes olvidar que estas láminas vienen aisladas con lana mineral. Las láminas de acero galvanizado calibre 24, se requieren dos de 562.7 mm x 650 mm, 562.7 mm x 1000 mm mientras el techo de la BCG será de 650 x 1000 mm.

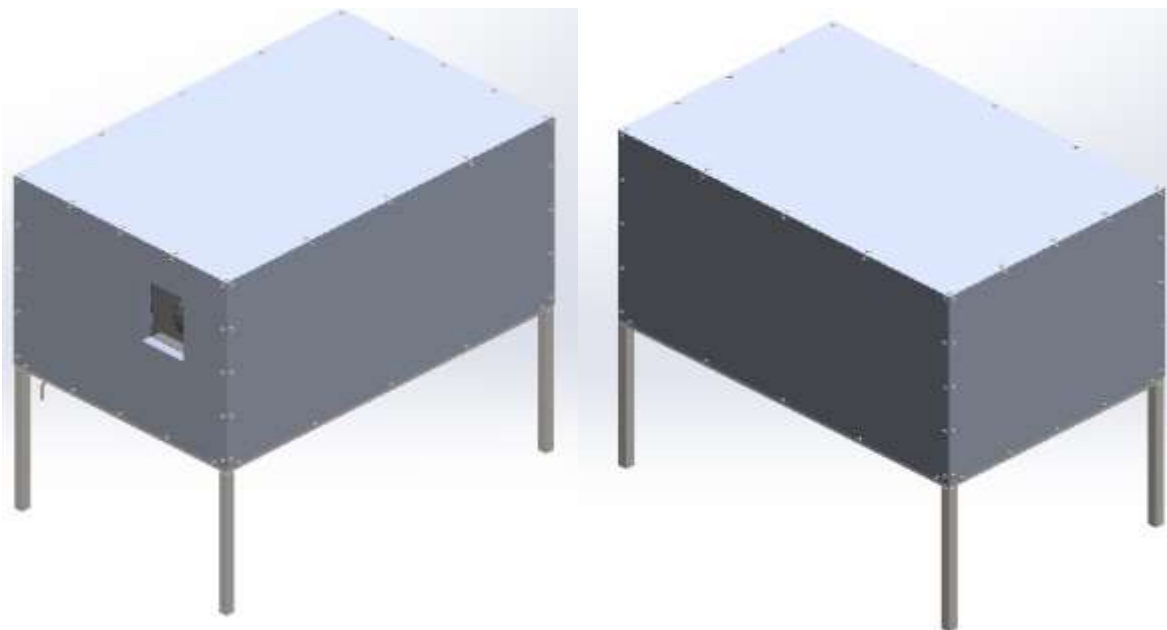


Imagen 133 BCG 3 TR (elaboración propia)

La pared posterior de la BCG 3 TR debe tener un hueco por el cual se pueda observar el evaporador pues es con este equipo con el que el aire tendrá el contacto directo. De igual manera se recomienda la colocación de un filtro de aire a la salida del evaporador para así no tener problemas de suciedad a la succión del aire.

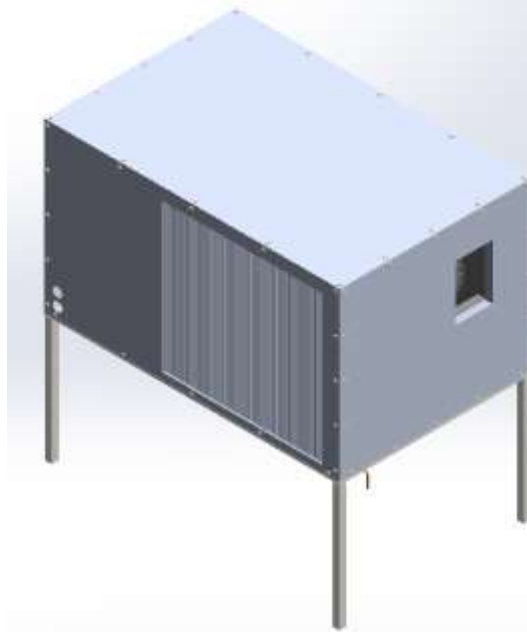


Imagen 134 Espacio en la lámina para permitir el libre flujo de aire por el intercambiador de tubos y aletas (elaboración propia)

Finalmente, el circuito completo, incluyendo el intercambiador geotérmico, la BC y suponiendo su instalación en sitio quedará como lo muestra la Imagen 135; sin embargo, para fines de esta tesis, el circuito geotérmico se simulará dentro del laboratorio como se muestra en el capítulo siguiente.

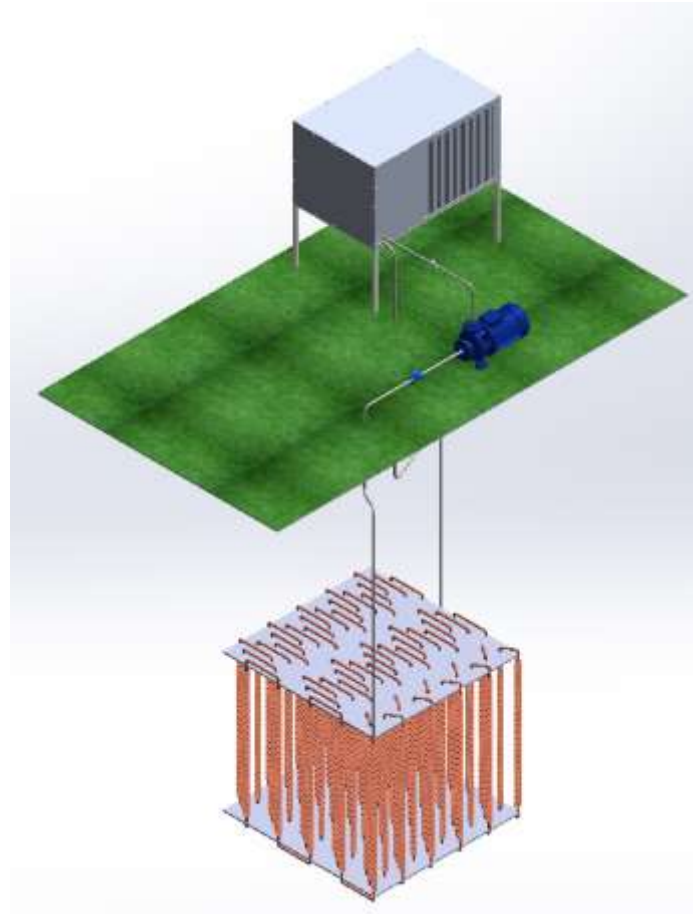


Imagen 135 Circuito completo con intercambiador geotérmico y la BC (elaboración propia)

Este programa de ensamble tiene como propósito el mostrar los pasos a seguir para la construcción física de la bomba y buscar la forma más fácil para cumplir con ese objetivo. El siguiente capítulo muestra la manufactura que se siguió para la BCG 3 TR dando indicaciones sobre su realización y especificando los materiales que se utilizaron.

5. MANUFACTURA Y ARMADO DE LA BOMBA

Este capítulo tiene por objetivo enseñar al lector de esta tesis el proceso de manufactura que se siguió para la fabricación de la BCG 3 TR describiendo cada uno de los pasos a seguir, especificando las herramientas utilizadas y los equipos que forman parte de la bomba. De igual manera se agrega evidencia fotográfica que muestra el proceso de construcción, desde la estructura de PTR hasta el producto final.

5.1 PROCESO DE MANUFACTURA DE LA BCG 3 TR

Una vez conseguido los equipos, así como el material se siguió al pie de la letra lo que se enunció en el programa de ensamble, por lo que primeramente se empezó con el corte del PTR calibre 16 con ayuda de la tronzadora de metal marca DEWALT, que se muestra en la Imagen 136; para conseguir la construcción de la estructura uniendo los tubos por medio de soldadura con electrodo por arco eléctrico como lo muestra las siguientes imágenes.



Imagen 136 Tronzadora de metal



Imagen 137 Estructura de PTR calibre 16 1"x 1" para la BCG 3 TR



Imagen 138 Proceso de soldar la estructura de PTR



Imagen 139 Estructura final de PTR para la BCG 3 TR

Cuando se concluyó con la estructura de PTR se prosiguió con el corte de las tapas para el recubrimiento de la BCG y que como se mencionó en el programa de ensamble solo se consideraron aquellas de la parte superior con las medidas igual plasmadas en el apartado anterior. La lámina de acero galvanizado se marcó con las medidas y después se cortó por medio de la sierra caladora, que se muestra en la Imagen 140; se unieron a los PTR a través de los tornillos auto perforantes No. 8 x $\frac{1}{2}$ ".



Imagen 140 Sierra caladora



Imagen 141 Corte por medio de sierra caladora para las láminas de acero galvanizado calibre 24



Imagen 142 Láminas que forman parte de la estructura de la BCG 3 TR

En la Imagen 142 ya se puede observar la tapa superior de la BCG, esta no fue sujeta aún con los tornillos debido a que se quiso facilitar el poder quitarla y así poder meter los equipos y realizar las operaciones necesarias para la unión de las tuberías de los equipos dentro de la bomba.



Imagen 143 Algunos de los equipos que van en el interior de la BCG

La Imagen 143 muestra al compresor Scroll, al ventilador centrífugo, al intercambiador de placas planas, la tubería de cobre flexible y el tanque de refrigerante R-410a que llegó al laboratorio.



Imagen 144 Componentes para la fabricación de la BCG 3 TR

La Imagen 144 muestra el filtro deshidratador, la válvula de expansión y las mangueras en conjunto con los manómetros que se ocupan para la inyección de refrigerante a la bomba. Por su parte, la Imagen 145 muestra el radiador fabricado por radiadores Espinosa a partir del modelo diseñado en CAD por elaboración propia. Este intercambiador de calor es aquel que modificará la temperatura del aire ya sea para enfriarlo o calentarlo y por lo tanto trabajar como evaporador o condensador dependiendo de la configuración que el usuario desee.



Imagen 145 Intercambiador de calor de tubos y aletas que funcionará como evaporador o condensador dependiendo la configuración de la BGC 3 TR

Después de armada la estructura de PTR en conjunto con las láminas, se procedió a realizar los huecos correspondientes para colocar los ductos de ventilación pegados al ventilador centrífugo y el hueco para que el intercambiador de tubos y aletas interactúe con el aire. La Imagen 146 y la Imagen 147 muestran los procedimientos mencionados.



Imagen 146 Intercambiador de tubos y aletas montado en estructura de la BCG 3 TR

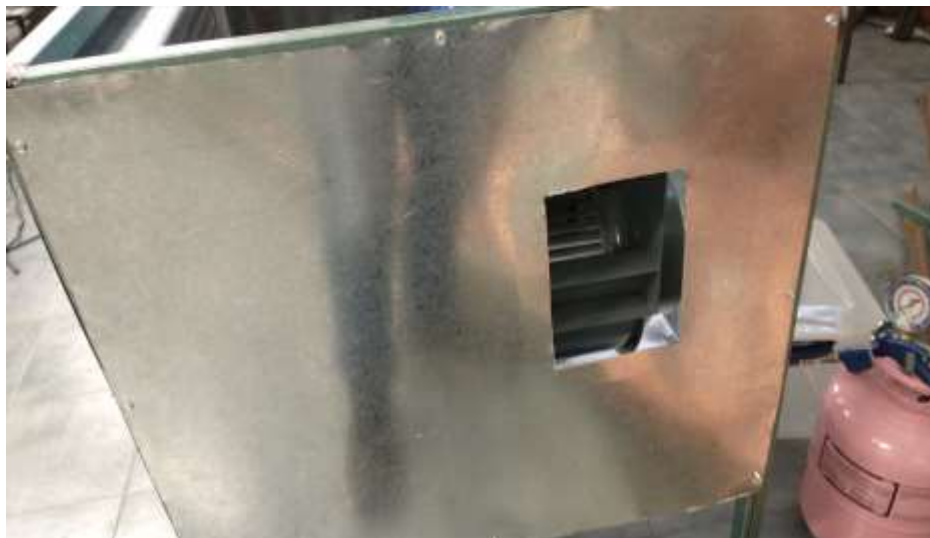


Imagen 147 Abertura para los ductos conectados al ventilador centrífugo

Asimismo, se buscó independizar a la sección del ventilador junto con el radiador para que el aire solo se dirija hacia esa área y facilitar el envío de aire a los ductos. Esta independencia se logró gracias a posicionar una pared hecha de lámina de acero galvanizado que dividiera a los equipos como lo muestra la Imagen 148.



Imagen 148 Pared en el interior de la BCG para la separación del ventilador y el radiador

Después de realizada esta tarea se aisló térmicamente al interior de las paredes y tapa de la BCG 3 TR con lana mineral apuntando el aluminio hacia el interior como se muestra en la Imagen 149. El lector de esta tesis puede observar en las imágenes que se hizo uso obligatorio de material de seguridad como guantes y lentes para el manejo de las láminas y la lana mineral, así como para la operación de soldadura, corte, desbaste, perforaciones, etc.



Imagen 149 Aislante térmico de la BCG 3 TR

Una vez que ya se tienen los equipos montados se prosigue a la interconexión de las tuberías de cobre por medio de soldadura de oxiacetileno y es importante que se tenga un medio al interior de las tuberías de nitrógeno, esto con el propósito de que al momento de soldar evitar la formación de óxido de cobre y por ende no afecte al circuito del refrigerante a través de las tuberías y equipos.



Imagen 150 Colocación provisional de las tuberías de cobre junto con accesorios



Imagen 151 Soldadura con oxiacetileno con ambiente de nitrógeno (elaboración propia)



Imagen 152 Instalación de las tuberías salientes de la válvula de cuatro vías por oxiacetileno

Una de las observaciones importantes que se tiene que hacer al momento de soldar con oxiacetileno es que los equipos como la válvula de cuatro vías o la de expansión tienen que estar cubiertas de un trapo mojado, esto se hace con el propósito de proteger los componentes en su interior y no se lleguen a quemar debido a la temperatura que se alcanza con este método de soldadura pues el soplete llega a los 3000 o 3200 °C (ANCAP, 2022)



Imagen 153 Bulbo sensor de la válvula de expansión

El bulbo sensor se muestra en la Imagen 153 que, como se comentó cuando se platicó sobre los componentes que conformaban el interior de la BC, este se localiza a la salida del evaporador y es el encargado de medir el grado de sobrecalentamiento del vapor de refrigerante, que es la diferencia de temperatura entre el gas a la salida del evaporador y la temperatura correspondiente a la presión de evaporación; este bulbo apoya a la válvula de expansión a medir el flujo de refrigerante para abastecer al evaporador con la cantidad de líquido correcta. Cabe recalcar que un factor importante para el correcto funcionamiento del bulbo es que la superficie de este se encuentre en total contacto con la tubería, es decir, que no exista ningún espacio entre ambos.

El bulbo sensor posee una carga termostática que reacciona ante la diferencia de temperatura en el tubo de succión; y si ésta incrementa hace que las partículas de la carga se exciten y generen una fuerza. Esta fuerza ocasiona la deformación del diafragma en sentido descendente, lo que resulta en la apertura de la válvula para permitir un mayor flujo de refrigerante. Por el contrario, si existe señal de baja temperatura de succión (indicación de bajo sobrecalentamiento), las partículas contenidas en el bulbo sensor tendrán una presión menor sobre el diafragma, permitiendo una deformación en sentido ascendente que limita el flujo de refrigerante. (celsius, 2017)



Imagen 154 Arreglo final de tuberías

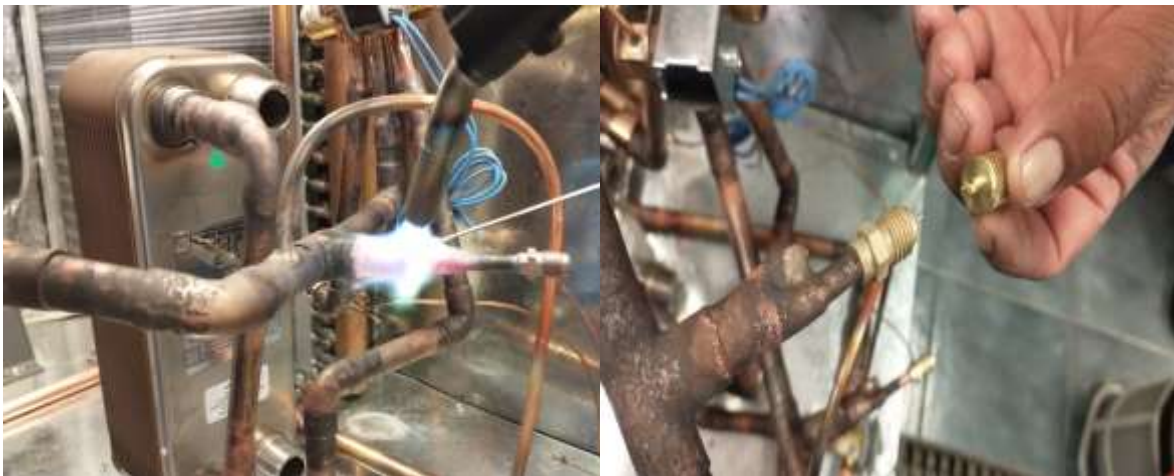


Imagen 155 Colocación de las válvulas de servicio para el llenado de refrigerante a la bomba de calor

La Imagen 155 es la puesta de las válvulas de servicio en las que se conecta las mangueras del manifold para hacer la carga de refrigerante, como se mencionó en un capítulo anterior, estas válvulas se deben ubicar en las tuberías de alta y baja presión.

Después de terminar de soldar todos los accesorios, tuberías, Tee's y válvulas se realiza una prueba de presión con el nitrógeno para el hallazgo de fugas, este test se hace con 5,000 psi, en el caso de la BCG 3 TR soportó esta presión sin presentar ninguna anomalía, lo que indica que las tuberías se soldaron correctamente.

Se procede con el vacío a las líneas por medio de la bomba. Dicha bomba se tiene primero que llenar con un aceite siguiendo el nivel que indica la mirilla al frente de ella como se muestra en la Imagen 156. La Imagen 157 señala las ubicaciones de las válvulas de servicio con el manifold, el

procedimiento de vacío se indicó en el apartado 4.6 **ESPECIFICACIÓN DE REFRIGERANTE (LLENADO)**



Imagen 156 Llenado de aceite a la bomba de vacío



Imagen 157 Conexiones del manifold con las tuberías de alta y baja, así como la bomba de vacío

Después, se siguió con la construcción del circuito geotérmico (las mangueras que van al intercambiador de placas se conectaron con un tanque de agua a la entrada y para la salida, se mandó agua a una alberca que regresa el agua al tanque nuevamente formando un ciclo) y con las conexiones eléctricas así como el aislamiento de las tuberías a la entrada y salida del compresor al igual que, la tubería que se encuentra en contacto con el bulbo, esto con el objetivo de que el bulbo solo se maneje por lo que ocurre en la tubería a la salida del evaporador y no a sus alrededores. La siguiente imagen muestra a la bomba en su interior.



Imagen 158 Bomba de calor con conexiones eléctricas, aislamiento y conexiones al intercambiador geotérmico

Nuevamente en el capítulo 4.6 ESPECIFICACIÓN DE REFRIGERANTE (LLENADO) de esta tesis se mencionan los pasos a seguir para el llenado del refrigerante. La imagen que sigue, muestra las conexiones del manifold a las tuberías de la bomba y la manguera de servicio conectada a la boya.



Imagen 159 Boya de refrigerante sobre báscula y conexiones del manifold



Imagen 160 Lector de la balanza en cero

La Imagen 160 muestra en cero la balanza de carga del refrigerante, dicho valor tiene que llegar a 1.4 kg, pues este fue el valor de carga que se estipuló para esta BCG 3 TR y que se tomó como referencia de un equipo ya existente en el laboratorio.



Imagen 161 Apertura de las válvulas del manifold para proseguir con el llenado de refrigerante

Una vez cargada la BC se debe accionar el circuito del agua, prender el ventilador y finalmente el compresor para verificar que la bomba esté haciendo su trabajo.



Imagen 162 Alberca para el agua de salida del intercambiador de placas



Imagen 163 Manguera conectada a la entrada del intercambiador de placas tomada de un tanque de agua

La Imagen 162 y la Imagen 163 muestran el circuito geotérmico provisional que se montó en el laboratorio para poder encender la bomba de calor y probarla dentro de las instalaciones. La temperatura del agua en la manguera azul es la del ambiente mientras que al salir del intercambiador debe tener mayor temperatura si está en modo refrigeración pues el refrigerante cede calor al agua, mientras que cuando está en modo calefacción el agua sale con menor temperatura pues esta es la que cede el calor al refrigerante.

La tabla siguiente muestra los resultados que se obtuvieron al prender la BCG 3 TR.

Tabla 39 Verificación de la funcionalidad de la BCG 3 TR

PARÁMETRO	SITUACIÓN
No se presentan fugas al interior de la bomba	✓
Encendido de ventilador	✓
Encendido de compresor	✓
Funcionamiento de la BCG 3 TR	✓
Enfriamiento del aire	✓
Calentamiento del aire	✓

6. CONCLUSIONES

El objetivo principal de este trabajo es demostrar la existencia de la capacidad de emprender la industria de diseño y fabricación de bombas de calor dentro de territorio nacional ocupando tanto ingenieros y equipos, así como materiales, mexicanos; asimismo, otro objetivo a cumplir en esta tesis es el mostrar al lector que el uso directo de la geotermia no se explota en el grado que se podría dentro del país y que, como se expuso en el Capítulo 2, es un recurso con una vastedad inminente y con la capacidad de ser mejor aprovechada para el beneficio de la población, más que solo limitarla a baños y parques recreativos.

Cabe recalcar que este trabajo se realizó desde el ciclo de refrigeración, es decir, desde lo más básico dentro del mundo de la climatización, tomando como primer parámetro la capacidad de la bomba de calor, es otras palabras, las 3 TR o 10.5 kW para empezar con el cálculo; ahora, teniendo en cuenta que ya se poseen las operaciones correspondientes para el diseño de una BC dentro de un programa computacional, sin ninguna dificultad se puede aumentar el tonelaje de refrigeración de bombas posteriores a esta para después continuar con la selección de los componentes siguiendo los criterios mencionados en el apartado 4.7.

Como se mencionó dentro de la tesis, uno de los parámetros con mayor importancia dentro de los equipos de climatización es el COP y, como se demostró en el apartado 4.3.5, esta BCG 3 TR cuenta con un COP en modo refrigeración de 4.22 y en modo calefacción de 5.22 que, comparado con una bomba comercial de la marca TRANE, tiene tan solo un porcentaje de desviación respecto de un equipo comercial de 1.86% para el modo refrigeración y de 1.88% en calefacción.

Asimismo, este trabajo quiere demostrar que se pudo realizar la manufactura en un laboratorio, llamémosle, rudimentario, pues no se tenían los equipos que un taller grande seguro posee y que optimizaría la fabricación de la bomba en tiempo, forma y costo. El costo final de la BCG 3 TR fue de 178,254.53 MXN considerando equipos, materiales y consumibles. Sin embargo, una de las opciones para poder eficientar este costo es por medio de la compra a granel de los equipos y materiales platicando con los proveedores y pidiendo un precio por una fabricación continua y extensa de estos equipos de climatización; sin embargo, el objetivo de esta tesis no es la optimización del precio, este tema se deja abierto para alguna otra investigación posterior a este trabajo.

Finalmente, puedo decir que la BCG 3 TR cumple con su función de ser un sistema de climatización (enfriamiento o calefacción) que podrá ocupar una energía renovable con una vasta presencia en territorio nacional, como lo es la geotermia, y que espera ser inspiración para futuros proyectos que se enfoquen en el desarrollo del diseño de equipos para climatizar espacios, para equipos con mayor tonelaje de refrigeración y que, de igual forma, puedan incrementar el rendimiento de este sistema.

7. BIBLIOGRAFÍA

- (17 de OCTUBRE de 2021). Obtenido de REFRIGERANTES:
<http://www.indubel.com.ar/pdf/gases/refrigerantes.pdf>
- ACMISA, A. T. (3 de Marzo de 2022). *Elastomero (Armaflex, Insultube, Nomalock, Thermaflex)*. Obtenido de <https://aislantetermico.info/elastomero-armaflex-insultube-nomalock-thermaflex>
- Acondicionados, A. (2 de Noviembre de 2017). *Bombas de calor geotérmicas*. Obtenido de <https://www.aires-acondicionados.info/bombas-de-calor-geotermicas/>
- acr. (29 de Agosto de 2020). *Aire acondicionado y su historia*. Obtenido de <https://www.acrlatinoamerica.com/201208294926/articulos/otros-enfoques/aire-acondicionado-y-su-historia.html>
- Agency, I. E. (Mayo de 2018). *The Future of Cooling*. Obtenido de <https://www.iea.org/reports/the-future-of-cooling>
- Agency, I. E. (Junio de 2020). *Heating*. Obtenido de <https://www.iea.org/reports/heating>
- Alfonso García Gutiérrez, I. M. (2012). Estado actual de desarrollo de las Bombas de Calor Geotérmico. *Geotermia*.
- all, P. B. (2021). *PROCESS COMPONENT DESIGN*. Oklahoma: Universidad de Tulsa.
- ANCAP. (2022). *Soldadura de metales*. ANCAP.
- Aquarium, L. (4 de Diciembre de 2021). *QUÉ SON LAS PISCIFACTORÍAS*. Obtenido de <https://www.aquariumlanzarote.com/es/novedades-acuario-lanzarote/208-que-son-las-piscifactorias>
- Arguello Arguello, M. G. (2016). *DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA MÁQUINA TIPO TAMBOR HORIZONTAL GIRATORIO, CON UNA CUCHILLA ESTACIONARIA*. Quito: Universidad politécnica Salesiana.
- Arias, R. (2016). *MANIPULACIÓN DEL PROGRAMA REFPROP PARA LA EVALUACIÓN DE PROPIEDAS TERMODINÁMICAS PARA LA MEDICIÓN DE FLUJO DE FLUIDOS*. Querétaro: CENAM.
- armacell. (s.f.). *REGLAMENTO R.I.T.E*. Obtenido de <http://hosclima.com/wp/wp-content/uploads/ESPESORES-DE-AISLAMIENTO-PARA-COBRE-FRIGORIFICO-SEGUN-RITE-HOSCLIMA.pdf>
- ASHRAE. (2015). *ASHRAE Handbook-HVAC Applications*. Atlanta: ASHRAE.
- Association, E. H. (2014). *European Heat Pump Market and Statistics Report*.
- Bengoechea, R. d. (14 de Junio de 2021). Temperatura de inyección. (L. F. Moreno, Entrevistador)
- Blancarte, J. (21 de Marzo de 2014). *¿Cuánto dura un radiador?* . Obtenido de <https://noticias.autocosmos.com.mx/2014/03/21/cuanto-dura-un-radiador>

- BOHN. (2005). *Manual de Ingeniería*. CDMX: BOHN.
- BULLARD. (1965). *Historical introduction to terrestrial heat flow*. Amer. Geophys.
- Caballero, M. L. (2007). *Efecto invernadero, cambio climático, calentamiento global*. Obtenido de <http://www.revista.unam.mx/vol.8/num10/art78/int78.htm#top>
- California., U. P. (2011). *Evaluación de los recursos geotermicos de baja entalpía de la península de baja california, México*.
- CANTABRIA, I. E. (2021). *Máquinas y equipos térmicos*. Obtenido de [http://scalofrios.es/Frio/Evaporadoresycondensadores/Apuntes%20de%20Maquinas%20\(Evaporadores%20y%20Condensadores\).pdf](http://scalofrios.es/Frio/Evaporadoresycondensadores/Apuntes%20de%20Maquinas%20(Evaporadores%20y%20Condensadores).pdf)
- Carballo, C. A. (2022). *CALOR Y CALORIMETRÍA*. Cartago: Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- Carballo, C. A. (2022). *Transferencia de calor*. Cartago: Tecnológico de Costa Rica.
- Carrier. (2 de Octubre de 2021). *Sistemas de aire acondicionado y calefacción*. Obtenido de Fabricantes de clima para el mundo: <https://www.carrier.com/commercial/es/es/acerca-de-carrier/historia/>
- Carrier. (24 de Enero de 2022). *AIR CONDITIONERS, BUYING TIPS, HVAC EDUCATION, HEAT PUMPS*. Obtenido de Heat Pumps vs. Air Conditioners: <https://www.carrier.com/residential/en/us/products/heat-pumps/heat-pumps-vs-air-conditioners/#>
- CDC. (28 de Junio de 2021). *Radiación UV*. Obtenido de <https://www.cdc.gov/spanish/nceh/especiales/radiacionuv/index.html>
- celsius, c. g. (28 de Julio de 2017). *Aplicación y ajuste de las válvulas de expansión termostática*. Obtenido de <https://0grados.com/aplicacion-y-ajuste-de-las-valvulas-de-expansion-termostatica/>
- CeMIEGeo. (14 de Octubre de 2021). *Geotermia en México*. Obtenido de <http://www.cemiegeo.org/index.php/geotermia-en-mexico>
- Cengel, Y. A., & Boles, M. A. (2011). *Termodinámica*. Ciudad de México: McGrawHill.
- Cengel, Y. A., & Boles, M. A. (2011). *Termodinámica*. Ciudad de México: McGrawHill.
- Centro, D. t. (2021). *Lana Mineral Aislante Térmico*. Obtenido de <https://www.dtamexico.com.mx/lana-mineral-aislante-termico/>
- CGC. (2010). *Design and Installation of Residential Ground Source Heat Pump Systems*. Canadian GeoExchange Coalition.
- Chemours. (2019). *FREON 410A (Thermodynamics properties)*. Wilmington: Chemours.
- Christopherson, N. (2003). *The Essentials Of Working With R-410A* . Obtenido de <http://www.hvac.amickracing.com/Refrigerant%20Data,%20Info%20and%20Articles/The%20Essentials%20Of%20Working%20With%20R410.pdf>

- CLEMENTE, C. P. (2017). *DIAGNÓSTICO DE OPERACIÓN DEL SISTEMA DE AIRE ACONDICIONADO EN EL AEROPUERTO. CASO DE ESTUDIO: AEROPUERTO DE TAMPICO, TAMAULIPAS, MÉXICO*. CDMX: UNAM.
- College, S. L. (2022). *The Second Law of Thermodynamics*. Salt Lake City : Salt Lake Community College.
- CONUEE. (2021). *SISTEMAS DE AIRE ACONDICIONADO*. CDMX: SENER.
- Copco, A. (6 de Agosto de 2020). *Compresor de pistón ¿cómo funciona?* . Obtenido de <https://www.atlascopco.com/es-es/compressors/air-compressor-blog/compresor-de-piston-como-funciona>
- D. Castillo H., V. D. (1992). Reconocimiento estructural y volcanológico en la zona termal del Domo San Pedro Lagunillas, Nayarit, México. *Geofísica Internacional*, 407-415.
- DAIKIN. (2018). *Refrigerante R-32*. Obtenido de https://www.daikin.com.mx/content/dam/document-library/catalogues/ac/split/ftxj-ls/R-32_Focus%20Topic_ECPES15-017A_Spanish.pdf
- Danfoss. (22 de Julio de 2021). *Filtros secadores*. Obtenido de <https://www.danfoss.com/es-mx/products/dcs/filters-driers-and-strainers/filter-driers/#tab-overview>
- Danfoss. (2021). *Filtros secadores*. Obtenido de <https://www.danfoss.com/es-mx/products/dcs/filters-driers-and-strainers/filter-driers/#tab-overview>
- Danfoss. (2021). *Thermostatic expansion valves Type TGE*. Danfoss.
- DOCS, R. T. (16 de Febrero de 2022). *Procesos reversibles e irreversibles*. Obtenido de https://termodinamica.readthedocs.io/en/latest/segundo_principio_procesos_reversibles_irreversibles.html#
- ECI. (2018). *Heat Pumps*. Copper Alliance.
- Édgar Santoyo, R. M. (2010). *ENERGÍA GEOTÉRMICA. Ciencia - Academia Mexicana de Ciencias*.
- efENERGIA. (2019). *¿Qué es una bomba de calor?* Obtenido de <https://www.efenergia.com/instalaciones-eficiencia-energetica/termicas/bombas-de-calor/>
- EHPA, S. y. (2005). *Heat Pumps Technology and Environmental Impact*. Suecia.
- Electrificación-INDE, I. N. (2007). *ENERGÍA GEOTÉRMICA*. Guatemala.
- Emmanuel, R. (Diciembre de 2014). *A typical diagram of a water source heat pump*. Obtenido de https://www.researchgate.net/figure/A-typical-diagram-of-a-water-source-heat-pump_fig2_286358619
- ENERGIA, S. D. (2021). *ENREGÍA GEOTÉRMICA*. Buenos Aires.
- Energy-Saving-Trust. (2007). *Domestic Ground Source Heat Pumps: Design and installation of closed-loop systems – A guide for specifiers, their advisors and potential users*.
- ESPINOSA, E. S. (2019). *ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA PARA UNA BOMBA DE CALOR EN MÉXICO*. CDMX: UNAM.

- Espinoza, L. R. (2013). *PROYECTO DE UN SISTEMA DE ACONDICIONAMIENTO DE AIRE PARA UN QUIRÓFANO PERTENECIENTE A UN HOSPITAL, LOCALIZADO EN LA CIUDAD DE TOLUCA; ESTADO DE MÉXICO*. CDMX: IPN.
- Fanelli, M. H. (2004). *What is Geothermal Energy?* Pisa: Istituto di Geoscienze e Georisorse.
- Fernando Gordillo Diaz, S. R. (1995). *Diseño y construcción de un evaporador para refrigeración de tiro forzado y expansión directa*. Cali: Universidad Autónoma de Occidente.
- Flores, L. A. (2021). *Diseño de un intercambiador de calor para usos directos de la geotermia*. CDMX: UNAM.
- Fortaleza, R. (2018). *¿RADIADOR DE COBRE O ALUMINIO?* Obtenido de <https://www.radiadores.com.pe/blog/radiadores-de-cobre-vs-radiadores-de-aluminio/>
- Fridleifsson, I. R. (2008). The possible role and contribution of geothermal energy to the mitigation of climate change. In: O. Hohmeyer and T. *IPCC Scoping Meeting on Renewable Energy Sources*, 59-80.
- FRILAV. (3 de Marzo de 2022). *Juego de Manómetros para Refrigeracion Manifold R134 R22 R404 R407*. Obtenido de <https://www.amazon.com.mx/Juego-Manometros-para-Refrigeracion-Manifold/dp/B08C83H5LZ>
- García Montes, J. P. (2019). *Parques de Bombas de Calor en España. Síntesis del estudio*. IIDAE.
- García Zarrága, J. (2009). *La bomba de calor*. San Juan de Aragón, Estado de México: UNAM.
- García, Á. F. (Diciembre de 2010). *Física con ordenador*. Obtenido de El ciclo de Carnot: <http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/estadistica/carnot/carnot.htm>
- García, F. F. (1994). CLIMA Y CONFORTABILIDAD HUMANA. ASPECTOS METODOLÓGICOS. *Serie Geográfica*, 109-125.
- Gas-Servei S.A. (2010). *Dismafrio*. Obtenido de https://www.dismafrio.com/docs/gases/R410A_tec.pdf
- Gerhardt, N. (27 de Julio de 2022). *Forbes Home*. Obtenido de Heat Pump Vs. Air Conditioner: What Are The Differences?: <https://www.forbes.com/home-improvement/hvac/heat-pump-vs-air-conditioner/>
- Gesman soluciones. (11 de Noviembre de 2019). *Gases refrigerantes. Se dejará de comercializar el R-410 en 2025 para equipos de hasta 3kg*. Obtenido de <https://gesmansoluciones.es/gases-refrigerantes-se-dejara-de-comercializar-el-r-410-en-2025-para-equipos-de-hasta-3kg/>
- Godoy, E. M. (2008). *Bombas de calor en el sector residencial*. FES Aragón: UNAM.
- Goldschmidt, V. W. (1984). *HEAT PUMPS: Basics, Types, and Performance Characteristics*. Indiana: Annual Reviews Inc.
- GORIBAR, E. H. (1999). *FUNDAMENTOS DE AIRE ACONDICIONADO Y REFRIGERACIÓN*. D.F.: LIMUSA S.A. DE C.V.

- GRAINGER. (17 de Julio de 2021). *Tubo Capilar, Conex. 0.026 D.I.x.072 D.E.* Obtenido de <https://www.grainger.com.mx/producto/IB-INDUSTRIES-Tubo-Capilar,Conex-0-026-D-I-x-072-D-E-p/3DXH7>
- Gutiérrez, J. (6 de Julio de 2012). *Termodinámica de fluidos.* Obtenido de Ciclo de Carnot: <http://termodinamicaudingelectrica.blogspot.com/2012/07/ciclo-de-carnot.html>
- Gutiérrez-Negrin, L. M.-G.-L. (2015). *Present situation and perspectives of geothermal in Mexico.* . Melbourne: International Geothermal Association.
- Hannah Ritchie, M. R. (10 de Septiembre de 2021). *Emissions by sector.* Obtenido de Our World in Data: <https://ourworldindata.org/emissions-by-sector#energy-electricity-heat-and-transport-73-2>
- Herlane Costa Calheiros, M. R. (2014). *Calidad de las aguas meteóricas en la ciudad de Itajubá, Minas Gerais, Brasil.* Itajubá: Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI).
- Hernández, A. M. (1990). *Diseño de prácticas de laboratorio para una bomba de calor mecánica.* Ciudad de México: Universidad La Salle.
- Hernández, E. M. (2017). *Máquinas de Desplazamiento Positivo.* Ciudad de México.
- HERNÁNDEZ, W. T. (2005). *MONTAJE DE EQUIPO DE REFRIGERACIÓN MECÁNICO POR COMPRESIÓN DE AMONIACO CON UNA CAPACIDAD DE 33 TONELADAS DE REFRIGERACIÓN UTILIZADO PARA ABSORBER EL CALOR DE LA SOLUCIÓN QUE SE USA EN LA ELABORACIÓN DE BEBIDAS GASEOSAS DE LA EMPRESA TROPIC, S.A.* San Carlos: Universidad de San Carlos de Guatemala.
- Herrero Fuerte, M. (26 de Abril de 2021). *Calor y frio.* Obtenido de <https://www.caloryfrio.com/calefaccion/bomba-de-calor/definiciones-cop-y-eer.html>
- Hess, B. (21 de Mayo de 2021). *AC & Heating Connect.* Obtenido de The Inside Story: Scroll Compressors: https://www.ac-heatingconnect.com/wp-content/uploads/34262-5-EMER_Scroll_Compressor_Infographic_04.pdf
- Hyde, K. (20 de Octubre de 2017). *CE News.* Obtenido de The 5 types of Air Conditioning Compressors: <https://news.carrierenterprise.com/air-conditioning-compressors/>
- Ibérica, F. (6 de Enero de 2016). *Válvula 4 vías o inversora.* Obtenido de <http://blogdelfrigorista.blogspot.com/2016/01/valvula-de-4-vias-o-inversora.html>
- IEA. (2011). *Energy-efficient Buildings: Heating and Cooling Equipment.* Paris: IEA.
- INAC. (2022). *PSICROMETRÍA.* MONTEVIDEO: INAC.
- industrial, A. (23 de Agosto de 2020). *PIDIR.* Obtenido de http://pidir.com/calor/transferecia_de_calor_07_intercambiadores.htm
- INEGI. (2020). *Hogares y Vivienda.* Obtenido de Características de los hogares: <https://www.inegi.org.mx/temas/hogares/>
- INEGI. (2020). *Marco Geoestadístico Municipal 2020.* Obtenido de Nayarit: http://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/nay/territorio/div_municipal.aspx?tema=me&e=18

- ingemecanica. (11 de Diciembre de 2021). *Bombas de calor geotérmicas*. Obtenido de <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/objetos/tutorial254/doc2tut254.pdf>
- INSUL-TUBE. (s.f.). *Aislamiento para tuberías*. Obtenido de http://www.glassfiber.com/wp-content/uploads/2018/04/ft_Aislantes_Elastomero_Insultube_ESP_May2010.pdf
- IRIM. (2015). *Protocolo de mantenimiento preventivo para compresores de tornillo libres de aceite*. Obtenido de <http://www.renovetec.com/irim/322-protocolo-mantenimiento-preventivo-para-compresor-de-tornillo-libre-de-aceite>
- Ivonne, G. A. (2017). La sustentabilidad de la energía geotérmica y sus impactos ambientales. *INNOVACIÓN Y DESARROLLO TECNOLÓGICO REVISTA DIGITAL*.
- Jaramillo, O. (20 de Noviembre de 2007). *Centro de Investigación de Energía*. Obtenido de INTERCAMBIADORES DE CALOR: <https://www.ier.unam.mx/~ojs/pub/HeatExchanger/Intercambiadores.pdf>
- Jaramillo, O. (03 de Mayo de 2007). *Trabajo*. Obtenido de <https://www.ier.unam.mx/~ojs/pub/Termodinamica/node18.html>
- JUÁREZ, E. M. (2016). *EVALUACIÓN DE LA REGULACIÓN DE LOS RECURSOS GEOTÉRMICOS EN MÉXICO*. CDMX: UNAM.
- Kiril Popovski, S. P. (2021). *Geothermal Energy*.
- Lahsen, A. (2021). *¿Qué es el a energía geotérmica?*. Santiago: Universidad de Santiago, Chile.
- Laval, A. (16 de Agosto de 2021). *Intercambiador de calor- Definición, funcionamiento, tipos, aplicaciones y mucho más*. Obtenido de <https://www.alfalaval.es/productos-y-soluciones/transferencia-de-calor/intercambiadores-de-calor-de-placas/intercambiador-de-calor-definicion-funcionamiento-tipos-y-aplicaciones/>
- Leal, R. G. (2020). *¿Qué es la temperatura?* CDMX: UNAM.
- LICEO. (15 de Febrero de 2022). *CALOR INTERCAMBIADO EN PROCESOS A VOLUMEN O PRESIÓN CONSTANTES*. Obtenido de <https://www.liceoagb.es/quimigen/termo5.html>
- Life, T. T. (17 de Febrero de 2022). *La pérdida de calor corporal*. Obtenido de <https://thetrekkinglife.com/articulos/seguridad-y-supervivencia/112-la-perdida-de-calor-corporal>
- Lizárraga, W. B. (2001). *EFECTO PELTIER*. Tlaquepaque: ITESO CAMPUS UNIVERSITARIO.
- Lund, J. D. (2010). Direct Utilization of Geothermal Energy 2010 Worldwide. *Proceedings of the World Geothermal Congress 2010*, (pág. 23). Bali.
- Margarita Caballero, S. L. (10 de Octubre de 2007). *Revista Digital Universitaria*. Obtenido de <https://www.revista.unam.mx/vol.8/num10/art78/int78.htm>
- Marín, A. C. (Julio de 2019). *ResearchGate*. Obtenido de Modelling and experimental validation of an innovative coaxial helical borehole heat exchanger for a dual source heat pump system: https://www.researchgate.net/figure/Ground-Source-Heat-Pump-system-in-cooling-and-heating-mode-16_fig1_334736444

- Marín, G. (2018). *Diseño térmico de un deshidratador geotérmico de alimentos de flujo vertical*. CDMX: UNAM.
- Martín, S. B. (2011). *ESTUDIO DE LAS APLICACIONES DE LA ENERGÍA GEOTÉRMICA EN ESPAÑA. CASO PRÁCTICO PARA CLIMATIZACIÓN DE UNA VIVIENDA UNIFAMILIAR*. Leganés: Universidad Carlos III de Madrid .
- Martínez, A. L. (2016). *Termoquímica y Equilibrio Químico*. CDMX: UNAM.
- Mary H. Dickson, M. F. (2003). *Geothermal energy: utilization and technology*. Francia: UNESCO.
- Materia, T. (28 de Junio de 2021). *Transferencia de calor* . Obtenido de <https://www.todamateria.com/transferencia-de-calor/>
- Mercado, A. M. (Enero de 2010). *Geotermia*. Obtenido de Un repaso a las bombas de calor: <https://biblat.unam.mx/hevila/Geotermia/2010/vol23/no1/9.pdf>
- mercadolibre. (20 de Enero de 2022). *Elitech Lmc-200a Báscula Electrónica De Carga De Refrigerant*. Obtenido de https://articulo.mercadolibre.com.mx/MLM-1368139446-elitech-lmc-200a-bascula-electronica-de-carga-de-refrigerant-_JM#position=5&search_layout=stack&type=item&tracking_id=b0c96f7f-691b-4f5c-9010-ec8bafca5653
- mercadolibre. (3 de Marzo de 2022). *Gas Refrigerante Boya Genetron R410a Quimobasicos 5.0 Kg*. Obtenido de https://articulo.mercadolibre.com.mx/MLM-778444959-gas-refrigerante-boya-genetron-r410a-quimobasicos-50-kg-_JM
- Metalium. (2020). *Metalium*. Obtenido de <https://metalium.mx/aleaciones-de-cobre/cobre-desoxidado-con-fosforo-c12200/C12200>
- méxicoreal. (29 de Noviembre de 2021). *ESTADOS*. Obtenido de Estado de Nayarit de la República Mexicana: <https://mr.travelbymexico.com/707-estado-de-nayarit/>
- MONTAÑA, N. R. (2017). *DISEÑO DE UN SISTEMA DE AIRE ACONDICIONADO PARA LA HABITACIÓN DE MEZCLAS EN UNA PLANTA DE ALIMENTOS*. Bogotá: UNIERSIDAD SANTO TOMÁS.
- Munters. (2020). *Datos climáticos de México*. Ciudad de México: Munters.
- NAMA. (2020). *Estudio de mercado: Bombas de calor geotérmicas y aerotérmicas en Chile*. Santiago: GIZ.
- Naturales, S. N. (28 de Junio de 2021). *Informe del Medio Ambiente*. Obtenido de <https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe18/tema/cap5.html#tema2>
- Nissens. (s.f.). *El filtro secador/Acumulador*. Obtenido de <https://nissens.es/Files/Files/Booklets/AC/AC%20Pages/ES/Receiver%20Dryer%20ES.pdf>
- Ospino, A. (30 de Abril de 2018). *CARGA REFRIGERANTE POR SUCCION EN AIRE ACONDICIONADO CONVENCIONAL R 410A CON MANOMETRO ESTANDAR*.
- PEER. (2007). *Manual Técnico de Refrigeración Comercial*. San José: BUN-CA.

- Pérez, A. B. (2013). *Estado del arte de la calefacción*. Barcelona: Anales de mecánica y electricidad.
- Prah, F. (2001). *REFRIGERANT 410A*. Illinois: RSES.
- PRTR. (3 de Noviembre de 2021). *CFC (CLOROFLUOROCARBUIROS)*. Obtenido de <https://prtr-es.es/CFC-clorofluorocarburos,15602,11,2007.html>
- PRTR. (3 de Noviembre de 2021). *HCFC (HIDROCLOROFLUOROCARBUIROS)*. Obtenido de <https://prtr-es.es/HCFC-hidrofluorocarb-uros-763112007.html>
- RATSA. (2021). *LANA MINERAL (LANA DE ROCA)*. Obtenido de <https://www.ratsa.mx/producto/lana-mineral-y-lana-de-roca>
- REFRIGERANTES*. (5 de Octubre de 2021). Obtenido de CAPÍTULO 12: <http://www.indubel.com.ar/pdf/gases/refrigerantes.pdf>
- Refrigeration, F. (7 de Noviembre de 2021). *El refrigerante R410A Cilindro de peso neto de 11,3*. Obtenido de https://es.made-in-china.com/co_fluorogas/product_Refrigerant-R410A-11-3-Net-Weight-Cylinder_hoenungy.html
- Rochín, V. R. (2014). *Termodinámica*. CDMX: UNAM.
- Rodríguez, A. M. (2021). *DISEÑO E INSTALACIÓN DE UN SECADOR DE CAFÉ INDUSTRIAL GEOTÉRMICO EN MESILLA, NAYARIT*. CDMX: UNAM.
- RÖSSLER, M. (2019). *FANS FOR HEAT PUMPS*. MULFINGEN: TECH MAG.
- S&P. (16 de Agosto de 2018). *¿Cuál es el mejor ventilador? Conoce los tipos de ventiladores*. Obtenido de <https://www.solerpalau.com/es-es/blog/tipos-ventiladores/>
- S&P. (2021). *Centrífugos serie CEB-T*. Obtenido de <https://www.solerpalau.mx/producto.php?linea=Comercial&modelo=Centr%C3%ADfugos&submodelo=CEB-T>
- SACIFIA, r. (2022). *Forma de carga recomendada para sistemas de refrigeración con Compresores Comerciales Danfoss*. . Danfoss.
- Saginomiya, D. (6 de Octubre de 2021). *Danfoss Saginomiya 4 - Way Reversing Valves*. Obtenido de <https://assets.danfoss.com/documents/91610/AD000086413685en-000301.pdf>
- SENER. (11 de Septiembre de 2021). *PROGRAMA DE DESARROLLO DEL SISTEMA ELÉCTRICO NACIONAL 2018-2032*. Obtenido de <https://base.energia.gob.mx/prodesen/PRODESEN2018/PRODESEN18.pdf>
- Skintec. (3 de Marzo de 2022). *AISLANROLL. LANA DE VIDRIO CON FOIL DE ALUMINIO*. Obtenido de <https://skintec.cl/index.php/productos/item/25-aislanroll-lana-de-vidrio-con-foil-de-aluminio>
- SMN. (30 de Diciembre de 2021). *Resúmenes Mensuales de Temperaturas y Lluvia*. Obtenido de <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/temperaturas-y-lluvias/resumenes-mensuales-de-temperaturas-y-lluvias>

- Solana, M. (22 de Diciembre de 2020). *Pro instalaciones*. Obtenido de <https://www.proinstalaciones.com/articulos/informativo/5089-revision-de-la-normativa-f-gas-que-cambios-traera>
- SOLOCLIMA. (2020). *YouTube*. Obtenido de La Refrigeración renovable YA es posible gracias a la COMPRESION TERMICA: <https://www.youtube.com/watch?v=YbKVn1AuMGY&list=LL&index=2>
- Spitler, J. D. (2021). *Recent Developments in ground source Heat Pump research*. Oklahoma: Oklahoma State University.
- STACEY F.D., L. D. (1988). *Thermal history of the Earth: a corollary concerning non-linear mantle rheology*. Phys. Earth. Planet. Inter.
- Supercompresores. (25 de Agosto de 2021). *Compresores tipo Scroll para aire acondicionado y refrigeración*. Obtenido de <https://www.supercompresores.com/scroll/>
- The Linde group. (2009). *Hoja de producto: R-410A*. Barcelona: The Linde group.
- Touceda, F. T. (2021). *ESTUDIO DEL PROCESO DE EBULLICIÓN FORZADA DE LA MEZCLA AMONIACO/AGUA EN INTERCAMBIADORES DE PLACAS PARA EQUIPOS DE REFRIGERACIÓN POR ABSORCIÓN*. Obtenido de Transferencia de calor en intercambiadores de placas: <https://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/8491/06CAPITULO2INTERCAMBIADORES DEPLACAS.pdf?sequence=5&isAllowed=y>
- TRANE. (2015). *Trane EnviroWise™ Geothermal Systems*. TRANE.
- TRS. (1 de Marzo de 2022). *Bombas de Vacío*. Obtenido de <https://trspartes.com/productos/insumos-y-herramientas/bombas-de-vacio/>
- UNEFM. (2022). *TRANSFERENCIA DE CALOR EN SUPERFICIES EXTENDIDAS (ALETAS)*. UNEFM.
- VELÁZQUEZ, J. I. (2020). *Energía geotérmica en México: aprovechamiento sustentable para climatización y refrigeración*. UASLP.
- VILLAGOMEZ, O. D. (2010). *DISEÑO DE UN CONDENSADOR DE CORAZA Y TUBOS*. CDMX: IPN.
- Xu, X., Hwang, Y., & Radermacher, R. (2013). Performance comparison of R410A and R32 in vapor injection cycles. *International Journal of refrigeration*, 892-903.
- Yañez, G. (2018). *MUNDO HVAC&R*. Obtenido de Gases Refrigerantes ¿Culpables del daño a la capa de ozono?: <https://www.mundohvacr.com.mx/2008/07/gases-refrigerantes-%C2%BFculpables-del-dano-a-la-capade-ozono/>
- Yu, S. (21 de Abril de 2020). *Linked-In*. Obtenido de <https://www.linkedin.com/pulse/difference-between-copper-tubes-using-r410a-refrigerant-summer-yu?articleId=6658175555843776512>
- Yunus A. Cengel, A. J. (2011). *Transferencia de calor y masa*. CDMX: Mc Graw Hill.

- ZAFRA, E. A. (2018). *ANÁLISIS DE FACTIBILIDAD DE LA INSTALACIÓN DE BOMBAS DE CALOR GEOTÉRMICAS EN MÉXICO*. CDMX: UNAM.
- Zambrano, L. R. (2019). *Apuntes Semana 6* . Obtenido de Aletas:
<https://sites.google.com/site/201902luisrvargas/apuntes/semana-6>
- Zárraga, J. G. (2009). *La bomba de calor*. Estado de México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Zhai, X. M. (2011). A review for the applications and integrated approaches of ground-coupled heat pump systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15.

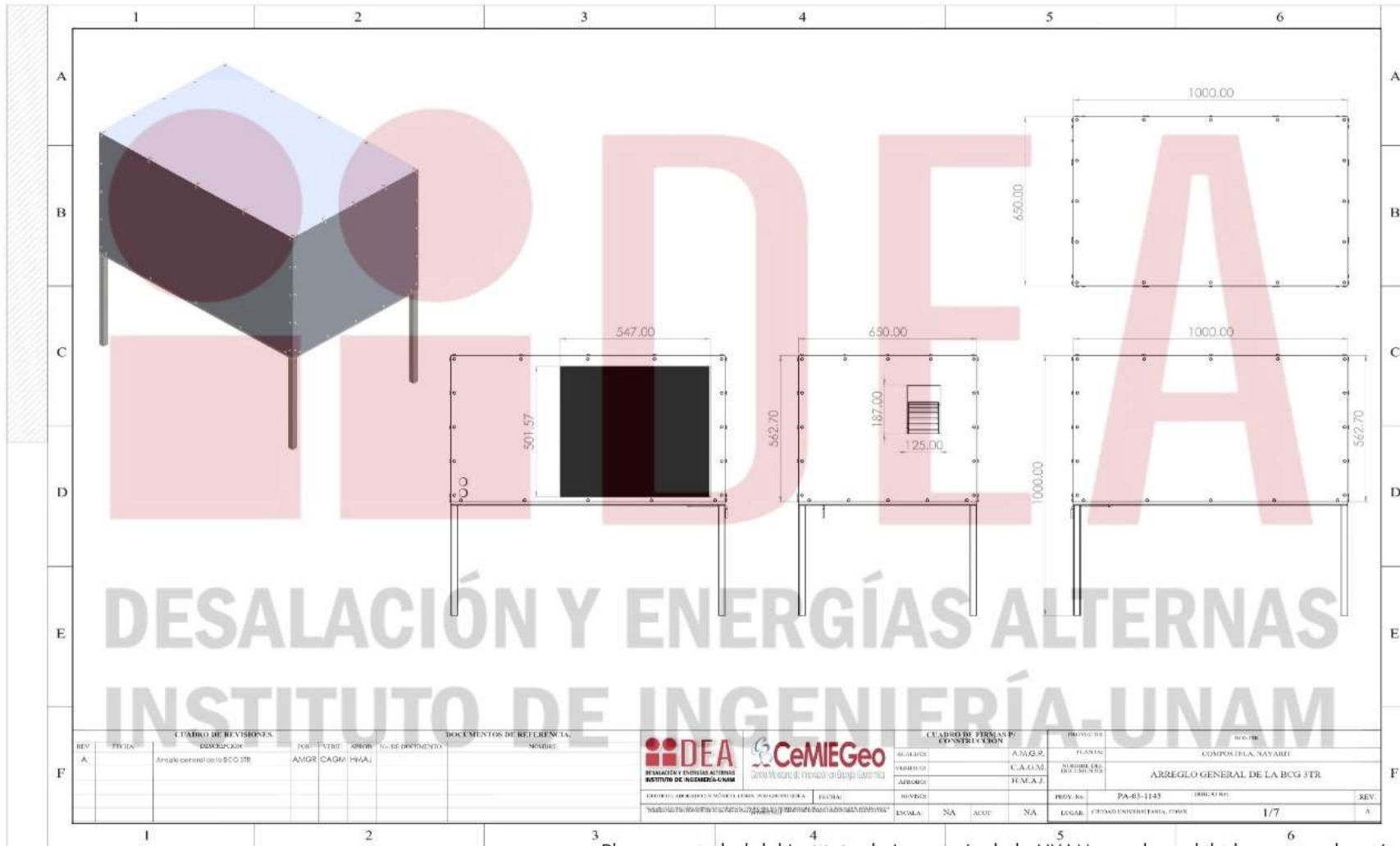
8. ANEXOS

En esta parte de la tesis se incluyen las fichas técnicas de los equipos que forman parte de la BCG 3 TR, así como los planos que se siguieron para llevar a cabo la construcción y montaje de la bomba dentro del laboratorio; todo esto con el propósito para que el lector de este trabajo conozca el origen, características y dimensiones de los equipos y que se dé cuenta que todo este proyecto siguió un proceso escalonado.

8.1 PLANOS DE LA BCG 3 TR

El siguiente apartado muestra los planos de la BCG 3 TR con el propósito de facilitar la interpretación del diseño y por ende la manufactura y construcción del equipo.

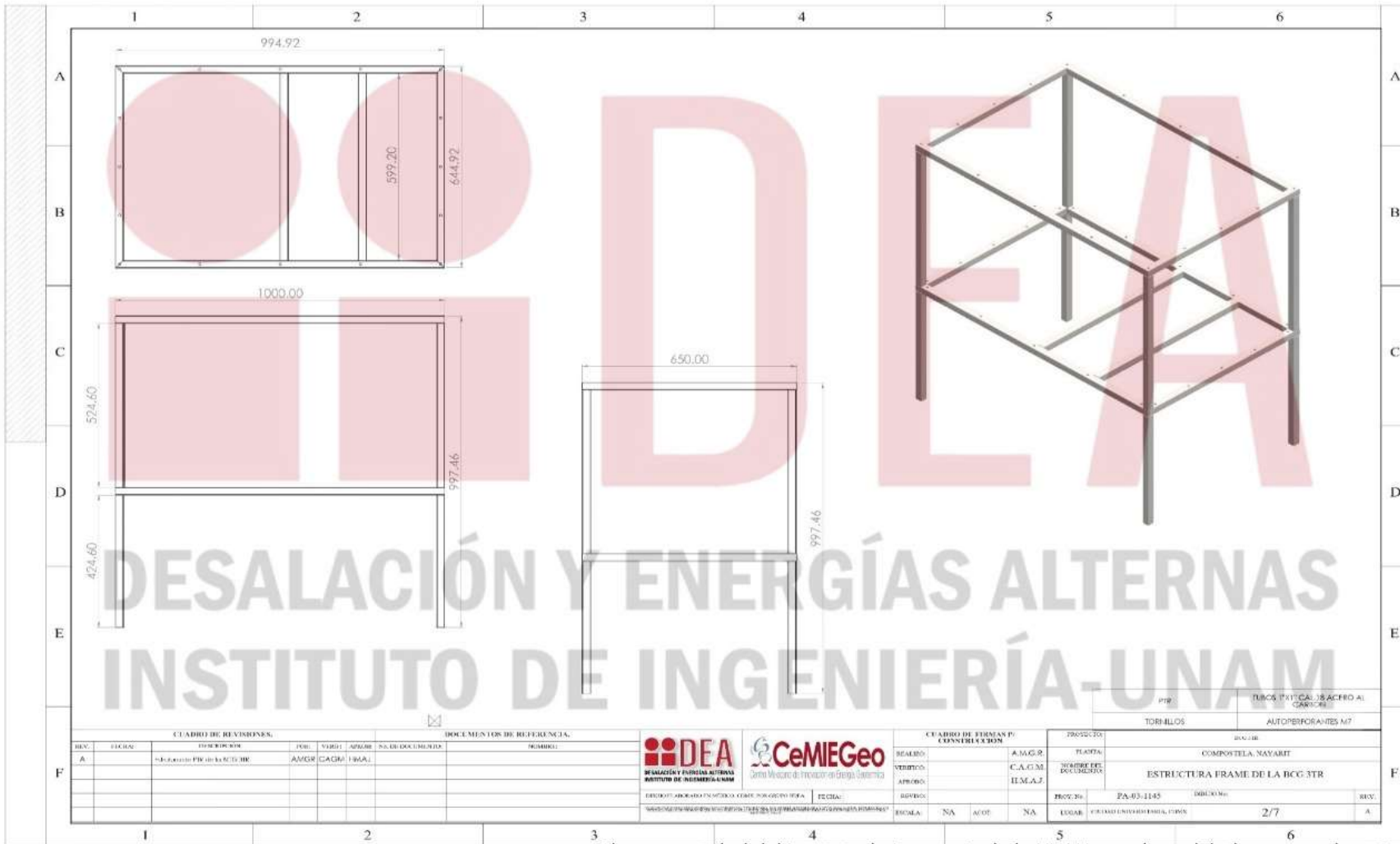
8.1.1 ARREGLO GENERAL DE LA BCG 3 TR



Plano propiedad del Instituto de Ingeniería de la UNAM, queda prohibida su reproducción

Imagen 164 Arreglo general de la BCG 3 TR (elaboración propia)

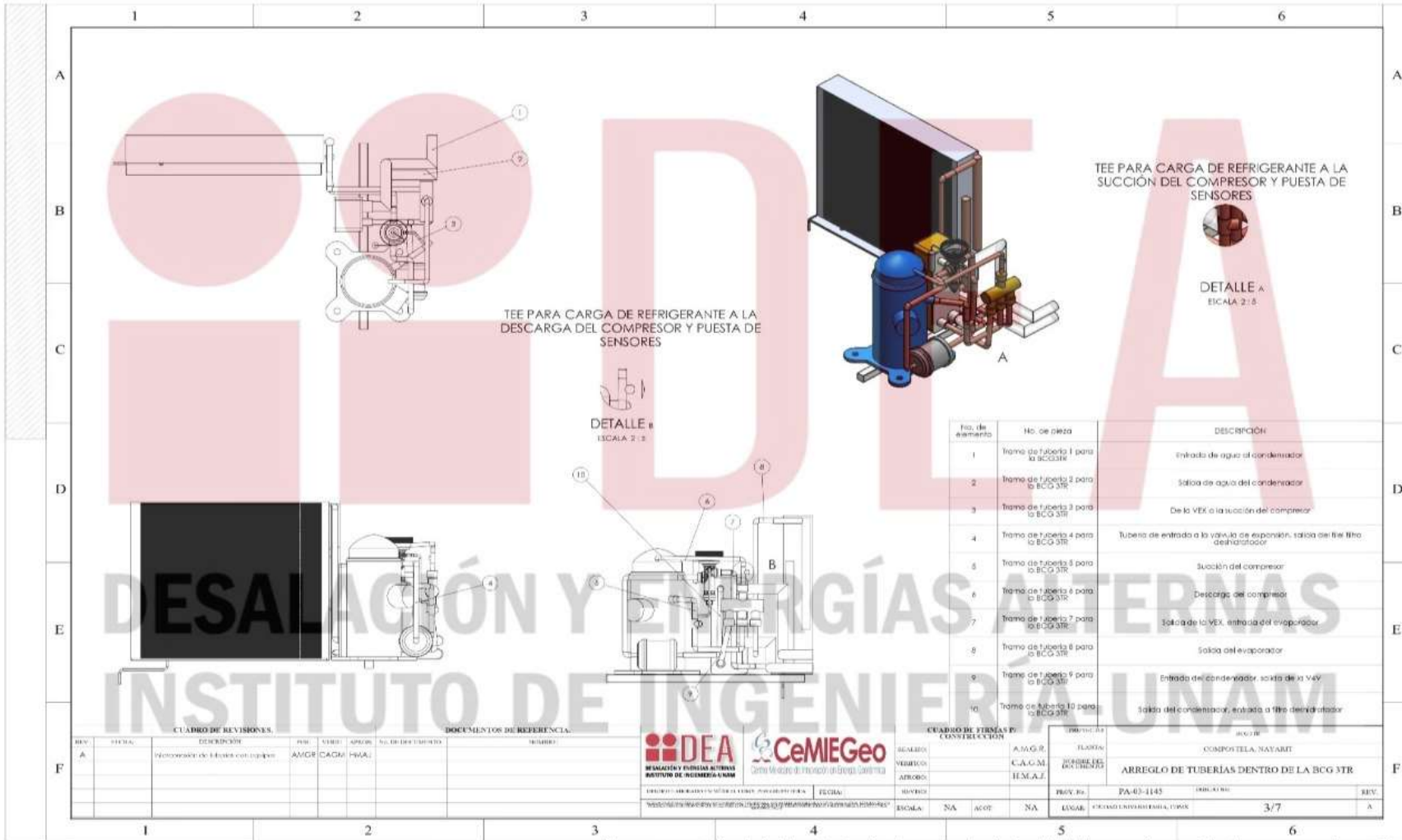
8.1.2 ESTRUCTURA FRAME DE LA BCG 3 TR



Plano propiedad del Instituto de Ingeniería de la UNAM, queda prohibida su reproducción

Imagen 165 Estructura FRAME de la BCG 3 TR (elaboración propia)

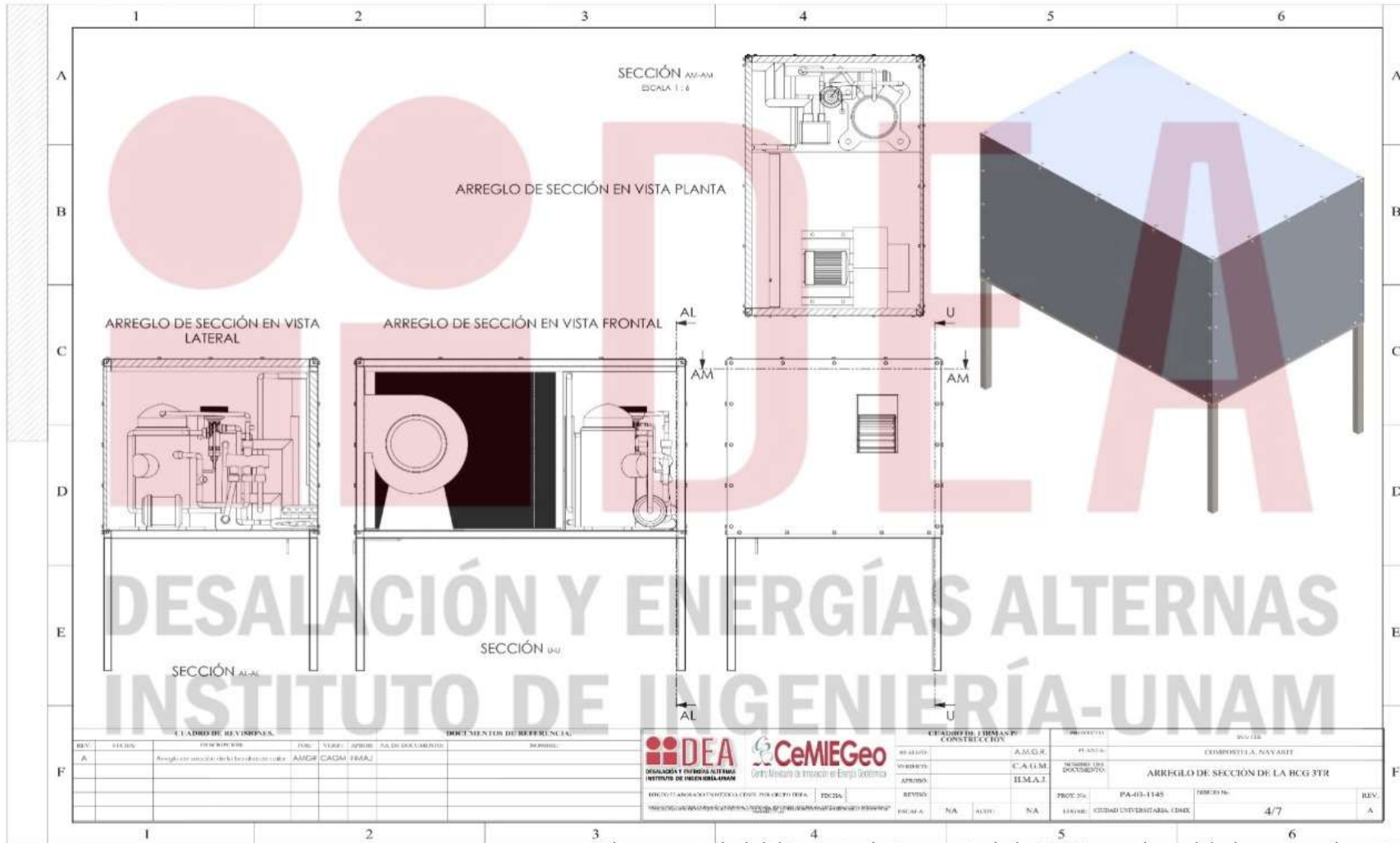
8.1.3 ARREGLO DE TUBERÍAS Y LOCALIZACIÓN DE SENSORES DENTRO DE LA BCG 3 TR



Plano propiedad del Instituto de Ingeniería de la UNAM, queda prohibida su reproducción

Imagen 166 Interconexión de tuberías y puesta de sensores dentro de la BCG 3 TR (elaboración propia)

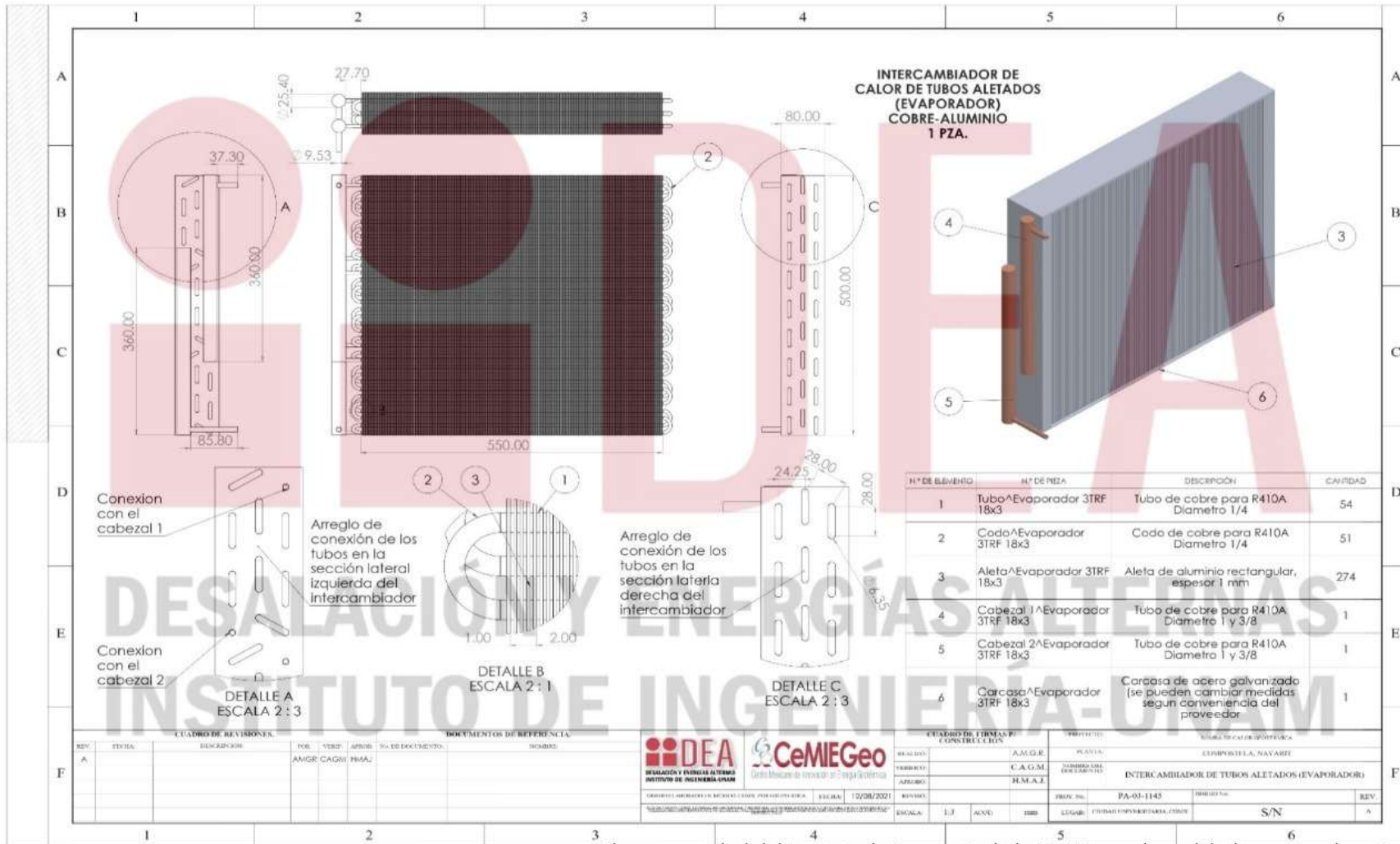
8.1.4 ARREGLO DE SECCIÓN DE LA BCG 3 TR



Plano propiedad del Instituto de Ingeniería de la UNAM, queda prohibida su reproducción

Imagen 167 Arreglo de sección de la BCG 3 TR (elaboración propia)

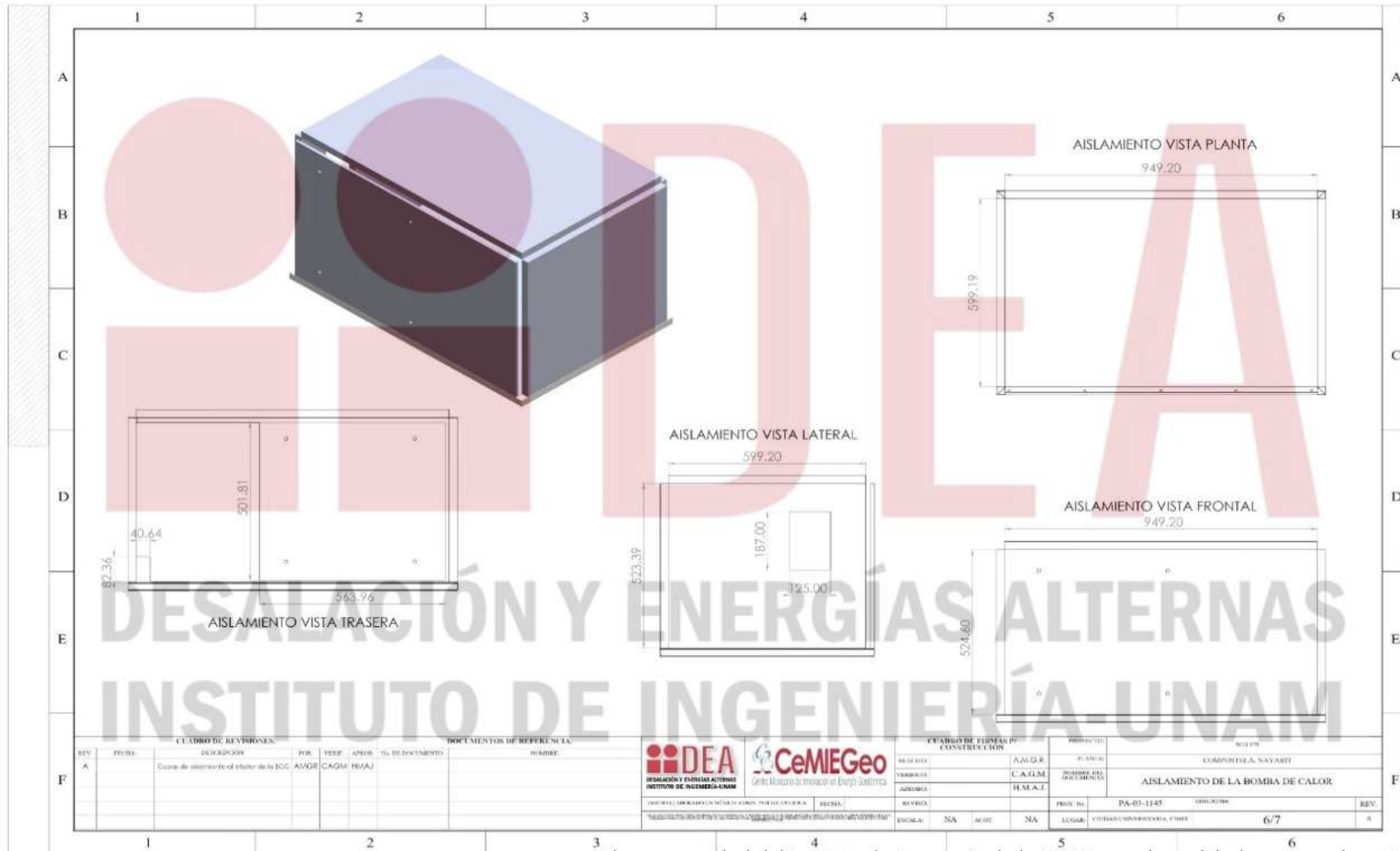
8.1.5 PLANOS DEL EVAPORADOR



Plano propiedad del Instituto de Ingeniería de la UNAM, queda prohibida su reproducción

Imagen 168 Planos del evaporador de la BCG 3 TR (elaboración propia)

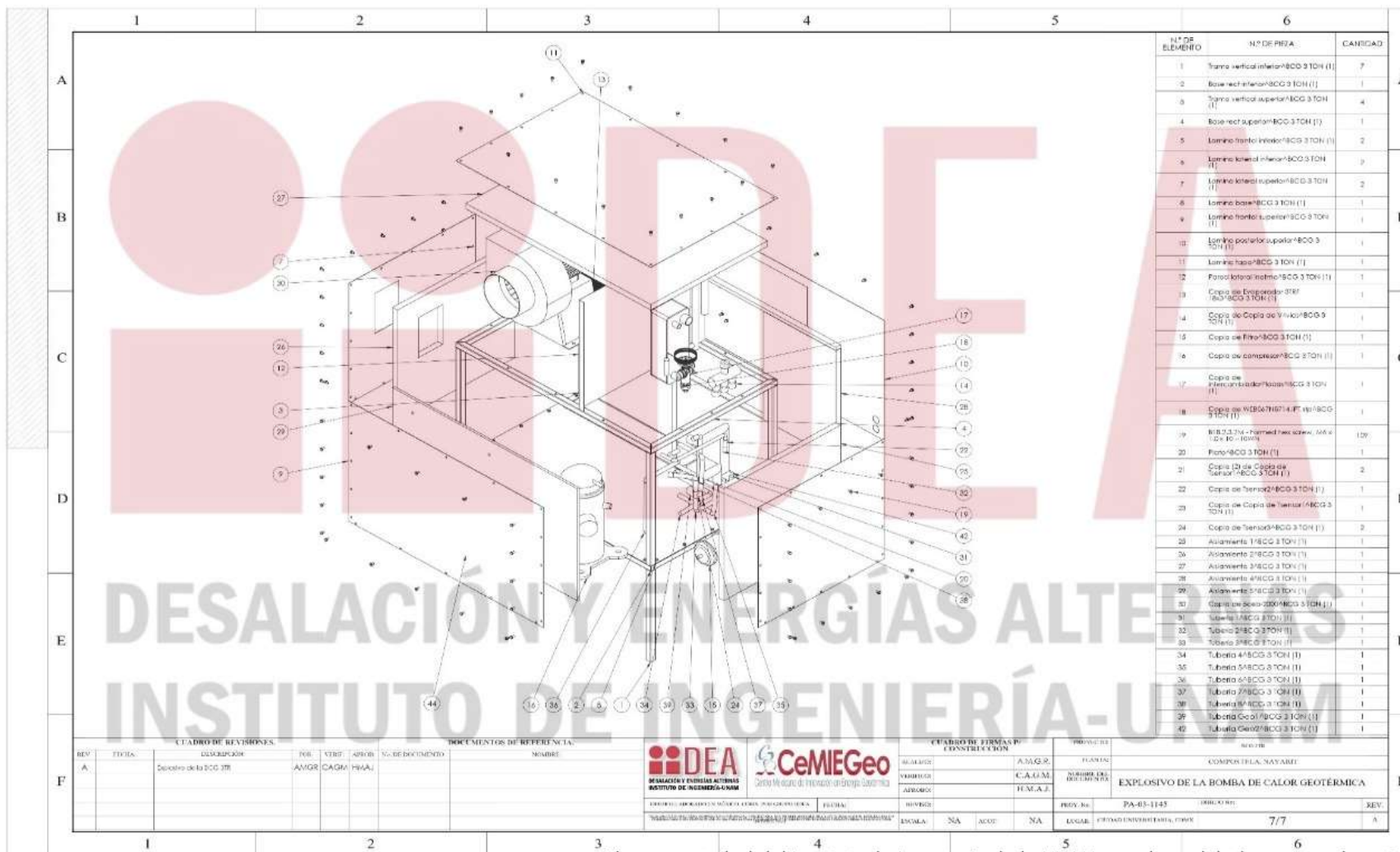
8.1.6 CAPAS DE AISLAMIENTO DENTRO DE LA BCG 3 TR



Plano propiedad del Instituto de Ingeniería de la UNAM, queda prohibida su reproducción

Imagen 169 Aislante de lana mineral en las paredes y techo de la BCG 3 TR (elaboración propia)

8.1.6 EXPLOSIVO DE LA BCG 3 TR



Plano propiedad del Instituto de Ingeniería de la UNAM, queda prohibida su reproducción

Imagen 170 Explosivo de la BCG 3 TR (elaboración propia)

8.1.8 DIAGRAMA ELÉCTRICO

La parte eléctrica no forma parte de los objetivos ni alcance de esta tesis, sin embargo, y esperando que generaciones posteriores se interesen por este trabajo, se incluye el diagrama eléctrico para su observación y si se gusta, futura interpretación.

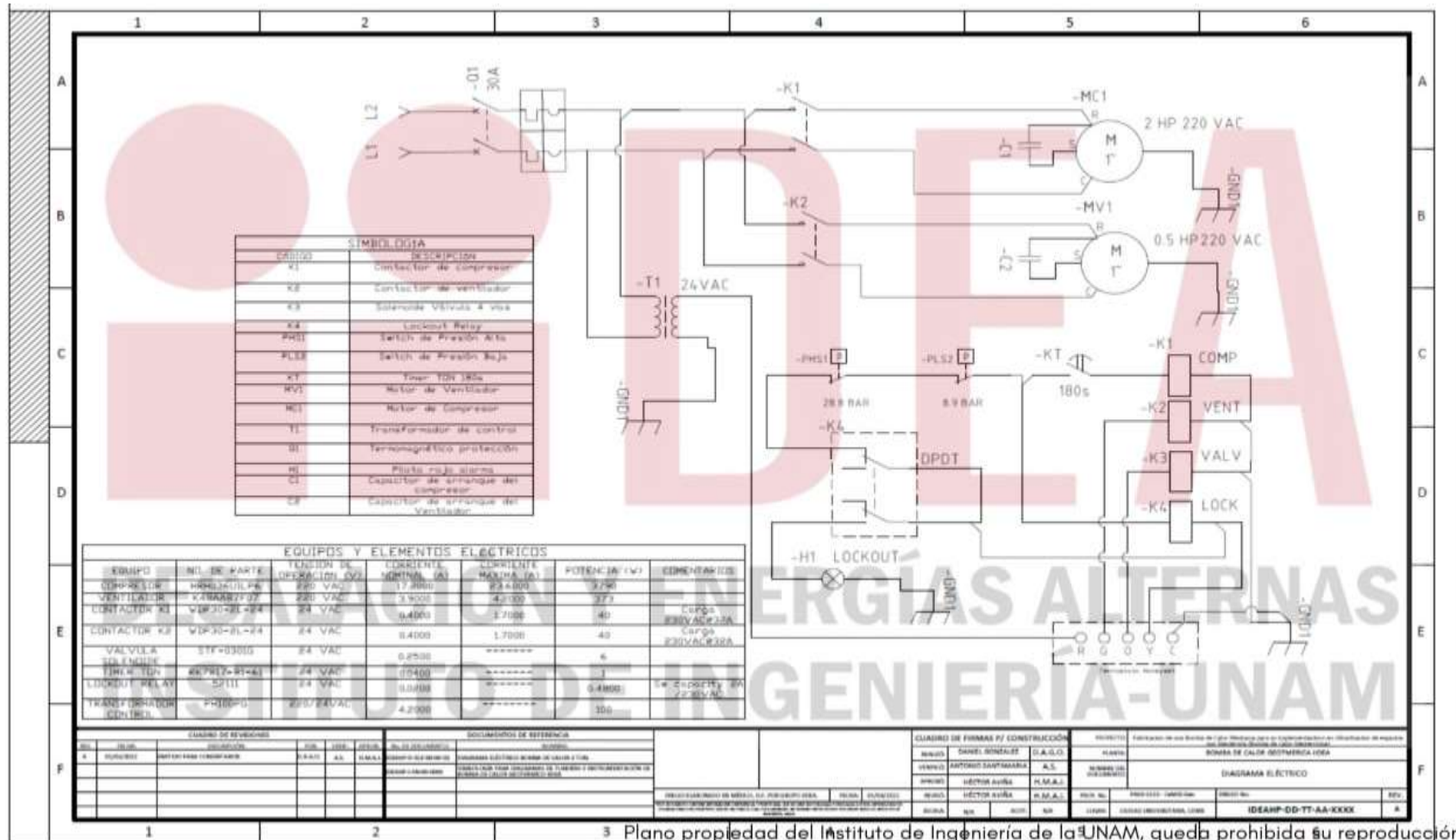


Imagen 171 Diagrama eléctrico de la BCG 3 TR

8.2 HOJA DE DATOS DE EQUIPO

Los siguientes documentos muestran las especificaciones del fluido de trabajo y de los equipos principales que forman parte de la BCG 3 TR.

8.2.1 FICHA TÉCNICA DEL REFRIGERANTE R-410a



New tables of the thermodynamic properties of Freon™ 410A refrigerant (ASHRAE designation R-410A [50/50]) have been developed and are presented here. These tables are based on extensive experimental measurements. Equations have been developed, based on the Martin-Hou equation of state, which represent the data with accuracy and consistency throughout the entire range of temperature, pressure, and density. Vapor enthalpy and entropy are calculated from the standard Martin-Hou equations. Additional equations have been developed for the calculation of saturated liquid enthalpy, latent enthalpy and saturated liquid entropy and are presented here.

Physical Properties

Chemical Formula	$\text{CH}_2\text{F}_2/\text{CHF}_2\text{CF}_2$ (50/50% by weight)
Molecular Weight	72.58
Boiling Point at One Atmosphere	-51.58 °C (-60.84 °F)
Critical Temperature	72.13 °C (161.83 °F) 345.28 K (621.50 °R)
Critical Pressure	4926.1 kPa (abs) (714.50 psia)
Critical Density	488.90 kg/m ³ (30.52 lb/ft ³)
Critical Volume	0.00205 m ³ /kg (0.0328 ft ³ /lb)

Units and Factors

t = Temperature in °C
T = Temperature in K = °C + 273.15
P = Absolute Pressure in KiloPascals (kPa (abs))
v_f = Volume of saturated liquid in m ³ /kg
v_g = Volume of saturated vapor in m ³ /kg
V = Volume of superheated vapor in m ³ /kg
$d_f = 1/v_f$ = Density of saturated liquid in kg/m ³
$d_g = 1/v_g$ = Density of saturated vapor in kg/m ³
h_f = Enthalpy of saturated liquid in kJ/kg
h_{fg} = Enthalpy of vaporization in kJ/kg
h_g = Enthalpy of saturated vapor in kJ/kg
H = Enthalpy of superheated vapor in kJ/kg
s_f = Entropy of saturated liquid in kJ/(kg)(K)
s_g = Entropy of saturated vapor in kJ/(kg)(K)
S = Entropy of superheated vapor in kJ/(kg)(K)
C_p = Heat capacity at constant pressure in kJ/(kg)(°C)
C_v = Heat capacity at constant volume in kJ/(kg)(°C)
v_s = Velocity of sound in m/sec

The gas constant, $R = 8.314 \text{ J/(mole)(K)}$ for Freon™ 410A,
 $R = 0.11455 \text{ kJ/kg K}$

One atmosphere = 101.325 kPa

Reference point for enthalpy and entropy:

$h_f = 200 \text{ kJ/kg at } 0 \text{ °C}$
$s_f = 1 \text{ kJ/kg K at } 0 \text{ °C}$

Freon® 410A

Refrigerant

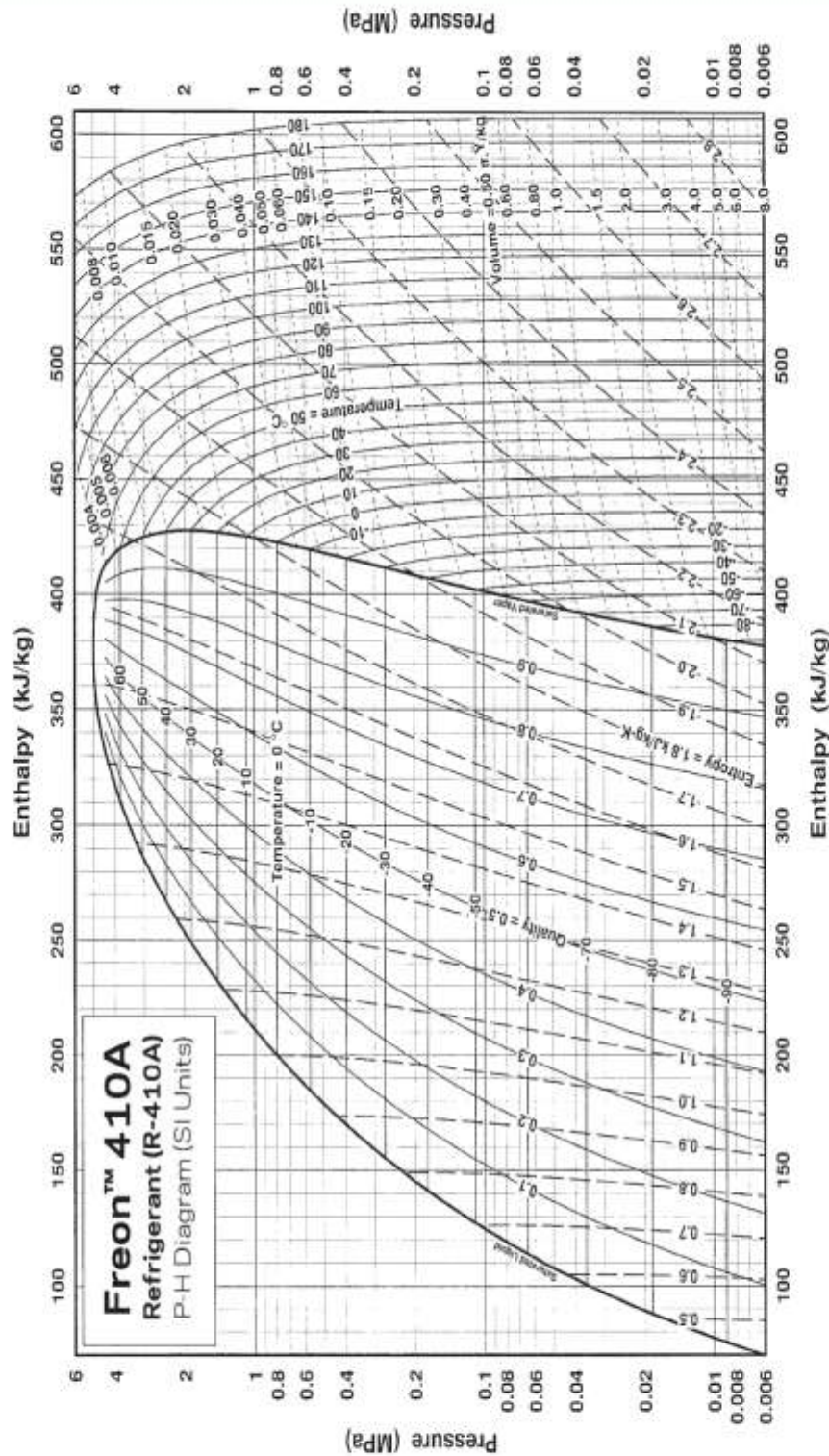
Table 2. Freon™ 410A Superheated Vapor—Constant Pressure Table (continued)

 V = Volume in m³/kg H = Enthalpy in kJ/kg S = Entropy in kJ/(kg)K Saturation Properties in Light Blue

Temp [°C]	Absolute Pressure (kPa)												Temp [°C]
	2500.0			2600.0			3000.0			3200.0			
	43.14 °C			46.28 °C			49.26 °C			52.09 °C			
	V	H	S	V	H	S	V	H	S	V	H	S	
45	0.0089	426.4	1.7275	0.0081	425.7	1.7199	0.0074	424.8	1.7123	0.0068	423.8	1.7047	45
50	0.0097	429.9	1.7384	0.0080	429.9	1.7422	0.0075	428.4	1.7172				50
55	0.0103	438.5	1.7953	0.0091	441.5	1.7888	0.0081	436.2	1.7472	0.0071	430.1	1.7242	55
60	0.0107	448.4	1.8117	0.0096	449.5	1.7928	0.0086	444.9	1.7735	0.0077	439.8	1.7534	60
65	0.0112	460.7	1.8325	0.0101	458.9	1.8148	0.0091	452.8	1.7972	0.0082	448.4	1.7791	65
70	0.0116	473.6	1.8521	0.0105	463.9	1.8355	0.0095	460.3	1.8191	0.0086	456.4	1.8025	70
75	0.0120	487.6	1.8707	0.0109	470.7	1.8551	0.0099	467.4	1.8396	0.0090	463.9	1.8241	75
80	0.0124	498.1	1.8886	0.0113	477.2	1.8736	0.0103	474.1	1.8589	0.0094	471.0	1.8444	80
85	0.0128	498.2	1.9058	0.0116	483.5	1.8914	0.0106	480.7	1.8774	0.0097	477.8	1.8636	85
90	0.0131	492.2	1.9224	0.0120	489.7	1.9085	0.0110	487.1	1.8951	0.0101	484.4	1.8818	90
95	0.0135	498.1	1.9386	0.0123	495.7	1.9251	0.0113	493.3	1.9121	0.0104	490.8	1.8994	95
100	0.0138	503.9	1.9542	0.0126	501.7	1.9412	0.0116	498.4	1.9286	0.0107	497.1	1.9163	100
105	0.0142	509.7	1.9695	0.0130	507.6	1.9568	0.0119	505.4	1.9445	0.0110	503.2	1.9327	105
110	0.0145	515.4	1.9845	0.0133	513.4	1.9720	0.0122	511.3	1.9601	0.0113	509.3	1.9485	110
115	0.0148	521.0	1.9991	0.0136	519.1	1.9869	0.0125	517.2	1.9752	0.0116	515.2	1.9640	115
120	0.0151	526.6	2.0135	0.0139	524.8	2.0015	0.0128	523.0	1.9901	0.0118	521.1	1.9791	120
125	0.0154	532.2	2.0276	0.0142	530.5	2.0156	0.0131	528.7	2.0046	0.0121	526.9	1.9938	125
130	0.0157	537.7	2.0414	0.0144	536.1	2.0298	0.0133	534.4	2.0188	0.0124	532.7	2.0083	130
135	0.0160	543.3	2.0551	0.0147	541.7	2.0437	0.0136	540.1	2.0328	0.0126	538.5	2.0224	135
140	0.0163	548.8	2.0685	0.0150	547.3	2.0573	0.0139	545.7	2.0468	0.0129	544.2	2.0364	140
145	0.0166	554.3	2.0818	0.0153	552.8	2.0707	0.0141	551.4	2.0601	0.0131	549.9	2.0500	145
150	0.0169	559.8	2.0948	0.0155	558.4	2.0838	0.0144	557.0	2.0735	0.0134	555.6	2.0635	150
155	0.0171	565.3	2.1078	0.0158	564.0	2.0969	0.0146	562.6	2.0866	0.0136	561.2	2.0769	155
160	0.0174	570.8	2.1205	0.0161	569.5	2.1098	0.0149	568.2	2.0996	0.0139	566.9	2.0899	160
165	0.0177	576.3	2.1332	0.0163	575.1	2.1225	0.0151	573.8	2.1125	0.0141	572.5	2.1029	165
170	0.0180	581.8	2.1457	0.0166	580.6	2.1351	0.0154	579.4	2.1252	0.0143	578.1	2.1157	170
175	0.0182	587.3	2.1581	0.0168	586.2	2.1478	0.0156	585.0	2.1377	0.0145	583.8	2.1283	175
180	0.0185	592.9	2.1703	0.0171	591.7	2.1599	0.0159	590.6	2.1501	0.0148	589.4	2.1408	180
185	0.0188	598.4	2.1825	0.0173	597.3	2.1722	0.0161	596.2	2.1624	0.0150	595.0	2.1532	185
190	0.0190	604.0	2.1945	0.0176	602.9	2.1843	0.0163	601.8	2.1746	0.0152	600.7	2.1655	190
195	0.0193	609.5	2.2065	0.0179	608.5	2.1963	0.0166	607.4	2.1867	0.0155	606.3	2.1776	195
200				0.0181	614.1	2.2082	0.0168	613.0	2.1987	0.0157	612.0	2.1896	200
205										0.0159	617.7	2.2016	205

Freon™ 410A

Refrigerant



For more information on Freon™ refrigerants, visit freon.com

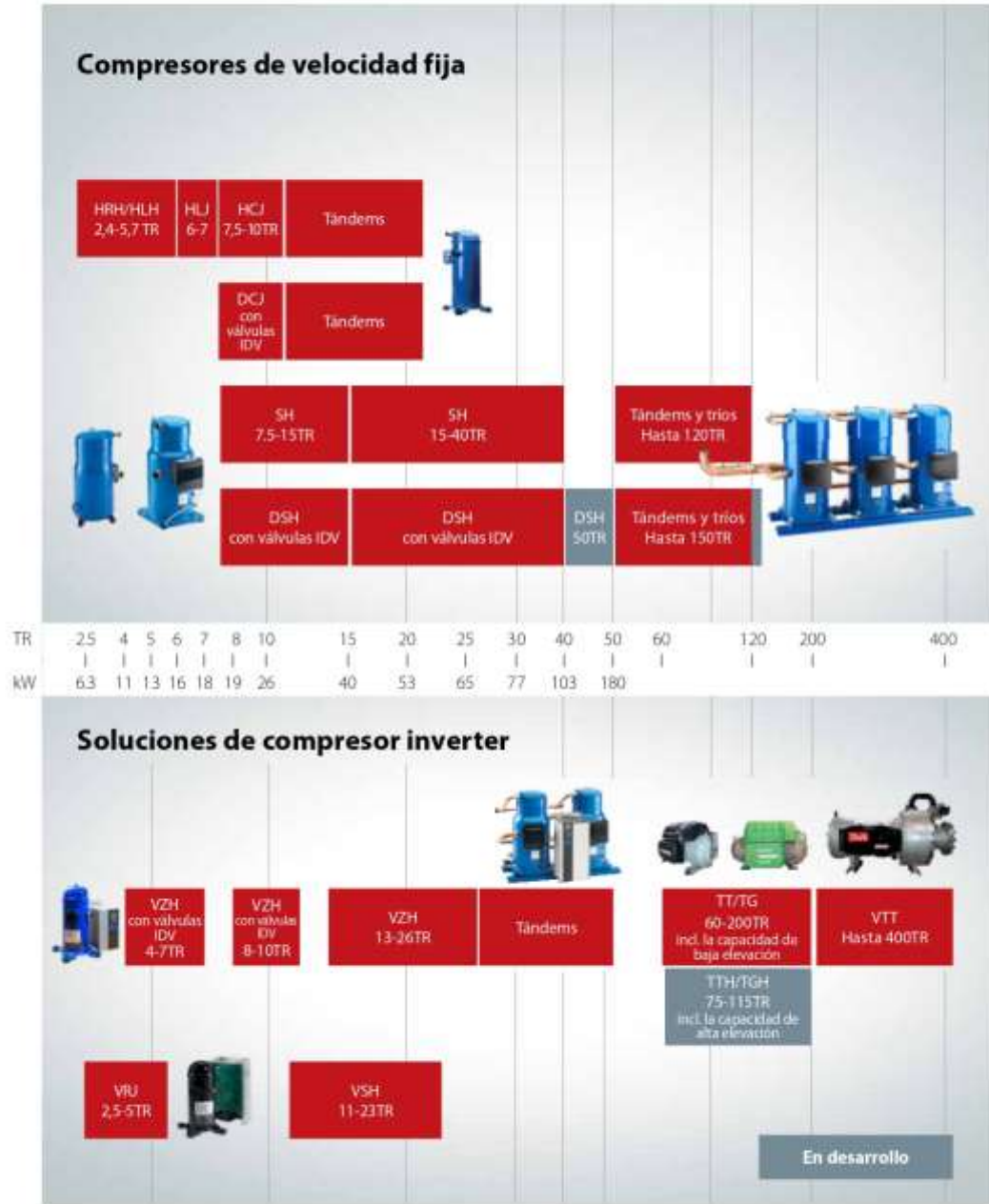
The information set forth herein is furnished free of charge and based on technical data that Chemours believes to be reliable. It is intended for use by persons having technical skill of their own risk. Because conditions of use are outside our control, Chemours makes no warranties, expressed or implied, and assumes no liability in connection with any use of this information. Nothing herein is to be taken as a license to operate under, or a recommendation to infringe, any patents or patent applications.

© 2019 The Chemours Company F.C. LLC. "Freon" and any associated logos are trademarks or copyrights of The Chemours Company F.C. LLC. Chemours™ and the Chemours Logo are trademarks of The Chemours Company.

Replaces H-544/23-4
D-11747 (1/19)

8.2.2 FICHA TÉCNICA DEL COMPRESOR SELECCIONADO

Soluciones Danfoss para **toda una vida de ahorro**



Valores nominales (TR): 60 Hz, 45°F/145 °F/SH 20 °F/5°C, 10 °F
Valores nominales (KW): 50 Hz, 5 °C/30 °C/SH 10 K/5°C, 0 K

Compresores Scroll Danfoss, series H y S

R-410A: 460 V/trifásico/60 Hz

Modelo	Potencia frigorífica nominal	60 Hz, niveles ARI			
		Capacidad de refrigeración		Eficiencia	
		TR a 60 Hz	W	Btu/h	COP en W/W
HRH029	2,4	8 500	29 000	2,99	10,20
HRH031	2,6	9 100	31 100	2,99	10,20
HRH032	2,7	9 400	32 100	3,02	10,31
HRH034	2,8	10 100	34 500	2,99	10,20
HRH036	3,0	10 400	35 500	2,99	10,20
HRH038	3,2	11 100	37 900	2,93	10,00
HRH040	3,3	12 200	41 600	3,02	10,31
HRH041	3,3	12 100	41 300	2,99	10,20
HRH044	3,7	13 000	44 400	3,02	10,31
HRH049	4,1	14 300	48 800	3,08	10,51
HRH051	4,3	15 200	51 900	3,14	10,72
HRH054	4,5	16 000	54 600	3,11	10,61
HRH056	4,7	16 700	57 000	3,11	10,61
HLH061	5,1	18 100	61 800	3,17	10,82
HLH068	5,7	20 100	68 600	3,20	10,92
HLJ072	6,0	21 200	72 400	3,19	10,89
HLJ075	6,3	22 300	76 100	3,25	11,09
HLJ083	6,9	24 300	82 900	3,22	10,99
DCJ091	7,5	27 100	92 500	3,23	11,01
DCJ106	8,8	31 500	107 400	3,25	11,11
DCJ121	10	35 700	121 900	3,21	10,96
DSH090	7,5	27 470	93 800	3,21	10,96
DSH105	9	32 280	110 200	3,22	11,00
DSH120	10	36 630	125 000	3,26	11,11
DSH140	12	41 510	141 700	3,26	11,12
DSH161	13	47 220	161 200	3,21	10,96
DSH184	15	53 160	181 400	3,25	11,09
DSH240	20	71 720	244 800	3,20	10,91
DSH295	25	87 570	298 900	3,25	11,09
DSH381	32	110 210	376 200	3,20	10,91
DSH485	40	141 850	484 100	3,25	11,10

Calificación en proceso con refrigerantes de **bajo GWP**
R32, R452B

Datos correspondientes al Código 4:

400 V/50 Hz y 460 V/60 Hz, trifásico.

Peso neto con carga de aceite

TR = tonelada de refrigeración

COP = coeficiente de rendimiento,

400 V/trifásico/50 Hz

EER = ratio de eficiencia energética,

460 V/trifásico/60 Hz

ARI: temp. evap: 7,2 °C/45 °F; temp. cond:

54,4 °C/130 °F; recalentamiento: 11,1 K/20 °F;

subenfriamiento: 8,3 K/15 °F

Si desea conocer todos los datos, consultar las tablas de capacidad o determinar las posibilidades de uso con otros refrigerantes, visite: coolselector.danfoss.com

8.2.3 FICHA TÉCNICA DE LA VÁLVULA DE EXPANSIÓN SELECCIONADA



aerospace
climate control
electromechanical
filtration
fluid & gas handling
hydraulics
pneumatics
process control
sealing & shielding



Válvulas de expansión termostática Sporlan

RACE Catalogue 10-10/ES, Abril 2010



ENGINEERING YOUR SUCCESS.

**VÁLVULAS DE EXPANSIÓN TERMOSTÁTICA
CAPACIDADES DE REFRIGERANTES - TONELADAS DE REFRIGERACIÓN**
22, 422D, 407C
APLICACIONES PARA AIRE ACONDICIONADO Y BOMBAS DE CALOR

TIPOS DE VÁLVULA	CAPACIDAD NOMINAL	REFRIGERANTE								
		22			422D ^Q			407C		
		CARGAS TERMOSTÁTICAS RECOMENDADAS ZCP100, ZGAW								
		TEMPERATURA DEL EVAPORADOR °F								
		40°	20°	0°	40°	20°	0°	40°	20°	0°
ER, RC	1	1,0	1,1	1,0	0,71	0,66	0,66	0,9	1,0	0,9
ER, RC	1-1/2	1,8	1,9	1,7	1,25	1,32	1,15	1,6	1,7	1,5
ER, RC	2	2,3	2,5	2,2	1,64	1,74	1,51	2,1	2,3	2,0
ER, RC	3	3,2	3,5	3,1	2,26	2,42	2,10	2,9	3,2	2,8
ER, RC	4	4,2	4,6	4,1	2,99	3,17	2,75	3,9	4,1	3,6
ER, RC	5	5,0	5,5	4,9	3,56	3,78	3,27	4,6	4,9	4,3
ER, RC	6	6,0	6,5	5,3	4,28	4,53	3,54	5,5	5,9	4,7
ER	8	8,0	8,7	7,8	5,70	6,04	5,24	7,4	7,9	6,9
ER	10	10,4	11,4	10,2	7,44	7,86	6,83	9,6	10,3	9,0
ER	12	12,1	13,2	11,8	8,62	9,14	7,92	11,1	11,9	10,5

REFRIGERANTE	TEMPERATURA DEL LIQUIDO DE ENTRADA A LA VET °F														
	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°	100°	110°	120°	130°	140°
	FACTOR DE CORRECCIÓN, TEMPERATURA DEL LIQUIDO FC														
22	1,56	1,51	1,45	1,40	1,34	1,29	1,23	1,17	1,12	1,06	1,00	0,94	0,88	0,82	0,76
422D	1,99	1,90	1,80	1,70	1,60	1,50	1,41	1,31	1,20	1,10	1,00	0,90	0,79	0,68	0,57
407C	1,69	1,62	1,55	1,49	1,42	1,35	1,28	1,21	1,14	1,07	1,00	0,92	0,85	0,77	0,69

Estos factores incluyen correcciones de la densidad de los líquidos refrigerantes y el efecto de refrigeración neto y se basan en una temperatura de evaporación de 0°F. No obstante, pueden ser usados para cualquier temperatura de evaporación desde -40°F a 40°F dado que la variación de los factores usados en todo este rango es insignificante.

TEMPERATURA DE EVAPORACIÓN °F	CAIDA DE PRESIÓN EN LA VET (psi)											
	30	50	75	100	125	150	175	200	225	250	275	300
	FACTOR DE CORRECCIÓN, CAIDA DE PRESIÓN FC											
40°	0,55	0,71	0,87	1,00	1,12	1,22	1,32	1,41	1,50	1,58	1,66	1,73
20° & 0°	0,49	0,62	0,77	0,89	1,00	1,10	1,18	1,26	1,34	1,41	1,48	1,55

Capacidad TEV = Clasificación TEV x Temperatura del líquido FC x Pérdida de carga FC — Ejemplo: Capacidad actual de una válvula Tipo S, R-22 de 2 toneladas con evaporador a 20°F, 100 psi de pérdida de carga en la VET, y líquido de entrada a la TEV a 90°F = 2,18 (de la tabla de valores) x 1,06 (temperatura del líquido FC) x 0,89 (pérdida de carga FC) = 2,06 toneladas.

Q R-422D puede ser usado en un sistema con refrigerante R-22 pero la capacidad TEV se verá reducida. Verifique que la capacidad de la válvula alcance para la carga del sistema.
W La válvula RC para aplicaciones R-22 sólo se suministra con elemento VSA.

**VÁLVULAS DE EXPANSIÓN TERMOSTÁTICA
CAPACIDADES DE REFRIGERANTES - TONELADAS DE REFRIGERACIÓN**
410A
APLICACIONES PARA AIRE ACONDICIONADO Y BOMBAS DE CALOR

TIPOS DE VÁLVULA	CAPACIDAD NOMINAL	REFRIGERANTE		
		410A		
		CARGAS TERMOSTÁTICAS RECOMENDADAS ZCP200, ZGA0		
		TEMPERATURA DEL EVAPORADOR °F		
		40°	20°	0°
ER, RC	1	1,2	1,3	1,2
ER, RC	1-1/2	2,1	2,3	2,0
ER, RC	2	2,7	3,0	2,7
ER, RC	3	3,8	4,1	3,7
ER, RC	4	5,0	5,4	4,9
ER, RC	5	5,9	6,5	5,8
ER, RC	6	7,1	7,8	6,3
ER	8	9,5	10,4	9,3
ER	12-1/2	12,3	13,5	12,1
ER	15	14,3	15,7	14,0

TIPOS DE VÁLVULA	CAPACIDAD NOMINAL	REFRIGERANTE		
		410A		
		CARGAS TERMOSTÁTICAS RECOMENDADAS ZCP200, ZGA		
		TEMPERATURA DEL EVAPORADOR °F		
		40°	20°	0°
OZE-20	20	19,7	21,6	20,4
OZE-25	25	23,7	25,9	24,5
OZE-35	35	32,6	35,6	33,6
OZE-50	50	49,3	54,0	51,0
OZE-60	60	59,2	64,8	61,2

TIPOS DE VÁLVULA	TIPO DE CARTUCHO				
BQ, EBQ, SBQ	AAA	1/3	0,4	0,5	0,4
BQ, EBQ, SBQ	AA	3/4	0,9	1,0	0,9
BQ, EBQ, SBQ	A	1-3/4	1,9	2,1	1,8
BQ, EBQ, SBQ	B	3-1/2	3,4	3,7	3,2
BQ, EBQ, SBQ	C	6	6,2	6,8	5,9

REFRIGERANTE	TEMPERATURA DEL LIQUIDO DE ENTRADA A LA VET °F													
	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140			
	FACTOR DE CORRECCIÓN, TEMPERATURA DEL LIQUIDO FC													
410A	1,30	1,31	1,23	1,17	1,12	1,06	1,00	0,94	0,88	0,82	0,76			

TEMPERATURA DEL EVAPORADOR °F	CAIDA DE PRESIÓN A TRAVÉS DE LA VET (psi)							
	80	120	160	200	240	280	320	360
	FACTOR DE CORRECCIÓN, CAIDA DE PRESIÓN FC							
40°	0,71	0,87	1,00	1,12	1,22	1,32	1,41	1,50
20° & 0°	0,63	0,77	0,89	1,00	1,10	1,18	1,26	1,34

Q La válvula FC para aplicaciones R-410A sólo se suministra con elemento ZGA.

TIPO ER

 Para refrigerantes 22, 410A
 Conectores ODF Soldar

La válvula Sporlan Tipo ER tiene un cuerpo de latón de ajuste externo con conexiones ODF Soldar, un elemento termostático reemplazable y construcción de puerto equilibrado. La válvula ER ha sido diseñada para aplicaciones R-22 y R-410A de aire acondicionado y bombas de calor, es ideal para reemplazar válvulas L, BI, BBI y RI (solamente el modelo no HPB).

Este tipo de válvula tiene dos estilos de cuerpo: un cuerpo pequeño con capacidades de hasta 8 toneladas R-22 y R-410A y un cuerpo grande con capacidades extendidas de 12 toneladas R-22 y 15 toneladas R-410A.

Los elementos de reemplazo disponibles para estas válvulas son: El refrigerante R-22, juego de elemento KT-43-VGA o VCP100 para el cuerpo pequeño y KT-45-5-VGA o VCP100 para el cuerpo grande y

refrigerante R-410A, juego de elemento KT-45-ZGA o ZCP180 para el cuerpo pequeño y KT-45-5-ZGA o ZCP180 para el cuerpo grande.

Esta válvula también puede ser usada en aplicaciones bidireccionales.

Conexiones de salida

1/2" ODF, 5/8" ODF, 7/8" ODF, 1-1/8" ODF

Distribuidores de acoplamiento (Consultar el boletín 20-10)

D260, D262, 1620, 1622, 1112, 1113, 1115, 1116, 1135, 1136, 1137, 1651(R), 1653(R), 1655(R)

Ver los detalles completos de la construcción en la página 35.



ESPECIFICACIONES TAMAÑO DE ELEMENTOS 43 (R-22), 45 (R-410A) Y 45-5, JUNTA FILO DE NAVAJA

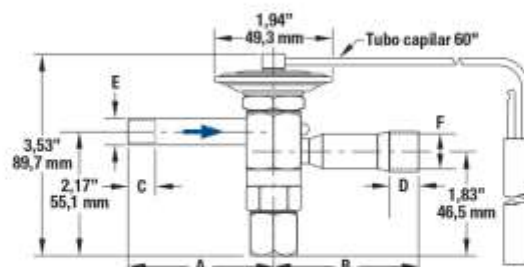
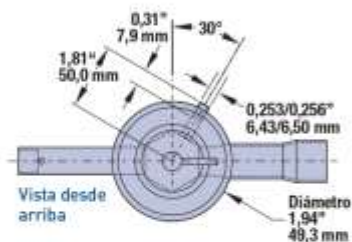
REFRIGERANTE (Código Sporlan)	TIPO DE VÁLVULA	CAPACIDAD NOMINAL Toneladas de refrigeración	ELEMENTO TERMOSTÁTICO TAMAÑO NO.	CARGAS TERMOSTÁTICAS DISPONIBLES	LONGITUD ESTÁNDAR DEL TUBO	CONEXIONES - Pulgadas O ODF Soldar		PESO NETO	PESO CON EMBALAJE	
						ENTRADA	SALIDA			
22 (V) 407C (N) 407A (V) 4220 (V)	ERVE-1	1	43	VGA VCP100	60 pul., 1,5 m	3/8	1/2	1 lb, 454 g	1-1/2 lbs, 680 g	
	ERVE-1-1/2	1-1/2					5/8			
	ERVE-2	2					3/8 o 1/2			1/2 o 5/8
	ERVE-3	3					1/2			1/2, 5/8 o 7/8
	ERVE-4	4					5/8			5/8 o 7/8
	ERVE-5	5					7/8			7/8
	ERVE-6	6					1-1/8			1-1/8
	ERVE-8	8								
	ERVE-10	10	45-5	ZGA ZCP180	60 pul., 1,5 m	3/8	1/2	1 lb, 454 g	1-1/2 lbs, 680 g	
	ERVE-12	12					5/8			
	ERZE-1	1					1/2 o 5/8			
	ERZE-1-1/2	1-1/2					1/2, 5/8 o 7/8			
410A (Z)	ERZE-2	2	45	ZGA ZCP180	60 pul., 1,5 m	3/8 o 1/2	5/8 o 7/8	1 lb, 454 g	1-1/2 lbs, 680 g	
	ERZE-3	3					7/8			
	ERZE-4	4					1-1/8			
	ERZE-5	5								
	ERZE-6	6								
	ERZE-8	8								
	ERZE-12-1/2	12-1/2	45-5	ZGA ZCP180	60 pul., 1,5 m	5/8	1-1/8	1 lb, 454 g	1-1/2 lbs, 680 g	
	ERZE-15	15								

Q ODF Soldar indica conexión hembra de diámetro correcto en la válvula para admitir un tubo de cobre del tamaño OD correspondiente. De modo que un ODF 1/2" recibe un tubo OD de 1/2".

TIPO ER

 Para refrigerantes 22, 410A
 Conectores ODF Solder

TIPO ER CON ELEMENTO NÚMERO 43 Y 45



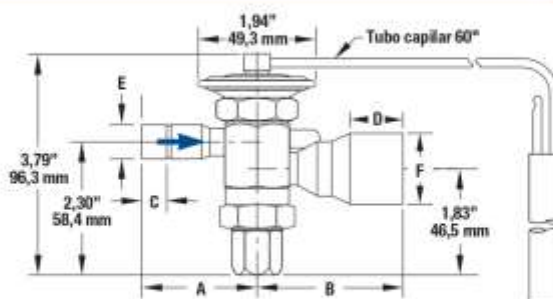
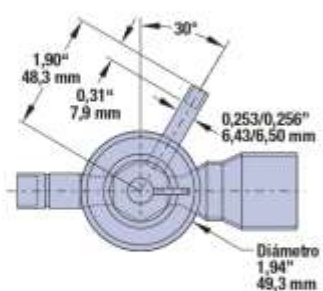
DIMENSIONES - CONEXIONES

REFRIGERANTE	CAPACIDAD NOMINAL	TAMAÑO DE CONEXIÓN		A	B	C	D	E	F
		ENTRADA	SALIDA						
22 410A	1-1/2	3/8"	1/2"	2,42"	2,51"	0,31"	0,40"	0,377/0,381"	0,502/0,506"
	2			61,5 mm	63,8 mm	7,9 mm	10,2 mm	9,5/9,68 mm	12,8/12,9 mm
	3			2,35"	2,51"	0,40"	0,50"	0,502/0,506"	12,8/12,9 mm
	4			59,7 mm	63,8 mm	10,2 mm	12,7 mm		
	5			2,41"	2,41"	0,78"	0,827/0,832"		
	6	61,2 mm	61,2 mm	19,8 mm	22,3/22,4 mm	0,877/0,882"	22,3/22,4 mm		
	7	2,35"	2,41"	0,50"	0,78"	0,877/0,882"	22,3/22,4 mm		
	8	59,7 mm	61,2 mm	12,7 mm	19,8 mm				
	8	5/8"	7/8"	2,35"	2,41"	0,50"	0,78"	0,877/0,882"	22,3/22,4 mm
	8	1-1/8"	1-1/8"	2,35"	2,41"	0,50"	0,78"	0,877/0,882"	22,3/22,4 mm
	8	1-1/8"	1-1/8"	2,35"	2,41"	0,50"	0,78"	0,877/0,882"	22,3/22,4 mm
	8	1-1/8"	1-1/8"	2,35"	2,41"	0,50"	0,78"	0,877/0,882"	22,3/22,4 mm

TAMAÑOS DE BULBO

CARGAS ESTÁNDAR	REFRIGERANTE	
	22	410A
VCP180, ZCP180	0,50" OD x 3,00"	12,7 mm x 76,2 mm
GA	0,75" OD x 2,00"	19,1 mm x 50,8 mm

TIPO ER CON ELEMENTO NÚMERO 45-5



DIMENSIONES - CONEXIONES

REFRIGERANTE	CAPACIDAD NOMINAL	TAMAÑO DE CONEXIÓN		A	B	C	D	E	F
		ENTRADA	SALIDA						
22	10 12	5/8"	7/8"	2,48"	2,51"	0,50"	0,78"	0,627/0,632"	0,877/0,882"
410A	12-1/2 15			63,0 mm	63,8 mm	12,7 mm	19,8 mm		
410A	12-1/2 15	5/8"	1-1/8"	2,48"	2,51"	0,50"	0,78"	0,627/0,632"	0,877/0,882"
410A	12-1/2 15			63,0 mm	63,8 mm	12,7 mm	19,8 mm		
410A	12-1/2 15	5/8"	1-1/8"	2,48"	2,51"	0,50"	0,78"	0,627/0,632"	0,877/0,882"
410A	12-1/2 15			63,0 mm	63,8 mm	12,7 mm	19,8 mm		

MATERIALES Y DETALLES DE CONSTRUCCIÓN

VÁLVULA TIPO	CUERPO	ASIENTO	ESPIGA	ESPIGA DE SOPORTE	VÁSTAGO(S)	TIPO DE JUNTAS	CONEXIONES	FILTRO DE ENTRADA
RC	Barra de latón maquinada	Puerto de latón maquinado en el cuerpo	Acero inoxidable	–	Acero inoxidable	Filo de navaja a metal	Chatterf, SAE Flare, Conexiones ODF de cobre Soldadas con plata al cuerpo	Sin filtro
ER	Barra de latón maquinada	Puerto de latón maquinado en el cuerpo	Acero inoxidable	–	Acero inoxidable	Filo de navaja a metal	Conexiones ODF de cobre Soldadas con plata al cuerpo	Sin filtro
F	Barra de latón maquinada	Latón	Acero inoxidable	Latón	Acero inoxidable	Filo de navaja a metal	Conexiones SAE Flare Soldadas con plata al cuerpo	Filtro tamiz desmontable
EF	Barra de latón maquinada	Latón	Acero inoxidable	Latón	Acero inoxidable	Filo de navaja a metal	Conexiones ODF de cobre Soldadas con plata al cuerpo	Filtro de inserción
Q/ BQ	Barra de latón maquinada	Latón	Acero inoxidable	Latón	Acero inoxidable	Filo de navaja a metal	Conexiones SAE Flare Soldadas con plata al cuerpo	Filtro tamiz desmontable
SQ/SBQ	Barra de latón maquinada	Latón	Acero inoxidable	Latón	Acero inoxidable	Filo de navaja a metal	Conexiones ODF de cobre Soldadas con plata al cuerpo	Filtro de inserción
EQ/EBQ	Barra de latón maquinada	Latón	Acero inoxidable	Latón	Acero inoxidable	Filo de navaja a metal	Conexiones de cobre extendidas Soldadas con plata al cuerpo	Filtro de inserción
G	Latón Forjado	Latón	Acero inoxidable	Latón	Ecualizado externo: Acero inoxidable triangular	Filo de navaja a metal	SAE Flare, Parte integral del cuerpo de latón forjado	Filtro tamiz desmontable
EG	Latón Forjado	Latón	Acero inoxidable	Latón		Ecualizado externo: Acero inoxidable redondo	Filo de navaja a metal	
S	Barra de latón maquinada	Latón	Acero inoxidable	Latón	Acero inoxidable redondo	Filo de navaja a metal	Conexiones ODF de cobre Soldadas con plata al cuerpo	Disco de tamizado de malla gruesa
BF	Barra de latón maquinada	Latón	Acero inoxidable	–	Acero inoxidable	Filo de navaja a metal	Conexiones SAE Flare Soldadas con plata al cuerpo	Pantalla Filtro desmontable
SBF	Barra de latón maquinada	Latón	Acero inoxidable	–	Acero inoxidable	Filo de navaja a metal	Conexiones ODF de cobre Soldadas con plata al cuerpo	
EBF	Barra de latón maquinada	Latón	Acero inoxidable	–	Acero inoxidable	Filo de navaja a metal	Conexiones de cobre extendidas Soldadas con plata al cuerpo	Filtro de inserción
EBS	Barra de latón maquinada	Puerto de latón maquinado en el cuerpo	Acero inoxidable	–	Acero inoxidable	Filo de navaja a metal	Conexiones ODF de cobre Soldadas con plata al cuerpo	Disco de tamizado de malla gruesa
PEQUEÑO O	Barra de latón maquinada	Puerto de latón maquinado en el cuerpo	Pistón de latón con superficie de asiento sintética	–	Acero inoxidable	Filo de navaja a metal	Conexiones ODF de cobre Soldadas con plata al cuerpo	Disco de tamizado de malla gruesa
GRANDE O	Barra de latón maquinada	Puerto de latón maquinado en el cuerpo		–	Acero inoxidable	Filo de navaja en el elemento y junta en la tapa de sellado de fondo	Conexiones ODF de cobre Soldadas con plata al cuerpo	Disco de tamizado de malla gruesa
H	Barra de latón maquinada	Acero inoxidable o latón	Acero inoxidable	Latón	Acero inoxidable		Brida soldada, Brida en tubo	Disco de tamizado de malla gruesa
M	Bronce fundido	Acero inoxidable o latón	Acero inoxidable	Latón	Acero inoxidable	Junta	Brida soldada, Brida en tubo	Disco de tamizado de malla gruesa
V	Bronce fundido	Puerto dual, Asientos maquinados en el cuerpo de la válvula	Pistón de bronce con superficie de asiento sintética	–	Acero inoxidable	Junta	Brida soldada, Brida en tubo	Disco de tamizado de malla gruesa
W	Bronce fundido			–	Acero inoxidable	Junta	Brida soldada, Brida en tubo	Disco de tamizado de malla gruesa

NOTA: Los materiales y las construcciones listados en esta página pueden cambiar sin aviso previo. Para la especificación al día de los materiales y demás detalles de construcción contactar con la División Superior de Póliver.

8.2.4 FICHA TÉCNICA DE LA VÁLVULA DE CUATRO VÍAS



The 4-way valves are used in reversible applications such as heat pumps or reversible air conditioning units and chillers.

The 4-way valve allows an inversion of the refrigeration cycle, changing from cooling mode in summer to heating mode in winter.

Features

- Wide application range
 - complete capacity range
 - available for all common refrigerants (including flammable refrigerants)
 - many different connection diameters and configurations
- High reliability
 - unique design
 - instantaneous changeover at minimum pressure differential
 - mechanism to prevent incomplete changeover
 - Minimized leakage
- CE approved

4-Way Reversing valves, Type STF and STF-H

Product specification
Technical data

Table 1: Technical data

Parameter	STF and STF-H
Compatibility refrigerants	R22, R134a, R407A, R4070, R404A, R410A, R448A, R449A, R32, R290, R454C, R454B, R452B (see safety note below)
Min. OPD	3 bar
Max. OPD	31 bar
Max. working pressure (PS/MWP)	45 bar Note! 49 bar for selected models. Please check Table 2: Ordering table for further information.
Refrigerant temperature range	-30 to 130 °C Note! 160 °C for selected models. Please check Table 2: Ordering table for further information.
Ambient temperature	-30 to 55 °C

NOTE:

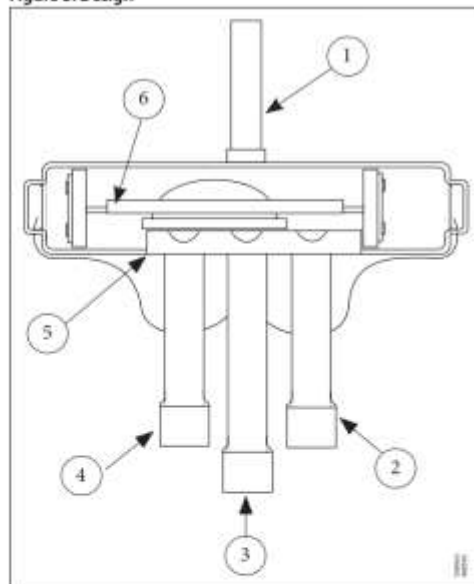
Special safety note for flammable refrigerants!

For countries where safety standards are not an indispensable part of the safety system Danfoss recommends the installer gets a third party approval of any system containing flammable refrigerant

Please refer to separate drawings of the STF and STF-H valves with special disclaimer regarding usage of flammable refrigerants. Please refer to separate document "Important Notice for usage of STF and STF-H valves with flammable refrigerants (No. S-FD001-1).

Design

Figure 3: Design



- | | |
|---|-------------------------------------|
| 1 | Discharge connection |
| 2 | Connection to evaporator/ condenser |
| 3 | Suction connection |
| 4 | Connection to condensor/ evaporator |
| 5 | Valve body |
| 6 | Slider |

The valve is composed of three basic components:

- Pilot valve
- Main valve body, including valve slider
- Solenoid coil



4-Way Reversing valves, Type STF and STF-H

Ordering

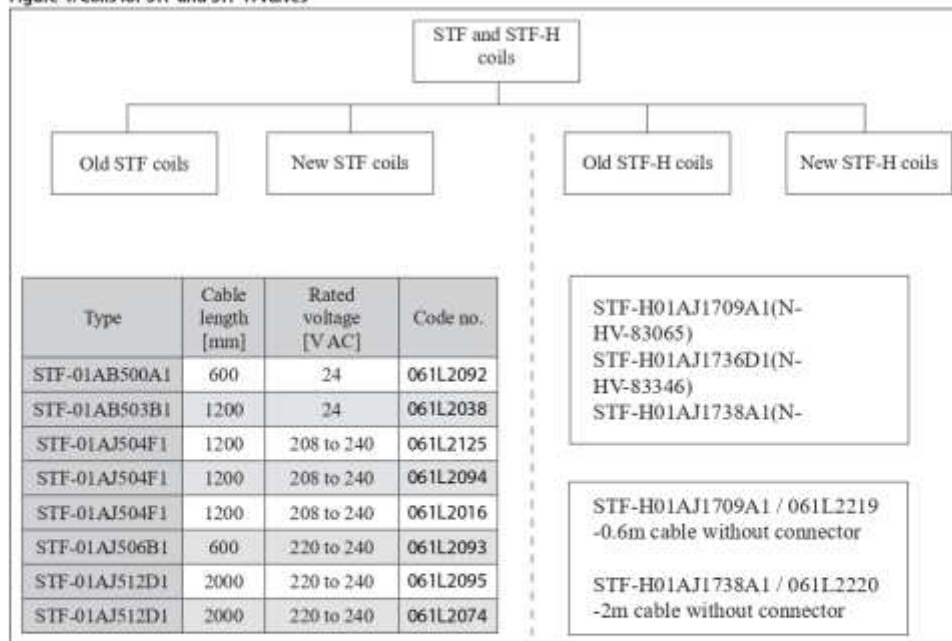
Table 2: Ordering

	Model	Packing for- mat	Danfoss code	Capacity [kW]	Style	Discharge	Suction	Media tem- perature	MWP
				R290/R410A		[m]	[m]	[°C]	[bar]
	STF-H0167	45	061L1348	4.8	A	5/16	3/8	130	45
	STF-H0267	32	061L1349	9.5	A	3/8	1/2	130	45
	STF-H0321	32	061L1350	9.5	E	1/2	5/8	130	45
	STF-H0351	32	061L1351	13.7	B	1/2	5/8	130	45
	STF-H0429	24	061L1352	18.2	F	1/2	3/4	130	45
	STF-H0651	24	061L1353	25.1	B	1/2	3/4	130	45
	STF-H0731	6	061L1354	31.2	F	3/4	7/8	130	45
	STF-H0951	6	061L1355	38.12	B	3/4	7/8	160	49
	STF-H0954	6	061L1356	38.12	F	7/8	1 1/8	160	49
	STF-2028G	1	061L1357	41.8	F	1 1/8	1 3/8	160	49
	STF-2525G	1	061L1358	63.2	G	1 1/8	1 3/8	160	49
	STF-3017G	1	061L1362	89.4	G	1 1/8	1 5/8	160	49
	STF-4017G	1	061L1359	125.5	G	1 5/8	1 5/8	160	49
	STF-5017G	1	061L1360	161.3	G	1 5/8	2 1/2	160	49
STF-6009G	1	061L1361	265.8	G	1 5/8	2 3/8	160	49	

^{m)} Capacity is indicated for 0.1 bar suction pressure drop and condition 54.5 CCT, 7.2 CET and SK 5H

Coils for STF and STF-H valves

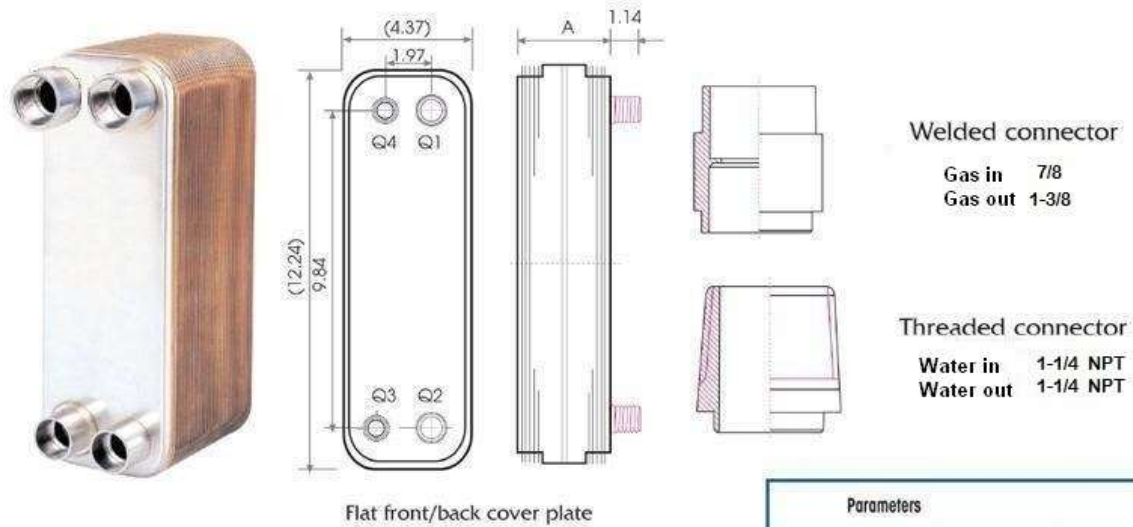
Figure 4: Coils for STF and STF-H valves



STF and STF-H coils - Model split:

8.2.5 FICHA TÉCNICA DEL INTERCAMBIADOR DE PLACAS PLANAS

::: INTERCAMBIADOR DE CALOR PLACAS R22, R410, R134, R404, R407, R507,
 3 TONELADAS, 1 CIRCUITO, MARCA "FC" (Aplicación Agua-Refrigerante). 0155-15516869



Welded connector

Gas in 7/8
 Gas out 1-3/8

Threaded connector

Water in 1-1/4 NPT
 Water out 1-1/4 NPT

This unit can be manufactured
 with copper or nickel brazing,
 plate material available is
 SS304, SS316L or SM0254.

Quantity of plates	A (in)	Weight (lb)	Side volume (USGal)	Q1Q2/Q3Q4	Heat exchanger area(ft ²)
n	0.35+0.095n	2.6+0.28n	0.0132(1/2)n/0.0132(1/2)(n-2)		(n-2)0.28

Parameters	
Design pressure	435psi (A)
Testing pressure	652psi (A)
Design Temperature	-319 to 392F
Heat load (KBtu/h)	~13.65-85.30
Quantity of max plates	150

NOTE: ALL DIMENSIONS IN INCHES

8.2.6 FICHA TÉCNICA DEL INTERCAMBIADOR DE TUBOS Y ALETAS

Al mandarse a fabricar directamente con el proveedor *Radiadores Espinosa*, se considera como ficha técnica de este equipo, el plano de construcción que se envió al fabricante y que se presenta con mayor tamaño en el apartado **8.1.5 PLANOS DEL EVAPORADOR**.

8.2.7 FICHA TÉCNICA DEL VENTILADOR



CEB-T

5CEB-2000-CEB-2000-(127+1)



Gama CEB-T de extractores centrifugos de simple oído de aspiración, con rodete de alabes curvos adelantados y motor directamente acoplado. De construcción ligera, apropiada a cada tamaño y una óptima relación entre consumo y prestaciones. Destaca por su versatilidad al disponer de siete modelos, con cuatro alternativas en la posición de descarga (CW 0°, CW 90°, CW 180°, CW 270°).

Características Principales:

Carcasa en acero electrosoldado.

Acabado en pintura en polvo poliéster horneada de gran resistencia a la corrosión.

Boca de descarga en cuatro posiciones con brida opcional.

Motores monofásicos y trifásicos.

Punto requerido

Caudal	-
Presión Estática	0.000 Pa
Temperatura	20 °C
Altitud	0 m
Densidad	1.2 kg / m ³
Frecuencia	60 Hz

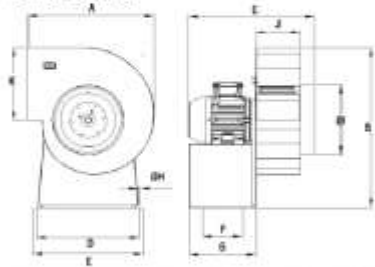
Construcción

Diametro impulsión	147 mm
Peso	11,00 kg

Características del motor

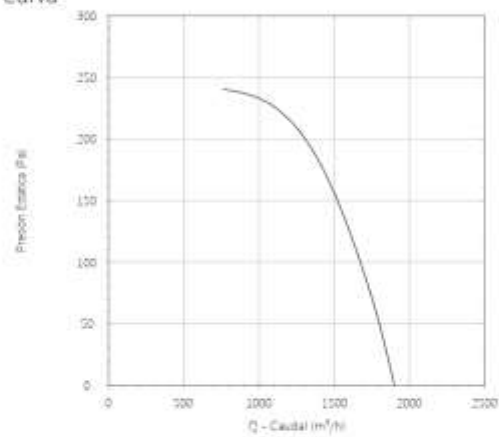
Índice de protección	IP21
Clase motor	B

Dimensiones



A	B	C	D	E	F	G	H	I
81.5	49	89	23.7	287	111	388	11.5	285
J	K							
125	187							

Curva



Características acústicas

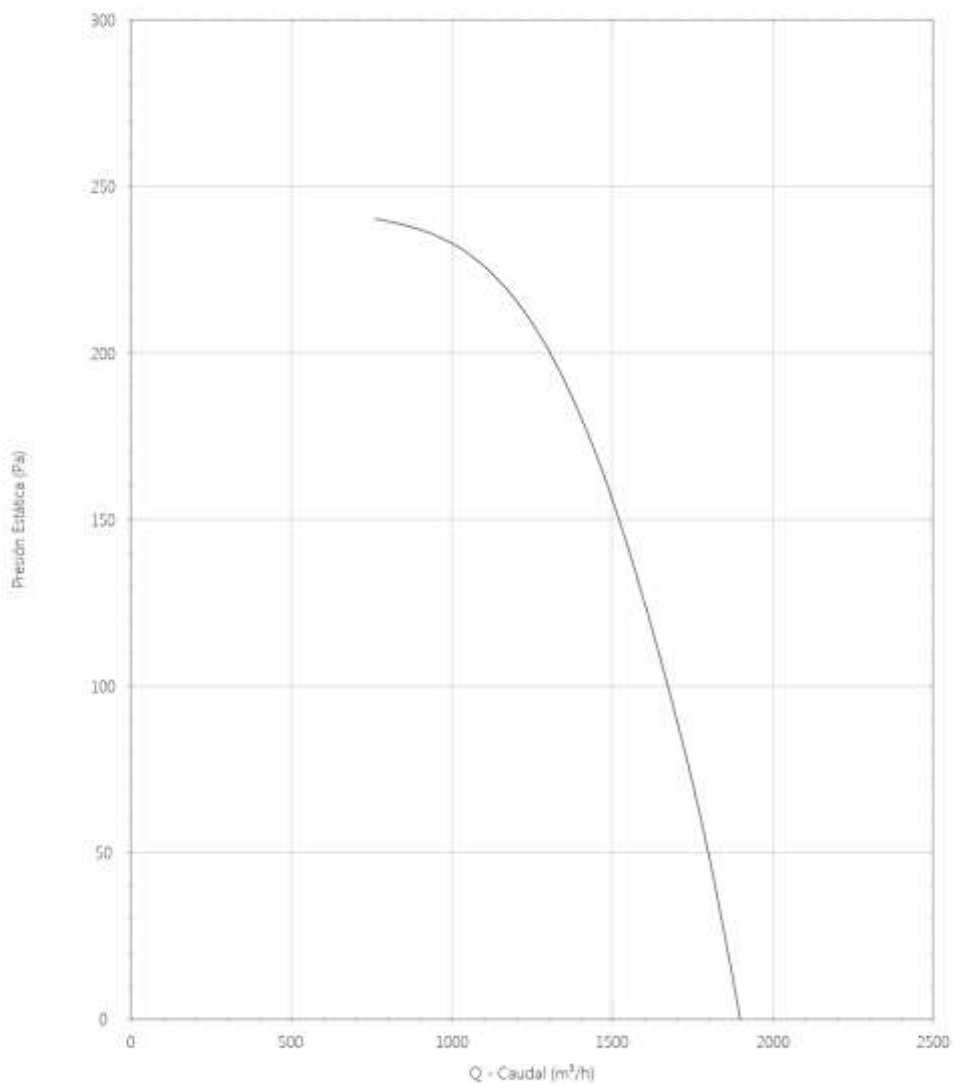
	63	125	250	500	1k	2k	4k	8k	Total
Descarga (0 m/s)	68	66	58	51	31	48	41	36	71
Descarga (0 m/s @ 1m)	57	57	47	40	40	35	30	25	60



CEB-T

5CEB-2000-CEB-2000-(127-1)

Curva

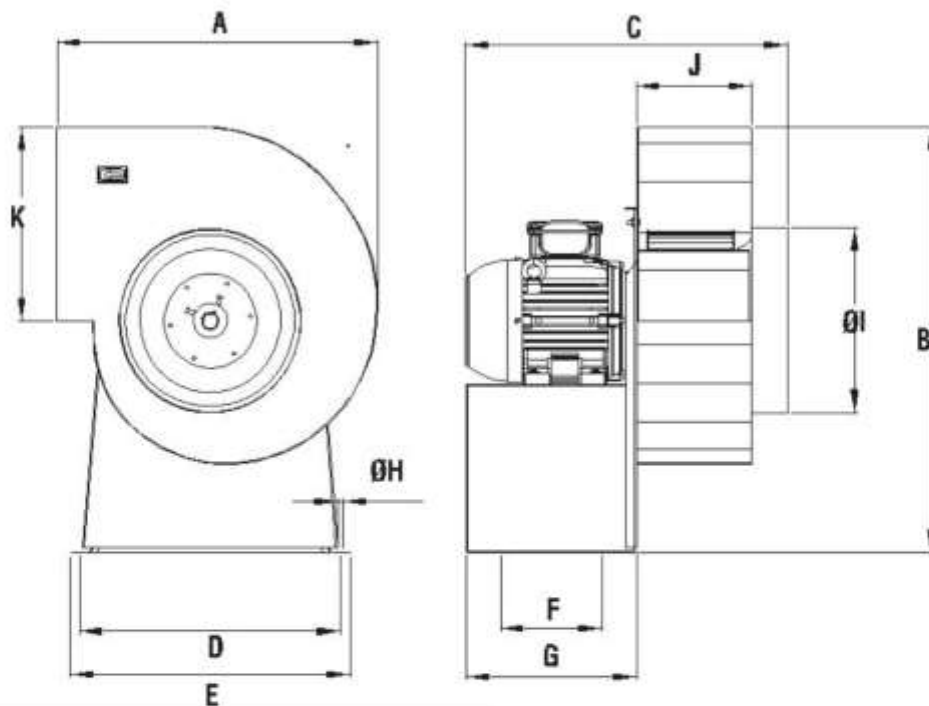




CEB-T

5CEB-2000-CEB-2000-(127-1)

Dimensiones



A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
310	480	990	257	287	311	188	11.5	180	125	168

8.2.8 FICHA TÉCNICA DEL FILTRO

 **SPORLAN**

SPORLAN

January 2011 / BULLETIN 40-10

Catch-All®

Liquid & Suction Line Filter-Driers



 **Parker**

ENGINEERING YOUR SUCCESS.

Catch-All Liquid Line

Quick Selection Recommendations

SYSTEM SIZE		FIELD REPLACEMENT			
TONS	LINE SIZE Inches OD	AIR CONDITIONING		REFRIGERATION	
		R-12 & R-134a	R-22, R-407C & R-410A*	R-12, R-134a, R-404A, R-502 & R-507	R-22
SEALED TYPES - SPECIFY FLARE OR SOLDER					
1/4 - 1/8	CAP TUBE	C-032-CAP	C-032-CAP	C-032-CAP	C-032-CAP
	1/4	C-032(S)	C-032(S)	C-032(S)	C-032(S)
1/2 - 1	1/4	C-052(S)	C-052(S)	C-052(S)	C-052(S)
	5/16	C-0525-S	C-0525-S	C-0525(S)	C-0525-S
	3/8	C-053(S)	C-053(S)	C-053(S)	C-053(S)
1-1/2 - 2-1/2	5/16	C-0825-S	C-0825-S	C-1625-S	C-1625-S
	3/8	C-083(S)	C-083(S)	C-163(S)	C-163(S)
	1/2	C-084(S)	C-084(S)	C-164(S)	C-164(S)
3 - 6	5/16	C-1625-S	C-1625-S	—	—
	3/8	C-163(S)	C-163(S)	C-303(S)	C-303(S)
	1/2	C-164(S)	C-164(S)	C-304(S)	C-304(S)
	5/8	C-165(S)	C-165(S)	C-305(S)	C-305(S)
7 - 9	1/2	C-304(S)	C-304(S)	C-414(S)	C-414(S)
	5/8	C-305(S)	C-305(S)	C-415(S)	C-415(S)
	7/8	C-307-S	C-307-S	C-417-S	C-417-S
10 - 12	1/2	—	C-414(S)	C-414(S)	C-414(S)
	5/8	C-415(S)	C-415(S)	C-415(S)	C-415(S)
	7/8	C-417-S	C-417-S	C-417-S	C-417-S
13 - 18	1-1/8	C-419S	C-419S	C-419-S	C-419-S
	5/8	—	C-415(S)	—	C-415(S)
	7/8	C-607-S	C-607-S	C-607-S	C-607-S
1-1/8	C-609-S	C-609-S	C-609-S	C-609-S	
REVERSIBLE HEAT PUMP FILTER-DRIER					
1-5	3/8	—	HPC-103-S / HPC-163-S-HH	—	—
	1/2	—	HPC-104-S / HPC-164-S-HH	—	—
	5/8	—	HPC-105-S-HH	—	—
4-12	3/8	—	HPC-303-S-HH / HPC-304-S-HH	—	—
	1/2	—	HPC-305-S-HH / HPC-307-S-HH	—	—
	5/8	—	—	—	—
7/8	—	—	—	—	
REPLACEABLE CORE TYPES					
4 - 9	5/8	C-485-G	C-485-G	C-485-G	C-485-G
	7/8	C-487-G	C-487-G	C-487-G	C-487-G
10 - 15	5/8	—	C-485-G	—	C-485-G
	7/8	C-487-G	C-487-G	C-487-G	C-487-G
	1-1/8	C-489-G	C-489-G	C-489-G	C-489-G
16 - 29	7/8	C-967-G	C-967-G	C-967-G	C-967-G
	1-1/8	C-969-G	C-969-G	C-969-G	C-969-G
	1-3/8	C-9611-G	C-9611-G	C-9611-G	C-9611-G
30 - 39	7/8	—	C-967-G	—	C-967-G
	1-1/8	C-1449-G	C-969-G	C-1449-G	C-969-G
	1-3/8	C-14411-G	C-9611-G	C-14411-G	C-9611-G
40 - 59	1-1/8	C-1449-G	C-1449-G	—	C-1449-G
	1-3/8	C-19211-G	C-14411-G	C-19211-G	C-14411-G
	1-5/8	C-19213-G	C-14413-G	C-19213-G	C-14413-G
60 - 75	1-1/8	—	C-1449-G	—	—
	1-3/8	C-19211-G	C-19211-G	C-19211-G	C-19211-G
	1-5/8	C-19213-G	C-19213-G	C-19213-G	C-19213-G
76 - 99	1-3/8	—	C-19211-G	—	C-19211-G
	1-5/8	C-30013-G	C-19213-G	C-30013-G	C-19213-G
	2-1/8	C-40017-G	C-19217-G	C-40017-G	C-19217-G
100 - 130	1-5/8	—	C-30013-G	—	C-30013-G
	2-1/8	C-40017-G	C-40017-G	C-40017-G	C-40017-G
131 - 150	2-1/8	(2) C-30017-G	C-40017-G	(2) C-30017-G	C-40017-G

CATCH-ALL SIZE	NO. OF CORES	CORE TYPE
C-8420 Series Shell	1	RCW-42
C-880 Series Shell	1	—
C-960 Series Shell	2	RCW-48, RC-4864, or RC-4864-HH
C-14400 Series Shell	3	—
C-19200 Series Shell	4	—
C-30000 Series Shell	3	RCW-100, RC-10098, or RC-10098-HH
C-40000 Series Shell	4	—

*C-30000 and C-40000 Series shells are not approved for R-410A.




**Liquid Line
Ratings and Selection Recommendations**

Sealed Type – Refrigerant 410A


410A

TYPE	SURFACE FILTERING AREA		RATINGS AT AHRI STANDARD CONDITIONS				SELECTION RECOMMENDATIONS (Tons)		
			WATER CAPACITY DROPS AT 50 PPM		REFRIGERANT FLOW CAPACITY		REFRIGERATION Commercial & Low Temperature Equipment	AIR CONDITIONING	
	Sq. Inch	cm ²	75°F 25°C	125°F 50°C	Tons at 1 psi ΔP	AW at 0.07 bar ΔP		O.E.M. Self Contained	Field Replacement or Field Built-Up Systems
C-032	9	58	27	20	1.4	4.9	1/4	1	1/2
C-032-CAP									
C-032-S									
C-032-F									
C-032-FM	15	97	63	48	2.0	7.0	1/3	1 thru 3	3/4 thru 2
C-033									
C-033-S									
C-033-S									
C-052	21	135	104	78	2.0	7.0	1/2 thru 1-1/2	1 thru 5	1 thru 2
C-052-S									
C-052-F									
C-052-FM									
C-052S-S	33	213	158	119	5.0	17.6	1-1/2 thru 3	2 thru 10	1-1/2 thru 5
C-053									
C-053-S									
C-053-S									
C-082	53	342	302	227	10.7	37.6	3 thru 5	5 thru 20	4 thru 10
C-082-S									
C-082S-S									
C-083									
C-083-S	67	432	407	306	17.1	60.0	5 thru 12	7-1/2 thru 23	7-1/2 thru 15
C-084									
C-084-S									
C-084-S									
C-162	106	684	604	454	28.4	99.7	15	25 thru 30	20
C-162-S									
C-162S-S									
C-163									
C-163-S	106	684	604	454	32.4	113.7	15	25 thru 30	20
C-164									
C-164-S									
C-165									
C-165-S	106	684	604	454	32.4	113.7	15	25 thru 30	20
C-165-S									
C-303									
C-303-S									
C-304	106	684	604	454	32.4	113.7	15	25 thru 30	20
C-304-S									
C-305									
C-305-S									
C-307-S	106	684	604	454	32.4	113.7	15	25 thru 30	20
C-414									
C-414-S									
C-415									
C-415-S	106	684	604	454	32.4	113.7	15	25 thru 30	20
C-417-S									
C-419-S									
C-607-S									
C-609-S	106	684	604	454	32.4	113.7	15	25 thru 30	20
C-607-S									
C-609-S									
C-609-S									

 For suction line
filter-driers
see page 30

NOTE: The variation in flow ratings of filter-driers having the same size core and shell is caused by the difference in connection sizes used.

For replaceable core Catch-Alls see page 21