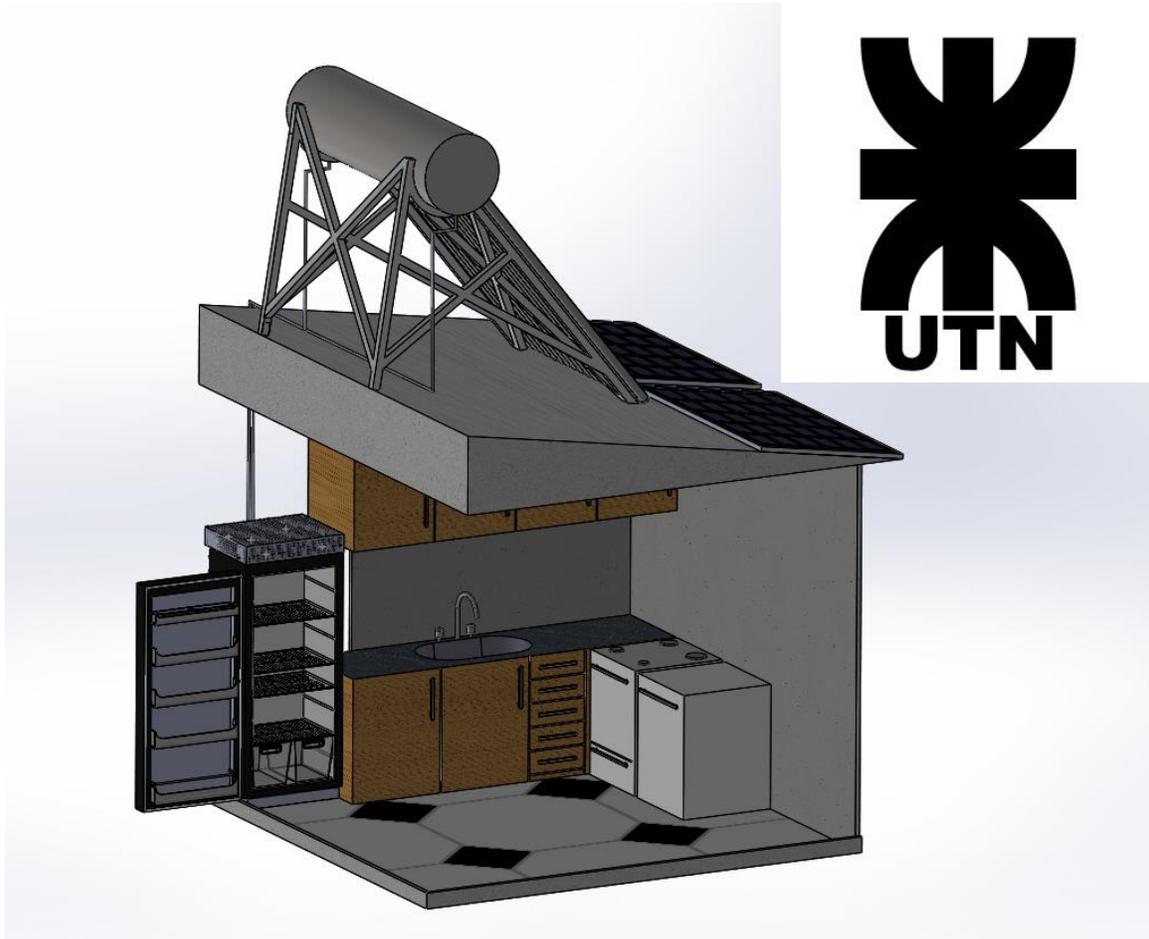


# Sistema de refrigeración solar por adsorción aplicado a heladeras domésticas



Autor: Gerardo Daniel Szwarc

Tutor: Ing. Mariana del Valle Bernard

Octubre 2019

U.T.N. Facultad Regional San Francisco – Avenida de la Universidad 501 –  
San Francisco - Córdoba – Argentina

Ingeniería Electromecánica

Proyecto final



## Agradecimientos

Las personas que han contribuido a este logro personal son muchas, y cada una ha aportado su “grano de arena”, ya sea dándome ánimos cuando más lo necesitaba, explicándome algún tema, abriéndome las puertas a nuevos conocimientos, impulsándome a más, etc. A todas estas personas les doy las gracias, gracias por estar, por no fallar y por la gran ayuda que han aportado, quizás para algunos parezca poco, pero si no lo hubieran hecho no habría llegado hasta aquí. Dentro de ellas se encuentran:

Dios, porque sin su ayuda no habría logrado esto, la cantidad de eventos y situaciones que sucedieron durante mis estudios; las personas con las que me encontré; la forma en la que cuando todo parecía que no tenía solución, de repente se abría una puerta, y era la salida que necesitaba. Todas estas cosas, no pueden ser producto de la casualidad, son obra de Jehová.

Mi familia, quienes me ayudaron durante toda la carrera, me alentaron a seguir y no dejar, se aguantaron mis enojos, rabias, alegrías y decepciones, me vieron progresar y llegar hasta este punto.

Diego Ferreyra, quien me abrió las puertas del grupo de I + D GISEner, donde pude aprender a realizar investigaciones, redactar informes técnicos, adquirí conocimientos sobre tantas áreas que enumerarlas sería demasiado largo, me acompañó durante mi desarrollo y avance en la carrera, ayudándome a entender algunos de los temas de diferentes asignaturas, escuchándome, quien me introdujo a la investigación y docencia.

A Mariana Bernard, tutora de este proyecto final, quien a pesar de tener un año muy cargado de actividades, con miles de excusas para decir: “No, no puedo ser tu tutora de proyecto final”, decidió decir: “Sí” y ayudarme a desarrollar este proyecto.

A Franco y Gabriela Piro, los dueños de la empresa donde trabajé a lo largo de todos mis estudios, quienes me dieron el trabajo, brindándome una flexibilidad laboral que, creo yo, ninguna otra empresa lo habría hecho.

A todos mis amigos, quienes constantemente me estuvieron dando ánimo para seguir adelante.

A mis compañeros de curso y cualquiera que esté en carrera les digo: “No se rindan, si yo pude llegar hasta aquí, ustedes también pueden, no se olviden que paciencia y perseverancia mata bocho”.

*“Nada hay bajo el sol que no tenga solución, nunca una noche venció a un amanecer.”*

Warcry – Tu mismo.

## Tabla de contenidos

AGRADECIMIENTOS .....	I
TABLA DE CONTENIDOS .....	III
LISTA DE TABLAS.....	V
TABLA DE FIGURAS .....	VI
RESUMEN.....	IX
PRÓLOGO .....	X
CAPÍTULO 1.....	1
1. INTRODUCCIÓN .....	2
1.1 IMPACTO AMBIENTAL Y SOCIAL.....	2
1.2 IMPACTO ECONÓMICO.....	7
1.3 CONSERVACIÓN DE ALIMENTOS.....	10
CAPÍTULO 2.....	17
2. DESARROLLO .....	18
2.1. CONCEPTOS GENERALES .....	18
2.2. INTRODUCCIÓN A LA REFRIGERACIÓN.....	22
2.3. DESCRIPCIÓN DE LOS SISTEMAS DE REFRIGERACIÓN USUALES .....	27
2.3.a. Sistema de refrigeración por absorción.....	27
2.3.b. Sistema de refrigeración por compresión .....	29
2.3.c. Sistema de refrigeración por adsorción .....	32
2.4    DESCRIPCIÓN DE LOS DIFERENTES COMPONENTES DE UNA HELADERA.....	43
2.4.a. Par de trabajo.....	44
2.4.b. Aislación .....	51
Aislantes naturales.....	54
Aislantes minerales.....	56
Aislantes sintéticos .....	60
2.4.c. Intercambiadores de calor .....	64
Intercambiadores de tubos .....	65
Intercambiadores de placas.....	69
2.4.d. Adsorción.....	72
2.4.e. Sistema de captación de energía solar térmica.....	77
2.5. SELECCIÓN Y CÁLCULO DE LOS DIFERENTES COMPONENTES DEL SISTEMA PARA REFRIGERACIÓN .....	80
2.5.a. Selección del par de trabajo .....	82
2.5.b. Capacidad del equipo .....	86
2.5.c. Carga de enfriamiento .....	89
2.5.d. Dimensiones internas y aislación .....	102
2.5.e. Intercambiador de calor .....	109
2.5.f. Adsorbedor .....	115
2.5.g. Condensador.....	124

---

2.5.h. Depósito de líquidos .....	126
<b>2.6. SELECCIÓN Y CÁLCULO DE LOS DIFERENTES COMPONENTES DEL SISTEMA PARA EL SUMINISTRO DE CALOR REQUERIDO POR LA DESORCIÓN .....</b>	<b>128</b>
2.6.a. Termotanque solar.....	128
2.6.b. Suministro de energía para las resistencias .....	134
2.6.c. Control de temperatura.....	142
2.6.d. Electroválvulas .....	144
<b>CAPÍTULO 3.....</b>	<b>148</b>
<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>149</b>
<b>REFERENCIAS DE TEXTO .....</b>	<b>152</b>
<b>REFERENCIAS DE FIGURAS .....</b>	<b>157</b>
<b>APÉNDICE N° 1: ENCUESTAS.....</b>	<b>160</b>
<b>APÉNDICE N° 2: ESTADO DE LA TÉCNICA .....</b>	<b>163</b>
<b>APÉNDICE N° 3: HOJA DE DATOS.....</b>	<b>165</b>
<b>APÉNDICE N° 4: REPRESENTACIONES DEL DISEÑO .....</b>	<b>169</b>

## Lista de Tablas

<b>Tabla 1:</b> <i>Calores latentes de fusión y evaporación de algunas sustancias</i> .....	<b>21</b>
<b>Tabla 2:</b> <i>Datos para el cálculo de la carga de enfriamiento</i> .....	<b>93</b>
<b>Tabla 3:</b> <i>Resumen de las propiedades de los aislantes</i> .....	<b>107</b>
<b>Tabla 4:</b> <i>Espectro de radiación</i> .....	<b>134</b>
<b>Tabla 5:</b> <i>Encuestas de 1 a 3</i> .....	<b>160</b>
<b>Tabla 6:</b> <i>Encuestas de 4 a 6</i> .....	<b>161</b>
<b>Tabla 7:</b> <i>Encuestas de 7 a 9</i> .....	<b>161</b>
<b>Tabla 8:</b> <i>Temperatura de conservación, calor específico y emitido por diferentes alimentos y bebidas</i>	<b>162</b>

## Lista de figuras

<b>Figura 1:</b> Energía suministrada al sistema interconectado nacional en el mes de enero de 2019 .....	<b>4</b>
<b>Figura 2:</b> <i>Consumos eléctricos aproximados de un hogar (FUNDELEC, 2011)</i> .....	<b>8</b>
<b>Figura 3a:</b> <i>Carne seca</i> .....	<b>10</b>
<b>Figura 3b:</b> <i>Carne ahumada</i> .....	<b>10</b>
<b>Figura 3c:</b> <i>Carne envasada</i> .....	<b>10</b>
<b>Figura 4a:</b> <i>Bacterias</i> .....	<b>13</b>
<b>Figura 4b:</b> <i>Levaduras</i> .....	<b>13</b>
<b>Figura 4c:</b> <i>Moho</i> .....	<b>13</b>
<b>Figura 5:</b> <i>Formas de transmisión de calor</i> .....	<b>20</b>
<b>Figura 6:</b> <i>Ciclo de Carnot para gas ideal</i> .....	<b>24</b>
<b>Figura 7a:</b> <i>Ciclo de Carnot - Máquina térmica</i> .....	<b>25</b>
<b>Figura 7b:</b> <i>Ciclo de Carnot - Máquina frigorífica</i> .....	<b>25</b>
<b>Figura 8:</b> <i>Ciclo de Carnot para vapor de agua</i> .....	<b>25</b>
<b>Figura 9:</b> <i>Publicidad de heladera a kerosene SIAM</i> .....	<b>27</b>
<b>Figura 10:</b> <i>Heladera a compresión</i> .....	<b>30</b>
<b>Figura 11:</b> <i>Esquema simplificado de un sistema de refrigeración por compresión</i> .....	<b>32</b>
<b>Figura 12:</b> <i>Esquema simplificado del sistema de refrigeración por adsorción</i> .....	<b>35</b>
<b>Figura 13:</b> <i>Ciclo termodinámico de adsorción</i> .....	<b>37</b>
<b>Figura 14:</b> <i>Esquema del circuito de refrigeración por adsorción planteado</i> .....	<b>42</b>
<b>Figura 15:</b> <i>Óxido de aluminio usado como adsorbente</i> .....	<b>46</b>
<b>Figura 16:</b> <i>Gel de sílice comercial</i> .....	<b>47</b>
<b>Figura 17:</b> <i>Mineral de Zeolita</i> .....	<b>48</b>
<b>Figura 18a:</b> <i>Poros del carbón activado</i> .....	<b>49</b>
<b>Figura 18b:</b> <i>Muestra de carbón activado</i> .....	<b>49</b>
<b>Figura 19:</b> <i>Aislante natural – Paja</i> .....	<b>55</b>
<b>Figura 20:</b> <i>Aislante natural – Madera</i> .....	<b>56</b>

<b>Figura 21:</b> <i>Aislante natural – Corcho.</i> .....	<b>57</b>
<b>Figura 22:</b> <i>Aislante mineral – Fibra de vidrio.</i> .....	<b>58</b>
<b>Figura 23:</b> <i>Aislante mineral – Lana de roca.</i> .....	<b>59</b>
<b>Figura 24:</b> <i>Aislante mineral – Arcilla expandida.</i> .....	<b>60</b>
<b>Figura 25:</b> <i>Aislante sintético – Espuma de PVC.</i> .....	<b>61</b>
<b>Figura 26:</b> <i>Aislante sintético – Poliestireno expandido.</i> .....	<b>62</b>
<b>Figura 27:</b> <i>Aislante sintético – Espuma de poliuretano</i> .....	<b>63</b>
<b>Figura 28:</b> <i>Aislante sintético – Perlita expandida.</i> .....	<b>63</b>
<b>Figura 29:</b> <i>Intercambiador de calor de tubos helicoidal.</i> .....	<b>66</b>
<b>Figura 30:</b> <i>Intercambiador de calor de tubos con aletas.</i> .....	<b>67</b>
<b>Figura 31:</b> <i>Intercambiador de calor de doble tubo, de paso 3.</i> .....	<b>68</b>
<b>Figura 32:</b> <i>Intercambiador de calor de casco y tubo.</i> .....	<b>69</b>
<b>Figura 33:</b> <i>Intercambiador de calor de placas con juntas de estanqueidad</i> .....	<b>71</b>
<b>Figura 34:</b> <i>Isoterma de adsorción.</i> .....	<b>75</b>
<b>Figura 35:</b> <i>Colector solar de placa plana con cubierta.</i> .....	<b>78</b>
<b>Figura 36:</b> <i>Colector de placa plana sin cubierta</i> .....	<b>79</b>
<b>Figura 37:</b> <i>Colector solar con tubos de vacío - extremo de los tubos de vacío, junto con las aletas de aluminio.</i> .....	<b>80</b>
<b>Figura 38:</b> <i>Termotanque solar.</i> .....	<b>81</b>
<b>Figura 39:</b> <i>Esquema del circuito de refrigeración por adsorción planteado (ídem a Fig. 14).</i> .....	<b>88</b>
<b>Figura 40:</b> <i>Gráfico psicrométrico del aire.</i> .....	<b>100</b>
<b>Figura 41a:</b> <i>Botella 2,5 L.</i> .....	<b>105</b>
<b>Figura 41b:</b> <i>Bandeja.</i> .....	<b>105</b>
<b>Figura 42:</b> <i>Presión de evaporación del etanol en función de la temperatura.</i> .....	<b>110</b>
<b>Figura 43a:</b> <i>Corte vertical del adsorbedor.</i> .....	<b>120</b>
<b>Figura 43b:</b> <i>Corte horizontal del adsorbedor</i> .....	<b>120</b>
<b>Figura 44:</b> <i>Condensador</i> .....	<b>126</b>

<b>Figura 45:</b> <i>Tipos de radiación solar que pueden incidir sobre un sistema de captación</i> .....	<b>135</b>
<b>Figura 46:</b> <i>Seis paneles solares fotovoltaicos</i> .....	<b>136</b>
<b>Figura 47:</b> <i>Esquema del circuito diseñado</i> .....	<b>146</b>
<b>Figura 48a:</b> <i>Interior del refrigerador</i> .....	<b>169</b>
<b>Figura 48b:</b> <i>Puerta del refrigerador</i> .....	<b>169</b>
<b>Figura 49a:</b> <i>Accesorio - Bandeja para estantes</i> .....	<b>170</b>
<b>Figura 49b:</b> <i>Accesorio - Cajones para verduras</i> .....	<b>170</b>
<b>Figura 50a:</b> <i>Intercambiador de placas</i> .....	<b>171</b>
<b>Figura 50b:</b> <i>Intercambiador de placas (zoom)</i> .....	<b>171</b>
<b>Figura 51a:</b> <i>Corte vertical del adsorbedor</i> .....	<b>172</b>
<b>Figura 51b:</b> <i>Corte horizontal del adsorbedor</i> .....	<b>172</b>
<b>Figura 51c:</b> <i>Detalle A</i> .....	<b>173</b>
<b>Figura 51d:</b> <i>Adsorbedor</i> .....	<b>173</b>
<b>Figura 51d:</b> <i>Plano del Adsorbedor</i> .....	<b>174</b>
<b>Figura 52:</b> <i>Cobertor para adsorbedores</i> .....	<b>175</b>
<b>Figura 53a:</b> <i>Condensador</i> .....	<b>175</b>
<b>Figura 53b:</b> <i>Plano del condensador</i> .....	<b>176</b>
<b>Figura 54:</b> <i>Depósito de líquidos</i> .....	<b>177</b>
<b>Figura 55:</b> <i>Termotanque solar</i> .....	<b>177</b>
<b>Figura 56:</b> <i>Panel solar fotovoltaico</i> .....	<b>178</b>
<b>Figura 57a:</b> <i>Vista en perspectiva del equipo instalado en la cocina de un hogar</i> .....	<b>179</b>
<b>Figura 57b:</b> <i>Vista en perspectiva posterior del equipo instalado en la cocina de un hogar</i> .....	<b>180</b>
<b>Figura 57c:</b> <i>Vista en perspectiva frontal del equipo instalado en la cocina de un hogar</i> .....	<b>181</b>

---

## Resumen

En el presente proyecto, se desarrolló una alternativa a los sistemas de refrigeración por compresión, que actualmente son utilizados de forma masiva, dicho sistema se basa en un ciclo de adsorción. Gracias a la utilización de energía solar térmica, como fuente de calor requerido para el ciclo, este proyecto permitiría el acceso a la conservación de alimentos y medicamentos, en los hogares que no poseen conexión al sistema eléctrico interconectado nacional. También, se aplicaron diversas modificaciones a los prototipos citados en la bibliografía de este trabajo, las mismas permiten mejorar considerablemente la aplicación del sistema.

El ciclo en cuestión, fue aplicado a refrigeradores domésticos para la conservación de alimentos a corto plazo, en los hogares. Se utilizó un sistema de doble adsorbedor, energía solar térmica captada por un termotanque solar y, almacenada en un fluido caloportador; energía solar fotovoltaica conectada a resistencias eléctricas, a modo de garantizar la continuidad de servicio y, permitir ubicar el refrigerador en el interior de los hogares. Como resultado, se obtuvo el desarrollo teórico de una heladera de 405 L de capacidad de almacenamiento, sin accesorios; una capacidad de extracción de calor de 1513,42 kJ·h; utilizando carbón activado/etanol como par de trabajo.

---

## Prólogo

En el presente proyecto, se desarrolla una alternativa a los sistemas de refrigeración por compresión, que actualmente son utilizados de forma masiva, dicho sistema se basa en un ciclo de adsorción. A nivel mundial, se realizan diferentes investigaciones acerca de este método de refrigeración, dado que permite el aprovechamiento del calor proveniente de diversas fuentes, tales como una caldera para calefacción del hogar, resistencias eléctricas o incluso, desde la energía solar.

En primera instancia, se expresan algunas generalidades acerca de los efectos climáticos y medioambientales que produce la utilización de los sistemas de refrigeración actuales, principalmente debido al uso de los refrigerantes clorofluorocarbonados (CFC). También se mencionan algunas de las medidas tomadas por organizaciones mundiales, tal como la Organización de las Naciones Unidas, y, a nivel nacional, para reducir la contaminación y el cambio climático. Por otro lado, también se muestra el consumo eléctrico que representa un electrodoméstico tan común como es la heladera. Como se verá a lo largo del trabajo, este sistema de refrigeración permitiría tener acceso a la conservación de los alimentos, en las regiones que aún no tienen acceso a la red eléctrica del Sistema Interconectado Nacional.

Se exponen las características más importantes a tener en cuenta acerca de la conservación de los alimentos, tal como los métodos de conservación, agentes más influyentes en el deterioramiento de los alimentos, y, los efectos que produce cada uno de ellos.

Se describen los sistemas de refrigeración y su evolución hasta la actualidad, expresando las principales diferencias entre ellos, y de forma implícita, sus ventajas y desventajas. A medida que se desarrolle el cálculo se irán describiendo los diferentes elementos y componentes del sistema, expresando las características que cada uno debe tener y los motivos de la selección de los mismos. La elección de los componentes más críticos se

---

basa en el cuidado del medio ambiente y el cumplimiento de las características mencionadas con anterioridad.

En el desarrollo, se puede encontrar la descripción y el cálculo de los siguientes componentes: capacidad del equipo, carga de enfriamiento, dimensiones, aislación, evaporador, adsorbedor, condensador, depósito de líquidos, termotanque solar, resistencias eléctricas, baterías, paneles solares fotovoltaicos, controladores y electroválvulas.

También se proponen diferentes mejoras, las cuales permiten obtener un sistema de mayor eficiencia que los observados en las investigaciones realizadas. Estas mejoras incluyen:

- ✓ Un sistema de doble adsorbedor, que permite la reducción del ciclo de refrigeración de 24 h a 1 h.
- ✓ La utilización de resistencias eléctricas alimentadas por una batería, que previamente fue cargada gracias a la energía solar captada y transformada (en energía eléctrica) por medio de paneles solares fotovoltaicos, posibilitando de este modo, la refrigeración durante los períodos de menor radiación solar.
- ✓ Una división definida entre el sistema de captación solar y el refrigerador, dando al usuario la comodidad que normalmente espera obtener de estos electrodomésticos.

Se provee de un resumen técnico que permite conocer los diferentes componentes de forma rápida; una descripción del estado de la técnica, que permite comprender cuál es el avance del sistema en cuestión a nivel mundial. Así como también se dejan las bases sentadas para proseguir con el estudio en un futuro, dando por cerrado el objetivo de investigar y desarrollar el sistema de refrigeración por adsorción.



# Capítulo 1

---

## 1. Introducción

### 1.1 Impacto ambiental y social

El sistema climático se encuentra formado por 5 grandes componentes: atmósfera, hidrosfera, litosfera, criósfera y biosfera, junto con las interacciones que ocurren entre ellos, donde un cambio en uno produce cambios en los demás. La atmósfera terrestre está compuesta por diferentes gases y aerosoles (partículas sólidas en suspensión), cuya composición es de 78,1 % v/v de nitrógeno, 20,9 % v/v de oxígeno, 0,93 % v/v de argón, 0,035 % v/v de helio, gases de efecto invernadero y ozono, siendo el resto vapor de agua y aerosoles.

Los gases de efecto invernadero pueden ser tanto de origen natural, como el metano ( $\text{CH}_4$ ) producido por el estiércol de los animales, o el vapor de agua, producto de la evaporación natural de las fuentes de agua; o de origen artificial, dentro de estas, se puede mencionar al dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), producido por la quema de combustibles fósiles, o los halocarbonos (CFC, HFC y HCFC), utilizados originalmente en sistemas de refrigeración y como propulsores de aerosoles. Estos gases evitan la salida del espectro infrarrojo de la radiación solar reflejada por la superficie terrestre, nubes y la misma atmósfera. (IDEAM, 2017)

Según la “Convención Marco de las Naciones Unidas Sobre el Cambio Climático”, el cambio del clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana, la cual altera la composición de la atmósfera mundial y se suma a la variabilidad natural del clima, es producto de las constantes emisiones de gases de efecto invernadero como el dióxido de carbono, metano, óxidos de nitrógeno, y clorofluorocarbonos (CFC), entre otros, cuyos valores de emisión se encuentran por sobre los valores normales y naturales de un ecosistema (ONU, 1992).

El efecto radiativo es la medida de la variación del balance de energía, en forma de radiación entrante y saliente, producto de un determinado gas presente en la atmósfera. En el

---

caso de la quema de combustibles, el gas de efecto invernadero predominante es el  $\text{CO}_2$ , que posee un efecto radiativo de  $1,66 \text{ W/m}^2$ , cuya concentración en la atmósfera se ha incrementado en un 20 % desde 1995 a 2005. Para los compuestos halocarbonados, el efecto radiativo es de  $0,33 \text{ W/m}^2$ , y desde su aparición, en 1970 hasta el 2000 contribuyeron a un 30 % del aumento del forzamiento radiativo relacionado con los gases de efecto invernadero (IDEAM, 2017); (IPCC, 2013).

A nivel atmosférico, el mayor cambio es el incremento de la temperatura media de la superficie del planeta y de los océanos, la pérdida de la masa de hielo de los mantos de hielo en Groenlandia, Antártida, glaciares de todo el mundo y del hielo Ártico, y la suba del nivel de los océanos y mares (IPCC, 2013).

En el planeta Tierra, la emisión de estos gases se vio incrementada desde la revolución industrial, al hacerse masivo el uso de la energía térmica proveniente de la quema de carbón para las máquinas de vapor. Estas máquinas consisten en quemar un combustible para generar calor, el cual se transmite a un fluido, elevando su presión, para luego utilizarla de forma favorable en una determinada aplicación. Actualmente no solo se quema carbón mineral y vegetal, ya que, gracias a los avances de la industria química, también se queman productos derivados del petróleo. Durante el proceso químico de la quema de estos productos se liberan gases de efecto invernadero a la atmósfera.

Las aplicaciones de la quema de combustibles fósiles, como el petróleo, son cada día más comunes y se encuentran presentes ya sea directa o indirectamente, en muchas de las acciones que las personas realizan en su diario vivir. Por ejemplo, la energía eléctrica necesaria para que un dispositivo de iluminación funcione, para encender y mantener en funcionamiento una computadora, para los sistemas de apoyo vital de una institución de salud, o para cualquier otro dispositivo que utilice energía eléctrica, en la gran mayoría de los casos proviene del sistema eléctrico interconectado nacional.

En el mes de enero del 2019, según el informe entregado por CMMESA (CMMESA, 2019), el 66% de la energía suministrada al sistema interconectado nacional provino de energía térmica (que utiliza la quema de combustibles fósiles para la generación de energía eléctrica, con la consecuente emisión de gases de efecto invernadero), el 30% de la energía suministrada provino de energía hidráulica, el 2% de energía nuclear y el 2% restante de energías renovables. Dentro de éstas se encuentra la energía solar, eólica, hidráulica menor a 50 MW y biogás; esto se muestra en la Fig. 1. Además, se debe tener en cuenta a los vehículos de transporte masivo, que utilizan motores de combustión interna alimentados por productos derivados del petróleo, dado que estos también liberan gases de efecto invernadero.

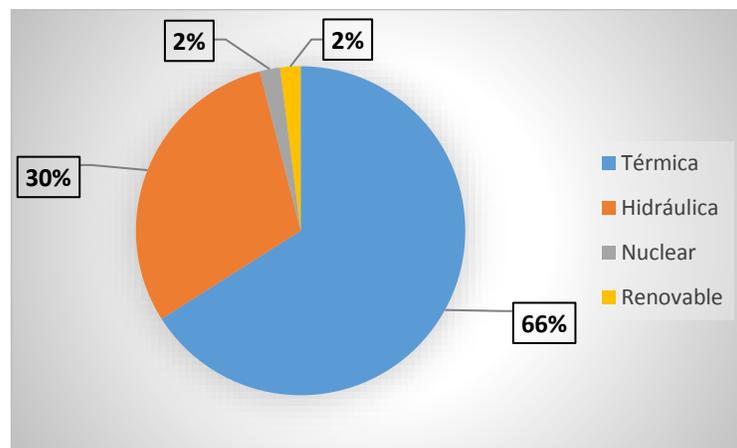


Figura 1: Energía suministrada al sistema interconectado nacional en el mes de enero de 2019.

De lo expresado hasta aquí se puede entender que, ya sea directa o indirectamente, todas las personas están involucradas en la emisión de gases de efecto invernadero. También debe tenerse en cuenta que estos gases son necesarios para que la vida en el planeta Tierra pueda existir, ya que ayudan a mantener la temperatura adecuada para que el ecosistema se desarrolle correctamente. Sin embargo, esta temperatura es el resultado de un equilibrio térmico entre la cantidad de energía térmica que ingresa al planeta, proveniente del sol, y la cantidad de energía térmica que se refleja desde la Tierra hacia el espacio exterior.

---

Los gases de efecto invernadero emitidos en exceso se depositan en la atmósfera, evitando que la energía térmica reflejada salga hacia el espacio exterior, con lo cual para mantener constante el flujo de energía se debe incrementar la temperatura de la superficie terrestre, esto se conoce como calentamiento global. La emisión de gases de efecto invernadero no es mala, el exceso de emisión sí lo es. Si a este exceso se suma la eliminación de los filtros naturales a uno de los gases de efecto invernadero más emitidos (dióxido de carbono), como son los bosques y selvas, así como el constante incremento de este exceso de emisiones, se tiene como resultado el continuo aumento de la temperatura en la superficie del planeta, los cambios climáticos abruptos, el derretimiento de los polos, las constantes inundaciones, y otros efectos adversos.

Organizaciones internacionales han hecho avances políticos para limitar el incremento de la temperatura en la superficie del planeta. Un ejemplo de esto es el Acuerdo de París adoptado el 12 de diciembre de 2015, en el vigésimo primer período de sesiones de la Conferencia de las Partes en la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, celebrada en París del 30 de noviembre al 13 de diciembre de 2015 (ONU, 2015), donde los países firmantes (incluida la República Argentina) se comprometen a: *“Mantener el aumento de la temperatura media mundial muy por debajo de 2 °C con respecto a los niveles preindustriales, y proseguir los esfuerzos para limitar ese aumento de la temperatura a 1,5 °C con respecto a los niveles preindustriales, reconociendo que ello reduciría considerablemente los riesgos y los efectos del cambio climático.”* (Párrafo 1.a – Artículo 2 – Acuerdo de París 2015).

A nivel nacional, se contribuye a la reducción de los gases de efecto invernadero mediante diferentes leyes, tal como es la 27191 sancionada el 23 de septiembre de 2015, que modifica a la ley 26190 “Régimen de Fomento Nacional para el uso de Fuentes Renovables de Energía a la Producción de Energía Eléctrica”, donde se establece que los grandes consumidores de energía eléctrica, para el 2025, deben abastecer el 20% de su consumo eléctrico mediante fuentes de energías renovables, ya sea por medio de la autogeneración o de la compra de dicha energía en el mercado mayorista (Poder legislativo, 2015).

---

Hasta aquí se han mencionado medidas que buscan reducir el cambio climático y la emisión de gases de efecto invernadero a nivel mundial, nacional, o como empresa y ahora es el momento de mencionar a los usuarios. Estos, como ya se ha expresado anteriormente, también son responsables de las emisiones de gases de efecto invernadero, ya sea mediante el consumo de combustibles fósiles (para su transporte, por ejemplo) o de energía eléctrica.

En este punto específicamente, se tienen diversos electrodomésticos en la mayoría de los hogares de la República Argentina, y uno en particular es de uso continuo, necesario y de gran consumo: la heladera. Dicho producto es requerido para lograr la correcta conservación de alimentos, medicamentos, producción de hielo, etc.

Las heladeras representan un gran avance tecnológico y han sufrido muchos cambios desde su aparición en 1859, cuando utilizaban un ciclo de refrigeración por absorción. Estos equipos consistían en un gabinete cerrado y aislado de madera, separado en dos compartimientos (superior e inferior), se introducía nieve en el compartimiento superior y en el inferior los alimentos a enfriar; la nieve absorbe el calor de los alimentos manteniéndolos a baja temperatura y derritiéndose en el proceso.

Este sistema evolucionó en las heladeras a kerosene, las cuales también utilizan el sistema de refrigeración por absorción para producir el enfriamiento en el gabinete, y, actualmente se han transformado en heladeras a gas debido al costo del kerosene. Luego aparecieron las heladeras por ciclo de compresión, que en la actualidad, son utilizadas masivamente a nivel mundial. Actualmente se están realizando investigaciones y avances sobre los sistemas de refrigeración por adsorción, sobre el cual se basa este proyecto.

---

## 1.2 Impacto económico

Las heladeras con sistema de compresión son las únicas que consumen energía eléctrica durante su funcionamiento, mientras que los sistemas restantes (absorción y adsorción) no requieren de energía eléctrica directamente, sino de energía en forma de calor, que puede ser obtenida de diversas fuentes como por ejemplo, calor proveniente de una caldera usada para la calefacción de un hogar, de la energía solar, o de una resistencia eléctrica, en cuyo caso sí requeriría de una fuente de energía eléctrica.

El consumo de una heladera con freezer y sistema de refrigeración por compresión es de aproximadamente 0,090 kW·h; para una heladera sin freezer también con sistema de refrigeración por compresión es de 0,075 kW·h (Ministerio de Hacienda, 2019), esto da respectivamente un consumo aproximado de 66,96 kW·h y 55,8 kW·h mensual, representando un 18,6 % y un 15,5 % respectivamente del consumo promedio de un hogar, con consumo total de 360 kW·h mensual (Righini et ál., 2011). Cabe destacar que estos valores son estimativos, expresados de forma orientativa, ya que varían de un fabricante a otro y de un modelo de heladera a otro; sin embargo, son útiles para comprender las dimensiones del consumo que representan estos elementos en los valores de la factura de la energía eléctrica. En la Fig. 2 se muestra un gráfico representativo de los porcentajes de los consumos más habituales encontrados en un hogar.

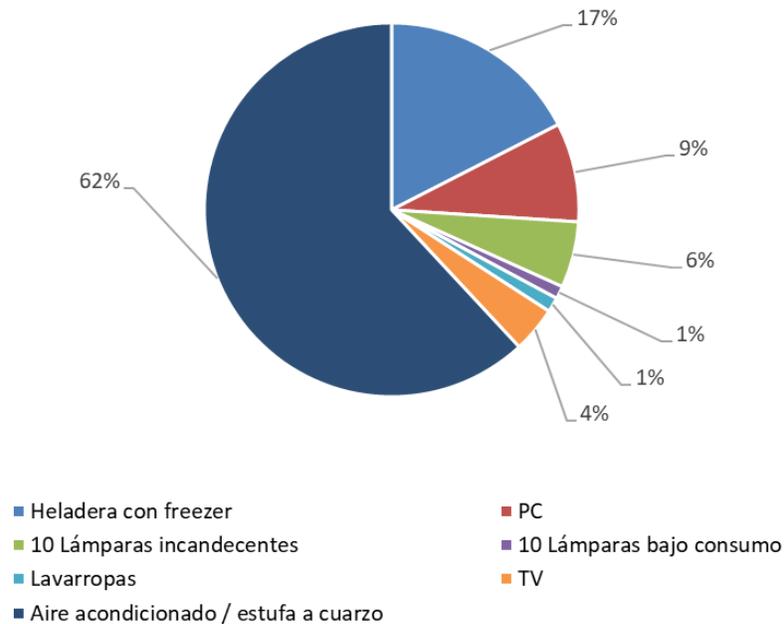


Figura 2: Consumos eléctricos aproximados de un hogar (FUNDELEC, 2011).

En la provincia de Córdoba, según el cuadro tarifario para usuarios residenciales con consumo mayor a 120 kW·h, y menor o igual a 500 kW·h publicado por EPEC, el costo de la energía eléctrica es de aproximadamente \$ 4,96 para los primeros 120 kW·h, y de \$ 6,23 para el consumo excedente a 120 kW·h; dicho cuadro tarifario entró en vigencia el 01 de mayo de 2019 (EPEC, 2019). Teniendo en cuenta estos valores tarifarios, se tiene que el costo de mantener una heladera en funcionamiento continuo para un mes de 30 días, varía entre \$ 321,42 y \$ 403,43 para las heladeras con freezer; entre \$ 267,85 y \$ 336,19 para las heladeras sin freezer, dependiendo de si se considera el consumo dentro de los primeros 120 kW·h o dentro de los excedentes.

Aun así, es correcto decir que el costo promedio de utilización de la heladera con freezer es de \$ 362,42 y de \$ 302,02 para la heladera sin freezer, lo cual representa aproximadamente un 2,97 % y un 2,47 % del salario Mínimo, Vital y Móvil establecido el 1 de marzo de 2019 por el Consejo Nacional del Empleo, la Productividad y el Salario Mínimo, Vital y Móvil (CNEPySMVyM) (Legislación Argentina – Decreto 610/2019, 2019).

Se debe tener en cuenta que estos valores de consumo varían de una provincia a otra y de un país a otro. Por lo tanto, solamente son orientativos a fin de lograr enfocar el problema desde una perspectiva diferente, en la cual, todos los usuarios de estos elementos se encuentran involucrados directamente. Sea o no de relevancia el cambio climático para los mismos, la economía, consumos y gastos de los diferentes elementos comunes a los hogares son de interés colectivo.

Los principales factores que intervienen en los valores mostrados son: el cuadro tarifario de la provincia o región tratada, el consumo propio de la heladera, las horas de funcionamiento que dependen del uso que se dé al electrodoméstico en cuestión y la temperatura ambiente. En este punto es importante destacar que el cálculo del costo se ha realizado para la provincia de Córdoba, la cual posee una de las tarifas eléctricas más elevada del país (Casas, 2019). Otro factor importante a tener en cuenta, es que, a nivel mundial, el valor de la energía eléctrica es cada vez mayor, sin perspectivas a que disminuya, por lo tanto, es de esperar que los valores mostrados anteriormente continúen aumentando.

Idealmente los sistemas de refrigeración por absorción y adsorción no requieren el aporte de energía eléctrica para su funcionamiento, bajo el supuesto de que el calor necesario es aportado desde una fuente alternativa, como puede ser el calor de una caldera usada para un sistemas de calefacción o a través de colectores solares. Sin embargo, la performance que han alcanzado los sistemas de refrigeración por compresión es muy elevada gracias a su extenso desarrollo e inserción comercial, mientras que la utilización de un ciclo de adsorción para la extracción de calor se encuentra en los inicios de su desarrollo. Por lo tanto, se reconoce la limitación de estos sistemas producto del incipiente desarrollo tecnológico de los mismos.

Pese a las dificultades el objetivo de estos métodos no debe ser la eliminación del consumo eléctrico en su totalidad, sino la reducción del mismo, a la vez que se da la posibilidad de que el sistema de refrigeración no utilice fluidos refrigerantes que afecten adversamente a la atmósfera, tal como se ha mencionado en la sección anterior.

### 1.3 Conservación de alimentos

Desde hace mucho tiempo, el hombre posee conocimientos acerca de la relación entre algunas enfermedades y la descomposición de los alimentos, así como también acerca de los diferentes métodos que sirven para evitar dicha descomposición y la proliferación de microorganismos que la producen. Algunos de ellos son el secado (Fig. 3a), ahumado (Fig. 3b), conservación con salmuera, entre otros. Si bien estos métodos permiten conservar los alimentos durante mucho tiempo, producen modificación del sabor o apariencia de los mismos, lo cual no siempre es deseable (Dossat, 2004).



Figura 3a: Carne seca



Figura 3b: Carne ahumada



Figura 3c: Carne envasada

En Francia, durante el período de Napoleón, se desarrolló el proceso de envasado (Fig. 3c), que permite conservar los alimentos durante un período de tiempo mayor que sin dicho proceso. Sin embargo, este procedimiento requiere de condiciones de procesamiento con altos estándares de higiene, lo cual encarece el proceso y no elimina la necesidad de la refrigeración.

Para los procesos de conservación de alimentos, es difícil definir uno específico que sirva para cada etapa de conservación, estas etapas son: el primer enfriamiento luego de la producción, el congelamiento, transporte, almacenamiento en grandes cantidades, exhibición en las góndolas de los comercios y almacenamiento para consumo inmediato o posterior a corto plazo en los hogares. El primer enfriamiento es uno de los más importantes, ya que si

---

la velocidad de enfriamiento no es adecuada, los microorganismos proliferarán y comenzarán a descomponer los productos.

Debido al ciclo de refrigeración que se selecciona en este proyecto, cuyos motivos de selección son explicados más adelante, así como el enfoque social dado al mismo, se centrará el estudio en la conservación de alimentos y medicamentos a corto plazo, en refrigeradores domésticos, previo al consumo, buscando la mantención de una temperatura lo suficientemente baja como para evitar la descomposición de los productos almacenados en su interior (Dossat, 2004).

La conservación de los alimentos a largo plazo, como puede ser el caso de la fruta (cosechada y almacenada en cámaras frigoríficas para ser comercializada luego de la temporada de cosecha), o la carne almacenada en un freezer hogareño (que puede estar por más de un mes en el mismo). Son ejemplos de casos que requieren un estudio más profundo y detallado, debido a que, si la conservación no es la adecuada, se puede producir un deterioro en la superficie de los productos, haciendo que sean menos deseables simplemente por su apariencia. Dicho deterioro, repercute directamente en el precio de venta de los mismos.

Sin embargo, dado que el estudio se enfoca en la mantención de los productos a corto plazo, previa a su consumo y en el uso doméstico, se supone que no serán comercializados posteriormente, y que el tiempo de conservación es lo suficientemente corto para evitar un deterioro considerable en la apariencia e incluso en el estado microbiológico de los mismos.

Las enzimas son las principales responsables del deterioro y de la descomposición de todos los materiales orgánicos. Estas pueden ser definidas como agentes catalíticos químicos que pueden realizar cambios químicos en materiales orgánicos. Se clasifican según la materia sobre la cual actúan o el efecto que producen. Por lo tanto, existen diferentes tipos de enzimas y cada una de ellas produce un cambio químico diferente. No son necesariamente malas, ya que contribuyen a diferentes actividades de las células tales como respiración, digestión, crecimiento y reproducción, ayudan a la germinación de las semillas y el crecimiento de las

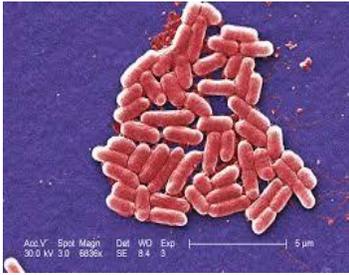
---

plantas y animales. Sin embargo, como ya se ha mencionado, también contribuyen a la descomposición de los materiales orgánicos como la carne y la fruta. Son muy pocos los casos en los cuales sus efectos son deseados en los alimentos (Dossat, 2004).

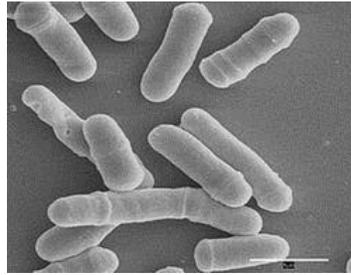
Las enzimas son sensibles al medio que las rodea, siendo destruidas por altas temperaturas (superior a 71 °C). En el extremo contrario, es decir, a bajas temperaturas, no se destruyen, pero cerca de los 0 °C su acción se ve considerablemente reducida. Si se disminuye el contenido de oxígeno también se reduce su acción, por ello muchos alimentos son envasados al vacío. Los diferentes tipos de estos agentes requieren diferentes medios (ácidos, neutros o alcalinos) para poder desarrollarse, por lo tanto, al cambiar el medio en el que se encuentran pueden ser destruidas. Si bien todas las sustancias poseen enzimas naturales que contribuyen a su descomposición, estas son ayudadas por otras producidas por microorganismos (Dossat, 2004).

Los microorganismos son un conjunto de plantas y animales microscópicos, que se encuentran presentes en cualquier ambiente favorable para su desarrollo, como el aire, animales, plantas, etc. Tienen muchas funciones necesarias y útiles, tal como la descomposición del tejido muerto, dando lugar a nuevo tejido. Dentro de todos los microorganismos los que más importan para el tema del que se trata el proyecto, son las bacterias (Fig. 4a), levaduras (Fig. 4b) y mohos (Fig. 4c) (Dossat, 2004).

Las bacterias son útiles para el procesamiento de los escabeches, aceitunas, café, procesamiento del cuero, lino, tabaco, entre otros. La levadura es usada en los procesos de fermentación de las bebidas alcohólicas y el moho para la producción de quesos, penicilina y aureomicina. Sin embargo, así como son necesarios en muchos de los procesos vitales para la vida, salud y procesamiento de algunos alimentos, también producen la descomposición de los alimentos y deben ser eliminados a fin de producir una correcta conservación de los mismos (Dossat, 2004).



*Figura 4a: Bacterias*



*Figura 4b: Levaduras*



*Figura 4c: Moho*

En cuanto a las bacterias, están formadas por una célula simple, se reproducen por mitosis, es decir por división celular, el tiempo de reproducción es de 20 a 30 minutos; sin embargo, su vida varía entre minutos y algunas pocas horas. Algunas bacterias pueden reproducirse por esporulación, lo cual las hace altamente resistentes a los medioambientes más adversos, pudiendo sobrevivir en ellos, en un estado de reposo hasta encontrarse con las condiciones favorables para su germinación (Dossat, 2004).

Casi todas las bacterias producen enzimas capaces de generar la podredumbre de los alimentos, y utilizarlos como fuente de energía para alimentarse, crecer y reproducirse. Algunas de las condiciones desfavorables que limitan el crecimiento de las mismas es la ausencia de humedad, esto es variable de acuerdo con el tipo de bacteria, ya que algunas son extremadamente resistentes a la ausencia de humedad como es el caso de las formadas de esporas, mientras que la mayoría son muy sensibles y se mueren en pocas horas.

El nivel de oxígeno es otro factor que varía de acuerdo al tipo de bacteria, sin embargo, aquellas que pueden sobrevivir en los ambientes escasos de oxígeno, lo obtienen mediante un proceso químico de reducción, este es el que produce la putrefacción y libera sulfuro de hidrógeno, responsable del olor de los animales muertos en descomposición, aquellos que ocurren en presencia de oxígeno se conoce como deterioro.

Para sobrevivir las bacterias requieren de un medio neutral o ligeramente alcalino, no pudiendo vivir en medios extremos. La exposición a la luz solar directa (todo el espectro de

emisión) daña completamente a casi todas las bacterias, la luz visible solo inhibe su crecimiento y la exposición a la luz ultravioleta las mata. Cada especie de bacteria posee un rango de temperatura óptima de crecimiento, sobre el máximo admisible muere, por debajo del mínimo permanece inactiva.

Las levaduras son organismos unicelulares, de la familia de los hongos y tamaño microscópico, por lo general se reproducen por gemación a gran velocidad. Segregan enzimas que reaccionan químicamente con las superficies con que entran en contacto, atacando principalmente a las frutas, granos y sus jugos. Para su crecimiento requieren aire, alimento y humedad, prosperan en temperaturas moderadas y ambientes ligeramente ácidos.

El moho es similar a la levadura, con la diferencia de estar formado por un cierto número de células, la mayoría se reproduce por la formación de esporas, son menos resistentes que las bacterias a las altas temperaturas. Pueden proliferar a temperaturas cercanas a los 0 °C, deteniendo completamente su crecimiento a temperaturas inferiores a los -12 °C. Se ven muy afectados por la falta de humedad. Los interiores de las cámaras refrigeradas presentan un medioambiente ideal para el crecimiento del moho. Para evitar esto se debe mantener una constante circulación de aire, utilizar pinturas antifúngicas y radiación ultravioleta.

Los alimentos pueden ser conservados por medio de la refrigeración, buscando reducir o inhibir los diferentes agentes mencionados anteriormente, con la finalidad de conservarlos durante el mayor tiempo posible. En el caso de la conservación de productos sin vida, como la carne, por lo general se requiere mayor atención para evitar su deterioro, dado que existen procesos de hidrólisis y oxidoreducción de diversos compuestos como proteínas, grasas, etc., que promueven la formación de olores, texturas o sabores indeseables, y que se ven favorecidos a temperatura ambiente. Estos procesos no pueden detenerse por disminución de la temperatura, pero si pueden retrasarse extendiendo su conservación por un tiempo limitado.

---

Existen además procesos asociados a la oxidación de las grasas, catalizados por la acción de la luz y la temperatura, siendo dependientes del tipo de grasa con el que se esté tratando, es decir, de qué animal proceden (no es lo mismo la grasa de vaca, pollo o del pescado) y que limita el tiempo de conservación de los productos. Este factor es conocido como rancidez de la carne.

Los productos vivos, como las frutas y verduras, poseen una protección natural contra la acción de enzimas, por lo tanto, la conservación de éstos se centra en mantener con vida el producto y retardar la acción de las enzimas naturales retrasando su maduración hasta el momento de venta o consumo (Dossat, 2004).

En la Tabla 1, se puede ver que la temperatura de conservación adecuada para la mayoría de los productos es cercana a los 0 °C, sin embargo, puede variar de un producto a otro, especialmente en el caso de la fruta, donde tanto elevadas como bajas temperaturas pueden producir el deterioro superficial del producto.

Debido a lo expresado anteriormente, se concluye que no es necesario congelar los alimentos para conservarlos a corto plazo (menor a 2 días). Esto resulta ventajoso dado que el sistema de refrigeración elegido para el desarrollo utiliza energía solar captada por medio de un colector. Dicho sistema tiene la desventaja de que la cantidad de energía en forma de radiación que puede absorber el colector es limitada por el nivel de radiación, resultando en un sistema con temperaturas muy variables y, por lo tanto, requiere del aporte de calor desde una fuente alternativa. Estos conceptos se abordarán con mayor detalle a lo largo del desarrollo. A dichas desventajas se propondrán métodos para su solución o mejoramiento.

Es preciso destacar, tal como se mencionó anteriormente, que de acuerdo con la Tabla 1 no es necesario congelar los alimentos para evitar su deterioro, sino que se debe reducir la temperatura a valores levemente superiores al punto de congelamiento del agua (0 °C a presión atmosférica), evitando la necesidad de generar hielo, el cual es un objetivo de varios trabajos mencionados en el Apéndice N° 2: “Estado de la técnica”.



# Capítulo 2

## **2. Desarrollo**

### **2.1. Conceptos generales**

Antes de comenzar el desarrollo de los sistemas de refrigeración más habituales, se considera oportuno describir algunos de los principios físicos y termodinámicos que intervienen en los procesos de refrigeración, de modo que el lector pueda comprender con mayor facilidad las explicaciones y términos posteriormente utilizados.

Todos los elementos existentes en el universo conocido están formados por materia y esta por moléculas, que son a su vez, agrupaciones de átomos. Las moléculas se mantienen unidas entre sí gracias a la fuerza de cohesión. La magnitud de dicha fuerza es una propiedad intrínseca de cada sustancia y se encuentra relacionada con la forma y la estructura de cada molécula. Cuanto más compacta es la estructura de una molécula, mayores son las fuerzas de cohesión. Una propiedad importante a tener en cuenta de estas fuerzas, es que disminuyen al aumentar la temperatura. La propiedad opuesta es la fuerza de repulsión, que tiende a separar las moléculas de una determinada sustancia y está relacionada con la energía cinética de la misma. Ambas propiedades se encuentran relacionadas con la temperatura de la sustancia de la siguiente manera:

Al aumentar la temperatura, la fuerza de cohesión de las moléculas disminuye y se incrementa la fuerza de repulsión. El incremento de temperatura se produce cuando un cuerpo absorbe energía en forma de calor del medio que lo rodea. Dicha energía se almacena en el cuerpo en forma de energía cinética molecular, produciendo gran agitación en las moléculas ayudando a que se separen y muevan con mayor libertad.

La materia puede encontrarse en tres estados básicos, sólido, líquido y gaseoso, en los cuales, las fuerzas de repulsión y cohesión toman diferentes valores. Esto genera que la materia pueda tener forma y volumen propio (sólidos); adopten la forma del recipiente que los contiene (líquidos y gases); y en el caso de los gases, también se puedan mezclar

---

completamente entre ellos gracias a la gran fuerza de repulsión que existe entre sus moléculas.

Para realizar el cambio de estado de una sustancia es necesario modificar las fuerzas de cohesión y repulsión existentes entre sus moléculas, lo cual se logra mediante la adición o sustracción de energía interna. Ésta, se encuentra formada por energía cinética molecular, vibracional y rotacional. Para lograr los cambios de estado, el método más simple conocido hasta el momento es mediante la transmisión de energía térmica a las sustancias, la cual se almacena en ellas como energía interna, esta transferencia de energía puede darse desde el medio que la rodea hacia la sustancia (en tal caso, se incrementa la energía interna) o desde la sustancia hacia medio que la rodea (en este caso, se disminuye la energía interna).

En un sistema aislado, al cual no se le aplica trabajo y se encuentra formado por dos cuerpos a diferentes temperaturas, se producirá un flujo de calor desde el cuerpo que se encuentra a mayor temperatura hacia el otro, hasta que ambas temperaturas se igualen. Estos intercambios de calor se pueden realizar de tres formas distintas que no son excluyentes entre sí.

- ✓ Conducción: Se produce entre los átomos que se encuentran en contacto y a diferente temperatura.
- ✓ Convección, a su vez puede ser forzada o natural. Requiere que un fluido circule rodeando a un cuerpo a diferente temperatura.
- ✓ Radiación: No hay contacto entre los cuerpos.

Estos tres métodos de transmisión del calor se pueden visualizar en la Fig. 5.

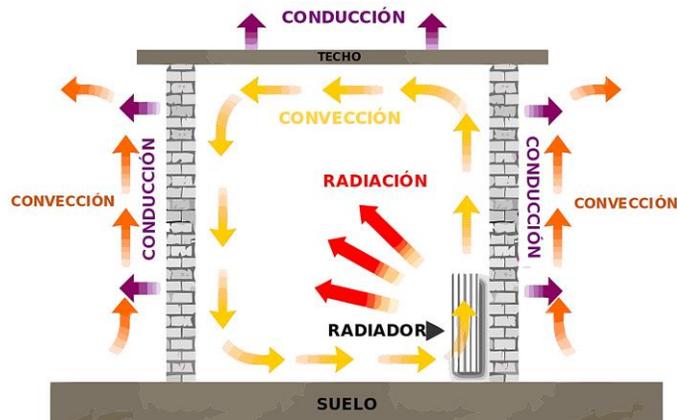


Figura 5: Formas de transmisión de calor.

Al analizar un sistema, este puede tener uno, dos o los tres tipos de transmisión de calor, este es el caso de un radiador en el interior del hogar, donde el calor suministrado por el mismo se transmite hacia aire del interior del hogar por medio de la radiación, dicho aire se calienta y al ser menos denso asciende a la parte superior de la habitación (convección), por último las paredes transmiten calor hacia el exterior por medio de la conducción.

Estos procesos de intercambio de calor, son de gran importancia en la refrigeración, ya que se encuentran presentes durante el proceso de enfriamiento de una heladera. Más adelante se retomarán estos conceptos y ampliarán mediante la explicación y utilización de las leyes termodinámicas que intervienen en cada método, aplicándolas a los diferentes elementos que componen una heladera.

En los procesos de transferencia de calor pueden identificar los siguientes tipos, se recomienda repasar los conceptos para comprender los desarrollos posteriores.

- ✓ Calor específico
- ✓ Calor sensible

✓ Calor latente

Los cambios de estado de las sustancias se producen a temperatura constante, sin embargo, el cuerpo continúa absorbiendo energía calorífica durante dicho proceso, la cual es transformada en energía interna, modificando a la energía cinética, vibracional y rotacional de la molécula, y, por lo tanto, las fuerzas de cohesión y repulsión existentes entre las mismas (Porzia, 1956).

En la Tabla 1 se puede observar un resumen de los diferentes valores de calor latente de fusión y evaporación para algunas sustancias.

Tabla 1: Calores latentes de fusión y evaporación de algunas sustancias.

Sustancia	Punto de fusión (°C)	Calor latente de fusión (J/kg)	Punto de ebullición (°C)	Calor latente de vaporización (J/kg)
Helio	-269,65	$5,23 \times 10^3$	-268,93	$2,09 \times 10^4$
Nitrógeno	-209,97	$2,55 \times 10^4$	-195,81	$2,01 \times 10^5$
Oxígeno	-218,79	$1,38 \times 10^4$	-182,97	$2,13 \times 10^5$
Alcohol etílico	-114,00	$1,04 \times 10^5$	78,00	$8,54 \times 10^5$
Agua	0,00	$3,33 \times 10^5$	100,00	$2,26 \times 10^6$
Azufre	327,30	$3,81 \times 10^4$	444,60	$3,26 \times 10^5$
Plomo	327,30	$2,45 \times 10^4$	1750,00	$8,70 \times 10^5$
Aluminio	660,00	$3,97 \times 10^5$	2450,00	$1,14 \times 10^7$
Plata	960,80	$8,82 \times 10^4$	2193,00	$2,33 \times 10^6$
Oro	1063,00	$6,44 \times 10^4$	2660,00	$1,58 \times 10^6$
Cobre	1083,00	$1,34 \times 10^5$	1187,00	$5,06 \times 10^6$

---

## 2.2. Introducción a la refrigeración

El primer principio de la termodinámica para un sistema cerrado establece que: “*al suministrar una determinada cantidad de calor ( $Q$ ) a un sistema, esta cantidad de energía será igual a la diferencia del incremento de la energía interna del sistema ( $\Delta U$ ), más el trabajo ( $W$ ) efectuado por el sistema sobre sus alrededores*”, es decir, la energía permanece constante en todo momento. En los procesos naturales el calor fluye de una fuente caliente (de mayor temperatura) a una fuente fría (de menor temperatura), disminuyendo la energía interna de la primera y aumentando la de la segunda (Lizarraga, J. M., 2011).

Sin embargo, algunos procesos son termodinámicamente desfavorables, como por ejemplo: quitar calor de una fuente fría para entregarlo a una fuente caliente. Este proceso no es contrario a la 1° ley, ya que, si todo el calor extraído de la fuente fría se entregue a la fuente caliente, la suma algebraica de las energías es nula y se cumple el primer principio de la termodinámica. Sin embargo, este ejemplo es realizable únicamente mediante la aplicación de trabajo externo, y se rige por el segundo principio de la termodinámica, siendo enunciado por diferentes autores de las siguientes formas:

Enunciado de Clausius: “*Es imposible construir una máquina periódica cuyo único efecto sea pasar calor de una fuente fría a una más caliente*”. Este principio establece que para pasar calor de una fuente fría a otra más caliente se debe gastar trabajo (Lizarraga, J. M., 2011).

Enunciado de Kelvin - Planck: “*Una evolución cerrada, en la cual se intercambia calor con una única fuente, no puede producir trabajo*” (Lizarraga, J. M., 2011).

Enunciado de Ostwald: “*Es imposible la existencia de un móvil perpetuo de segunda especie*”. Un móvil perpetuo de segunda especie, es aquel que en cada ciclo toma calor de una fuente y lo transforma en la misma cantidad de trabajo (Lizarraga, J. M., 2011).

El enunciado de Ostwald es aplicable a una máquina térmica, es decir, aquella que transforma el calor de una fuente caliente en trabajo. Dado que parte del calor se pierde, las máquinas térmicas reales funcionan con un determinado factor de rendimiento térmico “ $\eta$ ”, que resulta de la relación entre el trabajo obtenido (W) y la cantidad de calor suministrado (Q). Esto se expresa en la ecuación 1 (Lizarraga, J. M., 2011).

$$\eta = 1 - \frac{W}{Q} \quad (1)$$

El enunciado de Clausius es aplicable a las máquinas frigoríficas o bomba de calor, cuya función es extraer calor de una fuente fría y entregarlo a otra más caliente mediante la absorción del calor, en este caso no es correcto hablar de rendimiento debido a que los factores se invierten, sí es correcto hablar de eficiencia. El coeficiente de eficiencia “ $\varepsilon$ ” se obtiene realizando la relación entre el calor extraído de la fuente fría y el trabajo suministrado a la máquina frigorífica. Esto se expresa en la ecuación 2.

$$\varepsilon = \frac{Q_F}{Q_C - Q_F} \quad (2)$$

Tanto el coeficiente de rendimiento como el coeficiente de eficiencia son números adimensionales, por lo tanto, para que el cálculo sea correcto las unidades de las magnitudes que intervienen deben ser análogas.

El ciclo de Carnot es un ciclo termodinámico teórico y reversible basado en la segunda ley de la termodinámica. Se encuentra formado por dos isothermas y dos adiabáticas (Fig. 6), en el cual la máquina extrae una determinada cantidad de calor de la fuente caliente y entrega otra cantidad, diferente, a la fuente fría. En este proceso, se produce una cantidad de trabajo igual a la diferencia entre el calor extraído de la fuente caliente y el entregado en la fuente fría, esto se expresa en la ecuación 3, en concordancia con lo postulado en la primera ley de la termodinámica. Sin embargo, esto es para una máquina térmica que funciona con el ciclo de Carnot.

Para una máquina frigorífica se extrae calor de la fuente fría y se entrega una cantidad menor a la fuente caliente, esto se logra mediante el agregado de trabajo. Para este caso la cantidad de calor extraído, es igual a la diferencia entre la cantidad de calor entregado a la fuente caliente y la cantidad de trabajo entregado al sistema, esto se expresa en la ecuación 4. En la Fig. 7, se puede observar un esquema de la máquina de Carnot, a) para máquina térmica y b) para máquina frigorífica (F. I. Greco, 1995).

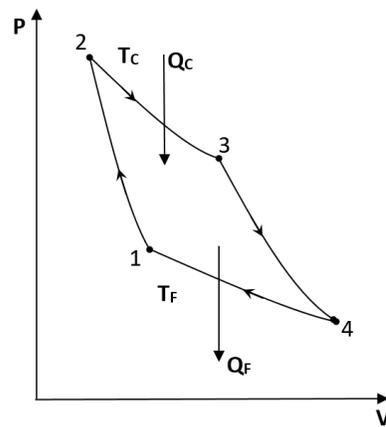


Figura 6: Ciclo de Carnot para gas ideal.

$$W = Q_C - Q_F \quad (3)$$

$$Q_F = Q_C - W \quad (4)$$

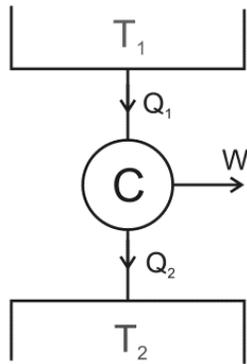


Figura 7a: Ciclo de Carnot - Máquina térmica.

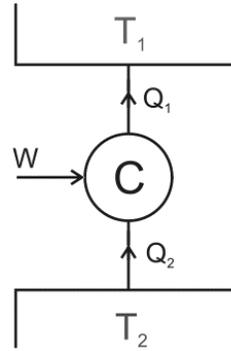


Figura 7b: Ciclo de Carnot - Máquina frigorífica.

Si bien el ciclo de Carnot es teórico y reversible, sirve como punto de comparación para los diferentes ciclos que surgieron posteriormente, y establece el máximo rendimiento que puede tener una máquina térmica o frigorífica. Otros puntos importantes a tener en cuenta es que este ciclo utiliza dos fuentes de calor (una fría y otra caliente) y cualquier sustancia puede evolucionar dentro del sistema, ya sea un gas perfecto, vapor húmedo, etc. En el caso de un gas ideal, el proceso 2 - 3 (expansión) y el proceso 4 - 1 (compresión) siguen curvas politrópicas, tal como se muestra en la Fig. 6. Para vapor húmedo, estos procesos siguen rectas del tipo isobáras, lo cual se muestra en la Fig. 8. En el caso de otra sustancia, se deberán analizar puntualmente las características de la misma para determinar las curvas que establecen su evolución (F. I. Greco, 1995).

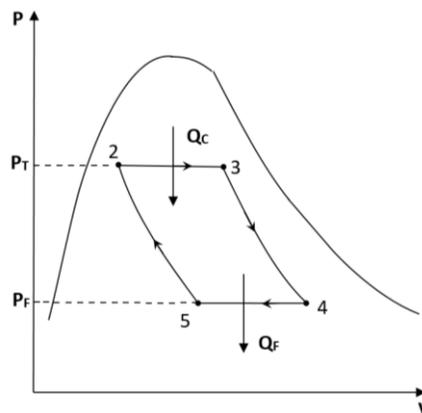


Figura 8: Ciclo de Carnot para vapor de agua.

---

Según [F. I. Greco, 1995] el cálculo del rendimiento del ciclo termodinámico de Carnot para cualquier sustancia, puede simplificarse como la relación entre la temperatura de la fuente fría y la temperatura de la fuente caliente, tal como se muestra en la ecuación 5. Mientras que la eficiencia se obtiene realizando la relación inversa (temperatura de la fuente caliente dividida por la temperatura de la fuente fría), esto se expresa en la ecuación 6.

$$\eta = 1 - \frac{T_f}{T_c} \quad (5)$$

$$\varepsilon = \frac{T_f}{T_c - T_f} \quad (6)$$

En resumen, el ciclo de Carnot es un ciclo termodinámico reversible e ideal, que responde al primer y segundo principio de la termodinámica, establece el rendimiento o eficiencia máxima que puede obtenerse de un proceso de transferencia de calor. Puede utilizarse para representar el ciclo de transferencia de calor de una fuente caliente a otra fría, extrayendo trabajo en el proceso, o su inversa donde se extrae calor de la fuente fría y se entrega en la fuente caliente. Este segundo proceso es conocido como “bomba de calor” o proceso de refrigeración, en el cual se basa el presente trabajo. El proceso de refrigeración puede realizarse de diferentes formas y es, como ya se ha expresado anteriormente, fundamental para el diario vivir de las personas.

## 2.3. Descripción de los sistemas de refrigeración usuales

### 2.3.a. Sistema de refrigeración por absorción

Estos sistemas son los más antiguos y han sido perfeccionados en gran manera desde su aparición, comúnmente son llamados “heladeras a kerosene” debido a que se difundieron masivamente al comenzar a utilizar la quema de kerosene para la generación del calor requerido por el ciclo. Actualmente aún se pueden conseguir algunas en funcionamiento, sin embargo se ha cambiado el kerosene por gas natural. La capacidad de utilizar una fuente de calor como motor del ciclo de refrigeración, las hace aptas para lugares donde no se tiene fácil acceso a la energía eléctrica, como es el caso de las casas alejadas de las ciudades ubicadas en las Sierras de Córdoba, o en los pequeños poblados del norte del país. Es por este motivo que aún continúan fabricándose y comercializándose, aunque no de forma masiva. En la Fig. 9, se puede observar una antigua publicidad de este tipo de heladeras, con un dibujo ilustrativo de las mismas.

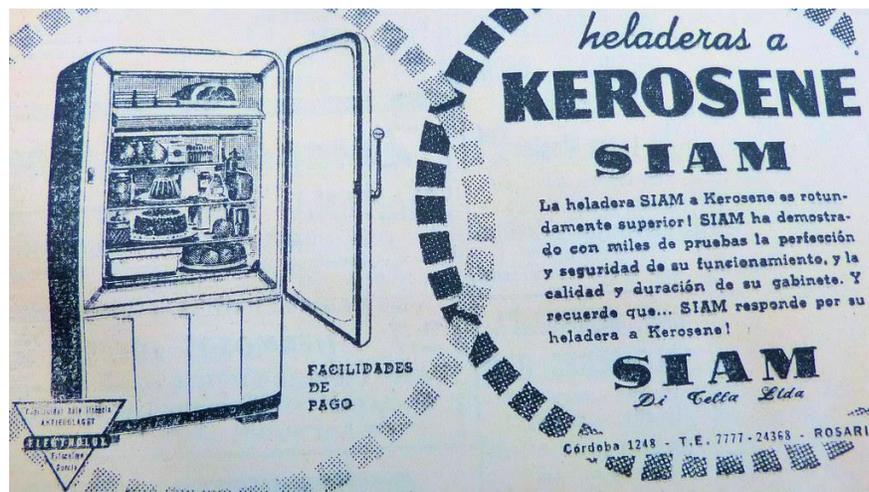


Figura 9: Publicidad de heladera a kerosene SIAM.

Para su funcionamiento utilizan un gas licuado (amoníaco,  $\text{NH}_3$ ) que se evapora en el evaporador debido a la elevación de su temperatura al extraer el calor del interior del gabinete

de la heladera. El gas luego pasa por el absorbedor, formado por un recipiente con agua que se mezcla con el  $\text{NH}_3$  produciendo dos tipos de mezclas, una rica en  $\text{NH}_3$  y la otra pobre en  $\text{NH}_3$ . La solución pobre vuelve al absorbedor para transformarse en solución rica, mientras que la restante pasa al hervidor en estado líquido. Aquí se adiciona calor a la solución ya sea por la quema de kerosene o de gas y se produce la evaporación de la misma. Esta pasa por un rectificador donde se condensa el agua que es devuelta al absorbedor.

EL  $\text{NH}_3$  gaseoso pasa al condensador de doble etapa, en la primera se condensa el  $\text{NH}_3$  que se utilizará para refrigerar el gabinete, en esta etapa el enfriamiento del condensador se hace por un intercambio de calor con el aire. En la segunda etapa, se debe lograr que la temperatura del  $\text{NH}_3$  sea menor, lo cual es posible mediante un intercambio de calor de mayor eficiencia que la obtenida con el aire. El  $\text{NH}_3$  condensado en esta etapa se utiliza para refrigerar el congelador de la heladera debido a que, al estar a menor temperatura, posee mayor capacidad de absorción de calor.

Como a lo largo del circuito cerrado se tiene  $\text{NH}_3$  y agua en forma de líquido y vapor, así como también adición y sustracción de calor, se generan diferencias de presiones, lo que resulta contraproducente, por lo tanto, se deben igualar las presiones en el condensador por un lado y entre el absorbedor y el evaporador por el otro. Esto se logra mediante un gas inerte y liviano a alta presión, hidrógeno ( $\text{H}_2$ ), el cual es introducido entre el absorbedor y la salida de la segunda etapa del condensador, donde se mezcla con el  $\text{NH}_3$ .

El  $\text{H}_2$  se encuentra depositado en un recipiente a alta presión. Desde allí asciende hacia el congelador por un tubo de doble pared, donde por el interior, circula la mezcla de  $\text{NH}_3$  e  $\text{H}_2$  que proviene del evaporador, y por el exterior el  $\text{H}_2$  que proviene del absorbedor, el cual arrastra  $\text{NH}_3$  líquido de la reserva que se encuentra en el absorbedor al mantener el equilibrio de presiones. Además del equilibrio de presiones, ésta circulación a contracorriente de los fluidos, produce un intercambio de calor entre ellos, contribuyendo a mejorar la eficiencia.

---

Por otro lado, debe tenerse en cuenta que en el absorbedor se recibe una mezcla de  $\text{NH}_3$  e  $\text{H}_2$  en forma de vapor, los cuales se mezclan con el agua. Durante dicha mezcla se produce el intercambio de calor, y, para incrementar aún más el rendimiento del ciclo, se debe eliminar dicho calor mediante un intercambiador de calor de cloruro de metilo.

Como se puede notar, este sistema de refrigeración no posee partes móviles ni requiere energía eléctrica para su funcionamiento, sin embargo, utiliza la quema de derivados de combustibles fósiles o gas, y está formado por muchas partes de gran volumen, produciendo que sea de gran tamaño en comparación con las heladeras de compresión modernas.

### 2. 3. b. Sistema de refrigeración por compresión

Actualmente son los sistemas más difundidos y utilizados. Su tamaño y capacidad abarca desde pequeñas heladeras de camping hasta sistemas de refrigeración industrial, se basan en el principio de que un líquido para evaporarse debe absorber calor. En este sistema se fuerza la evaporación al hacer pasar el líquido refrigerante, también conocido como fluido frigorígeno (FF), a través de una válvula de expansión. El fluido se mueve por el circuito cerrado gracias al trabajo entregado por un compresor mecánico. En la Fig. 10, se puede observar una heladera a compresión.



Figura 10: Heladera a compresión.

El compresor toma vapor caliente que proviene del evaporador, lo comprime aumentando su presión e impulsa a través del circuito; luego de dicho componente, el FF pasa por condensador donde cede su calor latente de fusión hacia el medio que lo rodea, normalmente aire, cambiando su estado de gaseoso a líquido. Al abandonar el condensador, pasa por una válvula de expansión, donde pierde su presión y se fuerza su evaporación, comenzando a circular por el evaporador; al producirse la evaporación absorbe el calor del medio que rodea a dicho componente (el evaporador), adquiriendo nuevamente su calor latente y reduciendo la temperatura del interior del gabinete. Finalmente, el FF en estado gaseoso del evaporador es succionado nuevamente por el compresor reiniciando el circuito.

Estos circuitos poseen pocas piezas y son de gran capacidad de acuerdo a su tamaño; sin embargo, en su construcción se deben tener algunas precauciones:

1. El condensador debe ser lo suficientemente largo para asegurar que el FF se condense completamente antes de pasar por la válvula de expansión, su eficiencia se puede mejorar añadiendo aletas a los caños o mediante una lluvia de agua fría sobre su superficie.

---

Para reducir su tamaño suele confeccionarse con forma de zigzag, también debe tenerse en cuenta que el FF no podrá adquirir una temperatura menor a la del medio refrigerante, por lo tanto, la presión de trabajo se encuentra limitada (rua.ua.es, 2011).

2. El evaporador y la válvula de expansión se ubican dentro de la cámara a refrigerar, y ambos deben estar calculados para que, en las peores condiciones, no llegue líquido al compresor. Existe una relación de compromiso entre la velocidad de circulación del FF, su capacidad frigorífica y el objetivo que se persigue con el equipo de refrigeración, la cual debe ser considerada al analizar los resultados obtenidos, de modo que estos reflejen lo mejor posible la situación real del equipo.

3. El compresor y el condensador se ubican fuera de la cámara a refrigerar dado que son las partes que emiten calor, el compresor en las heladeras es comúnmente llamado “bocha” debido a su forma. Estos no están preparados para manejar líquidos por lo tanto debe evitarse la llegada del mismo al equipo. Pueden presentarse con diversas capacidades y tensiones de acuerdo a su utilización. Su capacidad debe ser de 4 a 8 kg de hielo cada 24 h para heladeras y de 15 a 20 kg de hielo cada 24 h para un freezer doméstico (Electrolux, 2011), este elemento es fundamental a la hora de determinar el consumo del equipo.

4. El fluido frigorígeno debe ser de gran rendimiento y de bajo daño a la capa de ozono. Actualmente los más utilizados producen daños ecológicos, dentro de ellos se encuentra el R600; R134a y el R12; este último se encuentra prohibido en muchos países. Al seleccionar el tipo de refrigerante, también se limita el tipo de material a utilizar en las diferentes partes del circuito. Por ejemplo, el amoníaco utilizado en las primeras heladeras, reacciona con el cobre y sus aleaciones produciendo un desgaste prematuro de las diferentes partes. En la Fig. 11 se puede observar un esquema simplificado del ciclo de refrigeración por compresión; en rojo se muestra la circulación de refrigerante en forma de vapor y el calor, mientras que en azul la circulación del FF en estado líquido.

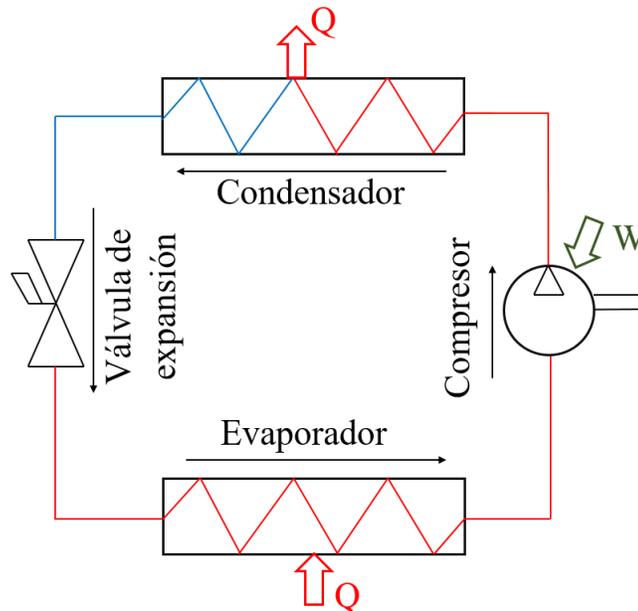


Figura 11: Esquema simplificado de un sistema de refrigeración por compresión.

### 2. 3. c. Sistema de refrigeración por adsorción

Actualmente es un sistema cuyo desarrollo se encuentra en auge, aunque se pueden encontrar trabajos previos al año 2000.

Es un sistema con un funcionamiento simple, el cual permite trabajar con bajas temperaturas en la fuente caliente (menor a  $100^{\circ}\text{C}$ ), haciéndolo ideal para el aprovechamiento del calor de fuentes alternativas, como puede ser, el captado por un sistema de colector solar o el aportado por la quema de biogás. También se puede aportar el calor requerido por el ciclo mediante resistencias eléctricas. Esto permite que se pueda utilizar en diferentes lugares con o sin acceso a una red de energía eléctrica.

Se basa en un principio químico donde dos sustancias, adsorbente y adsorbato, se unen molecularmente por fuerzas muy pequeñas, principalmente fuerzas de Van Der Waals. El adsorbente tiene la peculiaridad de ser, por lo general, un sólido de bajo peso específico con

---

gran porosidad, como es el caso del carbón activado. Esto le permite atrapar las moléculas de adsorbato en estado gaseoso, en una especie de “trampa laberíntica” de la cual no pueden salir. Dicha capacidad da la posibilidad de condensar el adsorbato, volviéndolo al estado líquido y liberando su calor en el proceso. El proceso descrito se conoce como etapa de adsorción.

Para liberar las moléculas atrapadas, se debe suministrar calor a los componentes (adsorbente y adsorbato), evaporando nuevamente el adsorbato en la etapa conocida como desorción, durante dicho proceso se regenera el adsorbente. Es de destacar que en la etapa de adsorción se libera calor, producto de la condensación del adsorbato, mientras que para la desorción se debe suministrar calor para la liberación del mismo.

El sistema consiste de pocas partes y ninguna de ellas tiene movimiento, salvo por las válvulas que regulan el flujo de adsorbato por el circuito. Es un sistema muy silencioso y con bajo mantenimiento. El equipo está formado por:

- I. Un evaporador, que absorbe calor del gabinete de la heladera gracias a la evaporación del adsorbato.
- II. Un sistema de adsorción, el cual contiene al adsorbente, que permite regenerar el fluido de refrigeración y se encuentra en contacto con la fuente de calor.
- III. Un condensador que permite volver al adsorbato o fluido refrigerante al estado líquido.
- IV. El depósito de líquidos que permite sobrellevar las variaciones en la demanda de adsorbato.

V. Una fuente de calor, la cual suministra el calor necesario para producir la desorción.

El ciclo puede explicarse de forma simplificada de la siguiente manera:

- ✓ El fluido ingresa al evaporador en estado de líquido, donde absorbe el calor del gabinete evaporándose en el proceso.
- ✓ El vapor pasa al adsorbedor donde es condensado por el adsorbato.
- ✓ Luego es evaporado nuevamente con la adición del calor proveniente de la fuente de calor, aumentando su presión y haciendo que circule hacia el condensador.
- ✓ En el condensador cede su calor y pasa a estado líquido.
- ✓ Una vez condensado pasa al depósito de líquidos, donde continúa enfriándose hasta la temperatura ambiente y queda almacenado en este componente hasta que es requerido por el evaporador nuevamente.

En la Fig. 12, se puede observar un esquema simplificado del sistema de refrigeración por adsorción, con el aporte de energía térmica solar; en rojo se indica fluido refrigerante en estado de vapor y agua caliente, mientras que en azul se simboliza agua fría y fluido refrigerante en estado líquido.

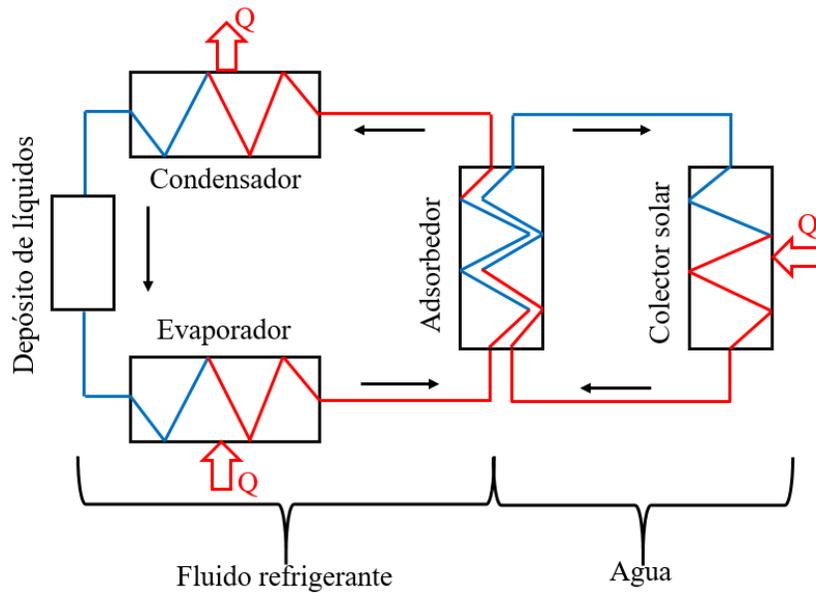


Figura 12: Esquema simplificado del sistema de refrigeración por adsorción.

El ciclo es de funcionamiento intermitente ya que el proceso de adsorción / desorción demora un cierto tiempo en realizarse, dependiendo de las características de los elementos utilizados y las condiciones bajo las cuales se realizan las diferentes etapas del ciclo. Algunos experimentos han aprovechado la diferencia de temperatura entre el día y la noche para la calefacción y refrigeración de la cámara de adsorción, produciendo un ciclo de 24 h de duración, sin embargo, esto conlleva a un bajo coeficiente de performance (Pongtornkulpanich, 2014). Una solución a este inconveniente consiste en utilizar dos cámaras adsorbentes, intercalando su funcionamiento, de este modo, mientras que una se encuentra en la etapa de adsorción, la otra se encuentra en la etapa de regeneración, invirtiendo el estado al finalizar la etapa correspondiente a cada una de ellas (Pino F., 2011).

La desventaja de la doble cámara de adsorción es el espacio que requiere para su construcción, la cantidad extra de materiales y la necesidad de válvulas para coordinar el funcionamiento alternativo de las cámaras. También se debe tener en cuenta el equipo necesario para la refrigeración y calefacción alternativa de las mismas.

---

A primera vista, resulta un sistema muy prometedor debido a las bajas temperaturas de trabajo y a la simpleza del circuito. Sin embargo, tiene desventajas a tratar tales como su bajo COP (coeficiente de performance); su ciclo discontinuo, lo cual produce variaciones de temperaturas dentro del refrigerador; y la necesidad de intercambiadores de calor para calentar y refrigerar las cámaras de adsorción; entre otras.

Pese a las dificultades expresadas, resulta interesante avanzar con el estudio y desarrollo del sistema de refrigeración por adsorción ya que: su construcción es versátil y simple y requiere bajas temperaturas.

También se debe destacar que a nivel mundial se están realizando investigaciones y desarrollos con dicho sistema, en reemplazo de los sistemas de refrigeración por compresión convencionales.

Además, los sistemas de refrigeración por absorción utilizan calor proveniente de la quema de productos derivados del petróleo o gas natural, debido a las elevadas temperaturas que requieren para su funcionamiento, produciendo la liberación de gases de efecto invernadero a la atmósfera. En dichos sistemas, si bien es posible adaptar un sistema de calentamiento con calor residual, la temperatura que requieren para evaporar el  $\text{NH}_3$ , normalmente utilizado como refrigerante, es elevada y, por lo tanto, se necesita una fuente de calor alternativa, que suministre la energía calórica faltante.

En cuanto a los sistemas de refrigeración por compresión, la energía eléctrica que consumen, proviene en su mayoría de la quema de derivados del petróleo, tal como se mencionó con anterioridad. Es decir, contribuyen, de forma indirecta, a la generación de gases de efecto invernadero. Los gases utilizados como refrigerantes son perjudiciales para el medio ambiente y por lo tanto su utilización debe reducirse en la mayor medida posible, a diferencia del sistema planteado donde se puede utilizar gases como el etanol, el cual no produce el deterioro de la capa de ozono.

A lo largo del desarrollo del ciclo termodinámico, se utilizan los siguientes términos:

- ✓ Título: Es la cantidad de adsorbato presente en el adsorbente.
- ✓ COP: Coeficiente de performance, también puede llamarse eficiencia.
- ✓ Isósteras: En un gráfico  $\ln(P)$  vs  $-1/T$ , son las rectas formadas por los puntos de igual título, es decir, aquellos puntos donde la concentración de adsorbato en el adsorbente es constante.

El ciclo termodinámico que utiliza este sistema de refrigeración en el adsorbedor difiere del ciclo de Carnot, que se utiliza como base para los sistemas de refrigeración por compresión, ya que se encuentra formado por dos isósteras y dos isobaras tal como se muestra en la Fig. 13, en la misma, el punto A y A' son los mismos, se los ha marcado de forma diferente para diferenciar el punto de inicio y final del ciclo.

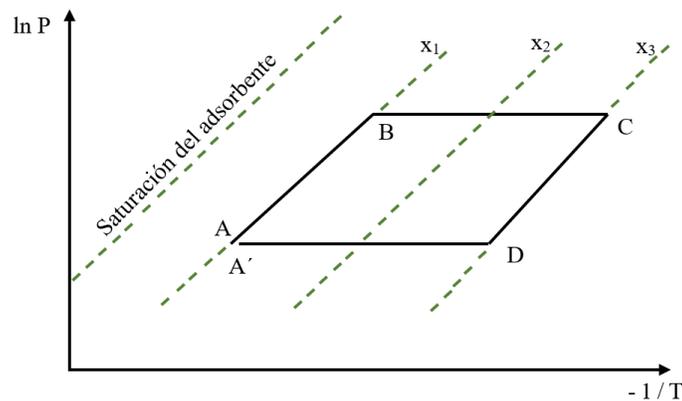


Figura 13: Ciclo termodinámico de adsorción.

La fase de calentamiento (A - B) es un proceso isostérico, durante el cual se suministra calor a la cámara de adsorción, produciendo la liberación del adsorbato desde los poros del adsorbente, evaporándolo a título constante y elevando la presión del mismo. El proceso

---

inicia a la presión y temperatura del evaporador (punto A) y evoluciona hasta alcanzar la temperatura y presión del condensador (punto B).

A continuación, se produce la desorción (B - C), donde el adsorbato abandona los poros del adsorbente completamente. En un ciclo ideal, dicho proceso se inicia una vez que el adsorbato ha alcanzado la presión de saturación del refrigerante puro a la temperatura del condensador. El título reinante en la cámara de adsorción disminuye a presión constante, producto de que el refrigerante abandona el adsorbente. El adsorbato se debe condensar para que pueda ser derivado a un contenedor o directamente al evaporador, encontrándose así en condiciones de ser reutilizado.

Una vez que la temperatura de la cámara de adsorción ha disminuido lo suficiente por ausencia del suministro de calor (punto C), la presión comienza a disminuir con un leve incremento de la temperatura (isostera C - D), pero manteniendo constante el título. Si bien este enfriamiento produce que el adsorbente esté en condiciones de adsorber al fluido refrigerante nuevamente, la presión es relativamente elevada para que esto suceda.

La última etapa del ciclo se inicia cuando se ha alcanzado la presión y temperatura del evaporador (punto D). En este punto, el adsorbente está en condiciones de adsorber los vapores del refrigerante nuevamente. Debido a la baja presión el adsorbato comienza a evaporarse valiéndose del calor existente en la cámara a refrigerar, por lo tanto esta se enfría, produciéndose la refrigeración propiamente dicha. Los vapores son adsorbidos por el adsorbente, incrementando el título de la sustancia adsorbida en el adsorbente; al finalizar esta etapa (punto A`), se inicia un nuevo calentamiento de la cámara de adsorción y, por lo tanto, un nuevo ciclo (Gonzales Martín, 2006) (Pongtornkulpanich, 2014).

La mayoría de los equipos de refrigeración por adsorción que se mencionan en el Apéndice N° 2: "Estado de la técnica", utilizan calor proveniente del sol, mediante la exposición de la cámara de adsorción directamente a la radiación del mismo, por lo tanto, el

ciclo de funcionamiento es de 24 h. Este tiempo se puede disminuir mediante diferentes artilugios constructivos.

En los ciclos de 24 h, la desorción se produce durante el día, momento en el cual la radiación solar incide sobre el adsorbedor, permitiendo que éste se caliente y libere el refrigerante contenido en sus poros. Dado que este proceso es endotérmico y el adsorbato se encuentra caliente, no se adsorberá el vapor del refrigerante, se eleva la presión en el interior del circuito y por lo tanto no se produce frío en el interior de la cámara a refrigerar (esta es la fase de calentamiento y desorción A - C).

Por la noche al no incidir la radiación solar sobre el adsorbedor, éste se enfría y permite que el vapor del refrigerante sea atrapado en los poros del adsorbato nuevamente, disminuyendo la presión del circuito, dando lugar a la posibilidad de que mayor cantidad de refrigerante absorba calor de la cámara a refrigerar y se evapore. Esta es la parte de mayor interés para la conservación de los alimentos, dado que, es donde se produce la refrigeración de los productos que se encuentren en el interior de la heladera. Es decir, el momento ideal para colocar los alimentos a conservar es durante la noche, debido a que, durante este período, los productos a enfriar alcanzarán su temperatura de conservación más rápidamente y se evitará la proliferación de bacterias en los mismos.

Por otro lado, también es una desventaja ya que durante el horario diurno, normalmente la puerta de la heladera se abre con mayor frecuencia que durante el período nocturno. Cada vez que esto ocurre, ingresa una cierta cantidad de aire a temperatura ambiente, la cual es superior a la del interior de la cámara refrigerada, elevando la temperatura interna y pudiendo quedar fuera de los límites admisibles para la conservación de alimentos y algunos medicamentos.

Se cree que es por estos motivos, que los trabajos mencionados en el Apéndice N° 2: “Estado de la técnica” se enfocan en la producción de hielo. Tener hielo en el interior de la heladera podría funcionar como un reservorio de frío para ser utilizado durante el día. Esto

modifica levemente el ciclo, ya que durante la noche se produce la adsorción y se genera el enfriamiento de la heladera, con la conjunta generación de hielo. Durante el día se produce la desorción sin la absorción de calor del interior de la heladera, pero con la mantención de la temperatura gracias al derretimiento del hielo que fue generado durante la noche, aprovechando de este modo su calor latente de fusión para adsorber el calor del interior de la cámara a refrigerar.

Como se puede ver en el Apéndice N° 2: “Estado de la técnica” este ciclo de refrigeración aún no se ha perfeccionado lo suficiente, como para lograr una producción de hielo elevada y estable, que permita mantener la temperatura en el interior de la heladera durante las horas diurnas. Por otro lado, se debe tener en cuenta que el sistema planteado es altamente dependiente de la radiación solar que incide sobre el sistema de captación y la temperatura exterior. Dichos factores son muy variables y prácticamente imposibles de predecir a largo plazo, dando lugar a la posibilidad de la pérdida de la cadena de frío, lo cual conlleva a que los alimentos y medicamentos no se conserven debidamente y por lo tanto deban ser descartados como aptos para el consumo humano.

Es por esto que se proponen tres grandes modificaciones a los circuitos que se plantean en las bibliografías mencionadas.

La primera consiste en la separación física del adsorbedor respecto al sistema de captación solar, es decir, se plantea la posibilidad de utilizar un colector solar como medio para aprovechar la radiación solar para el calentamiento de un fluido caloportador, en lugar de exponer el adsorbedor directamente a la radiación solar. Dicho colector deberá tener un tanque de almacenamiento que permita contener una cierta cantidad de dicho fluido a elevada temperatura, de este modo, se tendrá reserva de fluido caliente para utilizar como fuente de calor durante los períodos de menor radiación, como por ejemplo durante la noche.

Esto permitirá que el fluido caloportador (agua) sea el que transmita el calor proveniente de la radiación hacia el adsorbedor. Este fluido puede ser fácilmente movido por

---

una bomba de bajo caudal accionada por energía solar fotovoltaica, dando lugar a la posibilidad de la separación física mencionada anteriormente.

Como consecuencia de esta mejora, se logra que la heladera junto con el adsorbedor pueda estar en el interior del hogar, mientras que el sistema de captación solar se encuentre en el exterior, a la intemperie, en un lugar convenientemente ubicado, reduciendo el tamaño del equipo y mejorando considerablemente la estética del mismo.

La segunda modificación que se plantea, es la utilización de una resistencia eléctrica alimentada por energía solar fotovoltaica. Siendo una alternativa para mantener el suministro de calor requerido durante el proceso de desorción, en los momentos en los cuales el calor aportado por el fluido caloportador no sea suficiente. Esto puede ocurrir durante la noche, en los días nublados y en los días de invierno durante los cuales la radiación solar es menor.

Por último, se propone la utilización dos adsorbedores que trabajen de forma intermitente, es decir, mientras que en uno se realiza el proceso de adsorción, en el otro se produce la desorción. Ambos serán calentados en intercambiadores de calor de tubos. En el interior de estos se encontrará el carbón activado y el fluido caloportador, proveniente del colector solar, circulará por el exterior de los mismos. Un esquema del circuito es mostrado en la Fig. 14, en este no se muestran las resistencias eléctricas y la disposición mostrada, de los diferentes componentes, no necesariamente representa la ubicación final de los mismos.

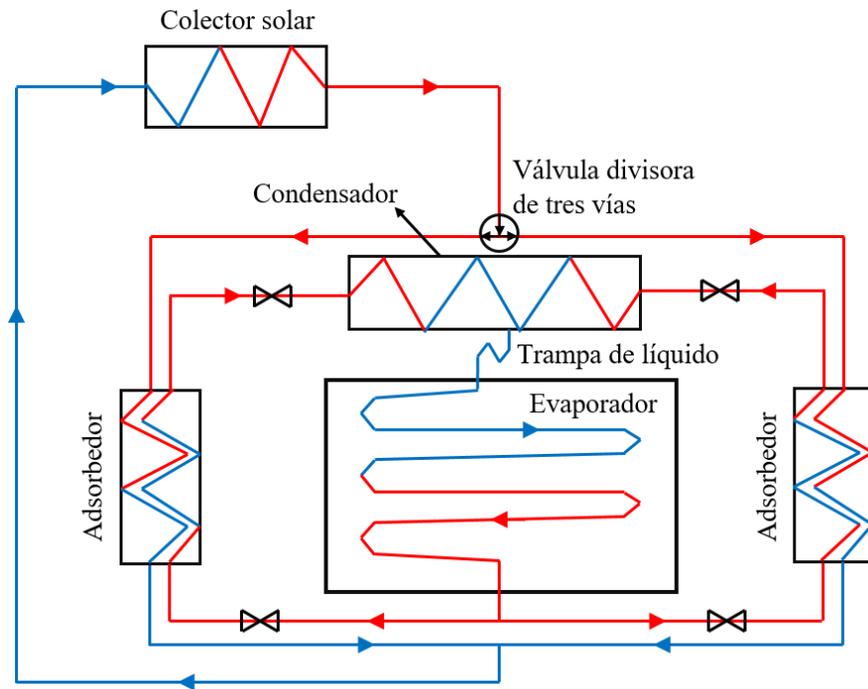


Figura 14: Esquema del circuito de refrigeración por adsorción planteado.

En el esquema, el color rojo simboliza fluido caliente, mientras que el azul, fluido frío. Las flechas indican el sentido de circulación de cada fluido. El H<sub>2</sub>O es el fluido caloportador que circula por el circuito externo, mientras que el etanol utilizado como FF circula por el circuito interior.

Para el circuito planteado, el fluido caloportador que es calentado en el colector solar gracias a la radiación solar, fluye por la cañería hasta la válvula divisora de tres vías, que es utilizada para que el fluido caloportador caliente entregue su calor a un adsorbedor u otro, enfriándose en el proceso y produciendo la desorción en adsorbedor que corresponda. El agua fría es recolectada por la parte inferior de ambos adsorbedores y redirigida al colector por medio de una tubería.

Al evaporador de la heladera ingresa etanol líquido proveniente del condensador que se encuentra por sobre ella. A medida que este desciende por el serpentín ubicado en la

---

cámara a refrigerar (heladera) se calienta y evapora. Los vapores son dirigidos al adsorbedor designado, que será aquel que no se encuentre en la etapa de desorción, donde será adsorbido por el carbón activado.

Por último, el etanol en forma de vapor desorbido, es dirigido al condensador; pasando luego, en estado líquido, al serpentín de la heladera reiniciando el ciclo. Para evitar que vapor de etanol llegue al serpentín se utiliza una trampa de vapor a la salida del condensador.

Las cuatro válvulas (antes y después de cada adsorbedor) junto con la que se encuentra a la salida del colector solar deben coordinarse cuidadosamente, de modo que se evite la mezcla de los fluidos o se pierda el sincronismo del circuito. Debido a que esto llevaría a que el ciclo pierda sus parámetros de funcionamiento y por lo tanto deje de funcionar correctamente, dando lugar a la posibilidad de perder las condiciones de conservación de la heladera y por lo tanto los alimentos en ella conservados.

Estas modificaciones deberían dar lugar a un sistema de funcionamiento mejorado, que permita la generación de frío tanto durante los horarios diurnos como los nocturnos, así como también temperaturas más estables. Además, al usar una resistencia eléctrica como fuente alternativa de calor, se da la posibilidad de utilizarla en combinación con una batería y paneles solares fotovoltaicos o conectada a la red eléctrica. El primer esquema (con baterías) es útil para hogares alejados y aislados, los cuales no tienen la posibilidad de acceso a la red eléctrica, mientras que el segundo esquema mencionado puede ser utilizado en cualquier hogar con acceso a la red eléctrica y sin necesidad de la utilización de baterías.

## **2.4 Descripción de los diferentes componentes de una heladera**

En esta sección se realizarán descripciones de los diferentes elementos y componentes que forman una heladera, para más adelante seleccionar aquellos que son adecuados para el proyecto planteado.

#### 2.4.a. Par de trabajo

Entiéndase por par de trabajo al conjunto adsorbente/adsorbato utilizado como adsorbedor y refrigerante respectivamente. Si bien son varias las sustancias que cumplen con las propiedades necesarias para el funcionamiento del ciclo, algunas de ellas son contaminantes y peligrosas para la salud del ser humano, como el metanol y otras son de difícil acceso, como es el caso de algunos tipos de carbones activados. No todos los pares de trabajo producen el mismo efecto frigorífico, requieren de diferentes temperaturas para su funcionamiento y algunos compuestos reaccionan con diferentes materiales.

Antes de iniciar la explicación de los diferentes compuestos que pueden ser utilizados como adsorbedores y adsorbatos (o refrigerantes), se considera prudente la explicación del fenómeno de la adsorción, para lograr comprender cuáles son los objetivos que se busca obtener con la selección de los compuestos, y cuáles son las características que deben presentar.

La adsorción es un fenómeno donde las partículas de adsorbato quedan atrapadas dentro de los poros del adsorbente; mientras mayor sea la superficie disponible del adsorbente mayor será la capacidad de adsorber y contener al adsorbato en su interior. Es un proceso muy utilizado como filtro de partículas de tamaño molecular para la producción de combustibles, filtrado de agua, entre otros. Es exotérmico y reversible. El proceso inverso es la desorción en el que se produce la limpieza del adsorbente, liberando las moléculas atrapadas en su interior este proceso es endotérmico.

El fenómeno de adsorción puede producirse de dos formas distintas, una es la fisisorción o adsorción física, mientras que la otra es la quimisorción o adsorción química. En la primera, la molécula de adsorbato no sufre cambios en su estructura y predominan las fuerzas de Van der Waals; mientras que, en la segunda, las moléculas del adsorbente y del adsorbato se mantienen unidas por fuerzas químicas que dependen de ambas sustancias, por lo que se requieren mayores temperaturas que en la adsorción física y también es más lenta

---

(Gonzales Martín, 2006). Para obtener una adsorción eficiente, el tamaño de las moléculas del adsorbato debe ser compatible con el tamaño de los poros del adsorbente.

### *Adsorbentes*

Estas sustancias tienen la particularidad de poseer gran cantidad de poros, lo cual les confiere una gran superficie de contacto, produciendo un incremento en la velocidad de adsorción, ya que se encuentra relacionada con la superficie de contacto entre el adsorbente y el adsorbato. Los adsorbentes pueden ser convencionales o no convencionales.

Dentro de los adsorbentes convencionales se puede encontrar, la alúmina activada, gel de sílice, zeolitas, y carbón activado. Estos requieren un proceso de activación para poder ser utilizados como tales, además de requerir un proceso de regeneración para su reutilización. La adsorción en ellos es principalmente física.

Dentro de los adsorbentes no convencionales se puede mencionar, la biomasa, materiales de desecho agroindustriales y materiales de desechos de la industria alimentaria. Dado que aún están en vías de desarrollo no se entrará en mayores detalles sobre los mismos (Valladares C. et al., 2016).

Alúmina activada: También conocido como óxido de aluminio ( $Al_2O_3$ ). Es un sólido de color blanco e inodoro, cuyo peso molecular es de 101,96 g/mol. Es estable a temperatura ambiente pero debe evitarse el calor excesivo, reacciona con compuestos clorados y etileno. No está calificado como un producto peligroso para el medio ambiente (Avantor Performance Materials, 2011). Es obtenida de la explotación de yacimientos a cielo abierto sin el uso de explosivos, es decir, se extrae mediante excavación. Es utilizada como agente desecante, para tratamiento de agua en la remoción de moléculas de arsénico, flúor, cobre y plomo; y también como catalizador en operaciones de refinación. En la Fig. 15, se puede observar a dicho componente.



Figura 15: Óxido de aluminio usado como adsorbente.

Gel de sílice: Es un sólido que puede obtenerse en diferentes colores, inodoro, cuya densidad varía entre 400 y 900 kg/m<sup>3</sup>. Bajo condiciones ambientales normales, no es reactivo, es químicamente estable y no reacciona peligrosamente con otra sustancia. No se clasifica como peligroso para el medioambiente acuoso (ROTH - N° CE: 215-475-1, 2015). Se obtiene de la neutralización del ácido sulfúrico con silicato de sodio, donde en un reactor agitado se mezclan los componentes a una determinada temperatura; al finalizar la etapa de reacción, se deja reposar para posteriormente retirar las sales formadas y secar la solución obtenida (Báez Q. et al., 2005). Muy utilizado como desecante para controlar la humedad local y evitar el deterioro de diferentes elementos sensibles a la misma. En la Fig. 16, se puede observar la forma comercial en la cual comúnmente se obtiene y utiliza este componente.



Figura 16: Gel de sílice comercial.

Zeolita: Es un sólido de color amarillento, de olor característico, cuya densidad varía entre 2200 y 2400 kg/m<sup>3</sup>. Debe tenerse cuidado durante su almacenaje, debido a que la acumulación de polvo aumenta la posibilidad de explosión. Presenta una toxicidad aguda para el ser humano, sin embargo, no es tóxico para el medioambiente acuoso (Turbidex, 2013). La obtención de este material se realiza mediante soluciones acuosas saturadas de composición apropiada, al variar la composición o las condiciones de la operación de obtención, se pueden obtener diferentes tipos de zeolitas; se conocen más de 10.000 patentes sobre la obtención de la misma (Morante F. et al., 2005). Se puede utilizar como acondicionador de suelo en la agricultura, para ablandar aguas duras residuales, alimentar ganado permitiendo que estos engorden más y como catalizador en la industria química, principalmente en la petroquímica. En la Fig. 17, se puede observar el mineral de Zeolita.



Figura 17: Mineral de Zeolita.

Carbón activado: Es un sólido de color negro, inodoro, cuya densidad es de  $1700 \text{ kg/m}^3$ , es autocalentable, con riesgo de ignición y en polvo puede ser explosivo. Bajo condiciones ambientales normales es estable, no se considera peligroso para el medio ambiente acuoso (ROTH, N° CE: 931-334-3, 2016). Se puede obtener de diferentes fuentes, tales como combustibles fósiles (antracita, lignito o turba) o desde la madera; el requisito fundamental es que el compuesto primario tenga alto porcentaje de carbono.

Para obtener el carbón activado a partir de estos compuestos, se deben realizar dos procesos. El primero es el proceso de carbonización, que consiste en transformar al compuesto en carbón, el segundo es la activación del mismo, realizada en una atmósfera carente de oxígeno, pero con gases oxidantes a alta temperatura para formar los poros. En la Fig. 18a, se pueden observar los poros del carbón activado. Se suele utilizar para absorber contaminantes orgánicos, sustancias activas de azul de metileno, compuestos halogenados, ozono residual, sólidos pesados como el plomo y mercurio, gases, materia disuelta en agua y algas (Pino F., 2011). En la Fig. 18b, se puede observar una muestra de carbón activado.

También puede utilizarse para el tratamiento de agua o para la adsorción de gases. La principal diferencia entre estos usos, es que el carbón activado para adsorber gases posee poros más pequeños y puede ser obtenido de cáscara de nuez, carbón y hulla, mientras que

el requerido para el tratamiento de agua tiene poros más grandes y para su obtención, se utilizan materiales menos densos.

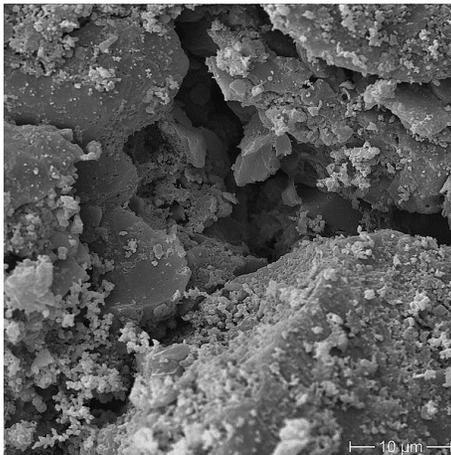


Figura 18a: Poros del carbón activado.



Figura 18b: Muestra de carbón activado.

### *Adsorbatos o refrigerantes*

A fin de producir el efecto frigorífico deseado, el fluido refrigerante debe adquirir el calor del interior del refrigerador y transportarlo hasta el adsorbedor, donde es liberado. Dentro de las principales características que debe cumplir un buen refrigerante, se tiene (Porzia, 1956):

- ✓ Temperatura de ebullición: A presión atmosférica debe ser lo más baja posible. Determina la temperatura en el interior del refrigerador.
- ✓ Presión de condensación: A temperatura atmosférica, debe ser lo más baja posible.
- ✓ Calor latente de evaporación: Debe ser lo más alto posible.
- ✓ No debe corroer los materiales, ni atacar los lubricantes de la instalación.

- 
- ✓ No debe ser inflamable ni explosivo.
  - ✓ Debe ser inofensivo a la salud.
  - ✓ Las pérdidas deben poder localizarse fácilmente.
  - ✓ Debe tener una composición química estable en las condiciones de operación.

Para el sistema de refrigeración seleccionado, además de estas características generales a todos los refrigerantes, también se añade que debe tener moléculas de pequeño tamaño, de modo que facilite la adsorción. Dentro de los refrigerantes más comunes, se encuentran: el agua, el amoníaco y el metanol, y para este caso se añade el etanol como alternativa al metanol.

Agua (H<sub>2</sub>O): Es un elemento común en la naturaleza, abundante y de uso diario, incoloro e inodoro. A presión atmosférica, se congela a 0 °C, ebulle a 100 °C y su densidad a temperatura ambiente es de 1000 kg/m<sup>3</sup>. No es contaminante ni perjudicial para la salud (ROTH, N° CE: 231-791-2, 2018).

Amoníaco (NH<sub>3</sub>): Fue muy utilizado en los sistemas de refrigeración más antiguos, antes de la aparición de los refrigerantes clorofluorocarbonados, como el Freón R12. Puede ser incoloro o amarillo claro, de olor penetrante. A presión atmosférica, se congela a -87 °C, ebulle a 27 °C; a temperatura ambiente presenta una densidad de 890 kg/m<sup>3</sup>. Es muy tóxico para sistemas acuáticos, no se degrada fácilmente, puede producir efectos adversos en la salud si se expone la piel, los ojos o se respira sus vapores, reacciona con diferentes metales y lubricantes (ROTH, N° CE: 215-647-6, 2019). Se puede obtener de forma natural por bacterias que degradan materia orgánica, o de forma industrial mediante la combinación de nitrógeno e hidrógeno, ambos en estado gaseoso, este proceso es lento, requiere gran aporte de energía calórica y es de bajo rendimiento (inferior al 40 %) (Mongalez, 2010). Se utiliza como fertilizante, refrigerante, producto de limpieza y en alimentos.

---

Metanol (CH<sub>4</sub>O): Es incoloro. A presión atmosférica, se congela a -98 °C, ebulle a 65 °C y su densidad a temperatura ambiente es de 790 kg/m<sup>3</sup>. En estado puro, no es explosivo, pero, si su vapor se mezcla con aire, se forma una combinación explosiva. Es muy comburente. Con pequeñas cantidades del compuesto, presenta una contaminación acuática aguda en 96 h y crónica a los 90 días. Para los seres humanos, presenta una toxicidad aguda con una concentración de 143 mg/kg e ingestión vía oral (ROTH, N° CE: 200-659-6, 2018). En un inicio, se obtenía de la destilación destructiva de astillas de madera, donde se producía la destilación en ausencia de aire y a 400 °C aproximadamente. En la actualidad se obtiene de un proceso catalítico utilizando monóxido de carbono e hidrógeno con altas temperaturas y presiones (hasta 400 °C y 300 atm). Se utiliza como producto químico de laboratorio, en combustibles para vehículos de combustión interna como biodiésel, en el tratamiento de aguas residuales y celdas de combustible (Curcio, Muller, & Podepiora, 2014).

Etanol (C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>O): Es incoloro. Al mezclarse los vapores con el aire, se vuelve explosivo. A presión atmosférica se congela a -114 °C, ebulle a 78 °C, a temperatura ambiente su densidad es de 790 kg/m<sup>3</sup>. No se clasifica como tóxico agudo para el ser humano, sí para el medioambiente acuático en caso de poseer una concentración superior a los 8,149 mg/l, presenta una velocidad de degradación del 94 % (ROTH, N° CE: 200-578-6, 2018). Se puede obtener de diferentes compuestos orgánicos como son la caña de azúcar y el maíz. El proceso de obtención varía levemente de una materia prima a otra. Sin embargo, básicamente consiste en: la preparación, donde se lava, muele y tritura la materia prima con agua caliente y se retira el bagazo; la fermentación, donde se obtiene etanol y dióxido de carbono en estado gaseoso. A continuación, se separan y destilan estos gases; por último, se procede al tratamiento de efluentes producto del proceso de obtención (Cardona, Sánchez, Montoya, & Quintero, 2005). Sus usos son muy variados ya que puede utilizarse en productos cosméticos, como disolvente de pinturas y barnices, para la elaboración de bebidas alcohólicas y como combustible (chemicalsafetyfacts, 2019).

#### 2.4.b. Aislación

La aislación es un elemento que reduce algunos de los efectos indeseables causados por diferentes perturbaciones, tal como las vibrátiles, acústicas y térmicas. Para este proyecto, solamente interesan las aislaciones térmicas, dado que es indeseable que el calor del exterior ingrese al interior del refrigerador, a través de las paredes.

La selección del aislante es en un elemento clave que ayudará a mejorar o empeorar la calidad del producto (la heladera) y su eficiencia. Si se dimensiona correctamente, el calor proveniente del exterior, que se filtre a través de las paredes del refrigerador será mínimo obteniendo una mejora en la eficiencia. Sin embargo, en caso de que las dimensiones o calidad del aislante no sean las correctas, el equipo funcionará mayor cantidad de horas que las estipuladas, y la temperatura en el interior de la heladera será muy variable (Amigo Martín, 2000). Dentro de las principales características que debe poseer el material aislante se encuentran:

✓ Baja conductividad térmica: este parámetro determina la cantidad de calor que atraviesa la superficie del aislante, en concordancia con la diferencia de temperatura entre las caras del mismo. Debe ser lo más bajo posible, para evitar que el calor lo atraviese y se pueda conservar durante el mayor tiempo posible la temperatura en el interior de la heladera (Palomo, 2017).

✓ Debe ser poroso: La mayoría de los buenos aislantes térmicos poseen poros en su interior, llenos de aire o con un gas inerte en estado de reposo; esto imposibilita la transferencia de calor a través del material, convirtiéndolo en un buen aislante (Palomo, 2017).

✓ No debe ser higroscópico: los cuerpos higroscópicos son aquellos que permiten que el vapor de agua y la humedad se depositen en el interior del cuerpo. Esto es desventajoso ya que, si ocurre, los poros del aislante se llenarán de agua la cual es buena

conductora del calor y, por lo tanto, el material pierde su capacidad de aislamiento. Una forma de evitar que el agua afecte al aislante consiste en separarlo del exterior mediante una cubierta plástica, tal como se hace en las heladeras comerciales (Palomo, 2017). A modo de referencia, la conductividad térmica del hielo es de  $2 \text{ kcal} / (\text{h} \cdot \text{m} \cdot \text{k})$ , para el agua es de  $0,5 \text{ kcal} / (\text{h} \cdot \text{m} \cdot \text{k})$ , para el vapor de agua es de  $0,15$  y para el aire seco es de  $0.02 \text{ kcal} / (\text{h} \cdot \text{m} \cdot \text{k})$ , el R-11 posee conductividad térmica es casi 3 veces menor que la del aire seco. Al analizar estos valores se puede notar que la humedad dentro de los poros del aislante puede ser muy perjudicial para la capacidad de aislamiento del mismo (Shawyer, M, et al., 2005). Además de esto debe tenerse en cuenta que el agua puede deteriorar el aislante, acortando su vida útil.

Estas propiedades implícitamente indican que la densidad del aislante debe ser lo más baja posible, contribuyendo a reducir el peso de la heladera y, por lo tanto, se requerirá materiales menos reforzados y costosos (Amigo Martín, 2000).

✓ No debe contaminar los alimentos: Debido a que en el interior de la heladera se encontrarán almacenados alimentos de consumo, se debe evitar que se contaminen con cualquier componente que pueda encontrarse en la heladera. Esto debe ser constante a lo largo de toda la vida útil del producto, es decir, bajo ninguna situación debe emitir productos o subproductos que puedan llegar a contaminar a los alimentos. La mejor forma de lograrlo es mediante la utilización de productos no contaminantes en la construcción de la heladera. Además, se debe generar condiciones desfavorables para la acumulación y vida de insectos, roedores y parásitos, ya que estos pueden no solo dañar el aislante, sino que también los alimentos contenidos en el interior de la heladera (Amigo Martín, 2000).

✓ Comportamiento frente al fuego: El aislante debe ser tal que disminuya los peligros potenciales de incendio, reduzca la propagación del fuego, y en caso de exponerse a la llama, no debe producir gases tóxicos o humo denso. En las condiciones de funcionamiento normales para una heladera es poco probable que se produzca un incendio, sin embargo, en el ciclo seleccionado en este proyecto, se tienen zonas de alta temperatura (en los adsorbedores) que además se encuentran junto a resistencias eléctricas, lo cual puede generar

---

riesgos de incendio. Una forma de reducir estos riesgos es mediante la protección del aislante por medio de pinturas y capas protectoras como son los plásticos que recubren al equipo, en conjunto con la correcta aislación de las partes que se encuentran a alta temperatura (Amigo Martín, 2000).

Los aislantes se pueden clasificar de diversas maneras, una de ellas es de acuerdo a su origen, el cual puede ser:

- ✓ Natural: Paja, madera y corcho
- ✓ Mineral: Fibra de vidrio, lana de roca, arcilla expandida, entre otros
- ✓ Sintético: Espuma de PVC, espuma de poliestireno, espuma de poliuretano, perlita expandida

#### Aislantes naturales

Paja: Se la utilizaba como aislación térmica en edificios, al mezclarla con arcilla. Tiene grandes desventajas tales como su alta higroscopicidad, continuo deterioro y baja vida útil. Crea un ambiente adecuado para los insectos y roedores lo cual lo hace muy inadecuado para aplicarse en heladeras (Amigo Martín, 2000). En la Fig. 19, se puede observar dicho aislante.



Figura 19: Aislante natural – Paja.

Madera: Se comercializa como tableros de partículas, los cuales tienen la desventaja de ser muy pesados de 250 a más de 750 kg/m<sup>3</sup>, pero de baja conductividad térmica (0.008 W/m·K para un tablero de 600 kg/m<sup>3</sup>). Son muy higroscópicos y se deforman con la humedad, además de ser un medio propicio para el crecimiento de insectos. Debido a estas desventajas, se desarrollaron los tableros de viruta aglomerados con cemento, los cuales, si bien tienen mayor resistencia al fuego y no se deterioran con la humedad, su conductividad térmica es mayor que los tableros de partículas y su comportamiento frente a la humedad es muy variable. En la Fig. 20, se puede observar el techo de un hogar aislado con madera (Amigo Martín, 2000).



Figura 20: Aislante natural – Madera.

Corcho: Se obtiene de la planta alcornoque (*Quercus suber* L.), está formado por células muertas de forma hexagonal prismática llenas de aire y nitrógeno. Su escasez ha producido que el precio sea muy elevado comparado con otros aislantes. Puede obtenerse en forma de planchas, expandido o en forma granular. El corcho aglomerado expandido es el de mayor interés para la aislación térmica, que se obtiene mediante la granulación del corcho, para luego ser sometido a un tratamiento de presión con vapor de agua a temperaturas superiores a los 300 °C, mediante el cual los granos se expanden y liberan su resina natural que actúa como aglutinante. En el proceso, los granos toman un color tostado oscuro, casi negro; es por esta característica visual que se lo conoce como corcho expandido negro. Su densidad varía entre 86 y 250 kg/m<sup>3</sup>, mientras que su conductividad térmica varía entre 0,043 y 0,40 W/m·K). Es muy ligero y no se humedece, poco combustible y los parásitos no lo atacan gravemente, no se pudre y es prácticamente inodoro (Amigo Martín, 2000). En la Fig. 21, se muestra una placa de corcho.



Figura 21: Aislante natural – Corcho.

#### Aislantes minerales

Fibra de vidrio: Se obtiene mediante la combinación, a alta temperatura, de un vitrificante (arena silíceo,  $\text{SiCO}_3$ ), un fundente que ayuda a reducir la temperatura de fusión del vitrificante (carbonato sódico o sulfato sódico potásico), y uno o varios estabilizantes que ayudan a mejorar la resistencia a la humedad y reducir su viscosidad (carbonato cálcico y carbonato magnésico). Estos materiales se mezclan y funden en un horno a una temperatura entre 1400 y 1700 °C; al obtener la mezcla correcta y densidad adecuada se realiza el fibrado, que consiste en obtener hilos finos del material. Esto se puede lograr mediante centrifugado o extrusión, a medida que estos hilos se enfrían, se impregnan con una resina termoendurecible (metilsilicona) para darle flexibilidad y poder aglutinarlos. Las fibras de vidrio desordenadas crean cámaras que retienen el aire o diferentes gases, lo cual le otorga su capacidad de aislante. Posee muchas ventajas tales como alta resistencia al fuego (incombustible, no propaga el fuego), baja conductividad térmica (0,03 y 0,04 W/m·K), alta resistencia a la contaminación microbiológica (no sirve como alimento para los roedores ni como sustrato para el desarrollo de microorganismos), altamente resistente al ataque de sustancias químicas (exceptuando al ácido fluorhídrico), es imputrescible e inodoro, pero altamente higroscópico. Su densidad varía entre 10 y 144 kg/m<sup>3</sup>, comúnmente se

comercializa en forma de lana o barra, fieltro o manta, paneles o planchas y coquillas (Amigo Martín, 2000) (Shawyer, M, et al., 2005). En la Fig. 22, se puede observar la superficie del aislante mencionado.



Figura 22: Aislante mineral – Fibra de vidrio.

Lana de roca: Se obtiene a partir de rocas basálticas (roca volcánica rica en silicatos de magnesio, silicatos de hierro y en sílice), rocas filonianas compuestas por plagioclasas (silicatos aluminicos sódicos junto con olivino y augita). La fabricación del aislante es análoga a la lana de vidrio. Su conductividad térmica se encuentra entre 0,038 y 0,042 W/m·K. No sirve como alimento para roedores, insectos, bacterias u hongos, no es higroscópica; es incombustible, inodora, imputrescible. Es muy utilizada para el aislamiento de altas temperaturas. Se comercializa en forma de borra, manta, panel y coquilla. En la Fig. 23, se muestra un paño del aislante mencionado (Amigo Martín, 2000).



Figura 23: Aislante mineral – Lana de roca.

Arcilla expandida: Las arcillas son silicatos aluminicos hidratados e impurificados con minerales. Se calientan en un horno giratorio a 120 °C, logrando su expansión y que tomen forma esférica de entre 5 y 16 mm de diámetro, en cuyo interior se encuentran muchos poros llenos de aire. Tienen una conductividad térmica de entre 0,08 y 0,11 W/m·K dependiendo de la densidad, la cual oscila entre 300 y 450 kg/m<sup>3</sup>, es imputrescible y no es atacado por microorganismos ni roedores, así como tampoco por productos químicos, es inodora y muy resistente al fuego, sin embargo, es altamente higroscópica. Comúnmente se utiliza en la construcción (Amigo Martín, 2000). En la Fig. 24, se muestran granos de arcilla expandida.



Figura 24: Aislante mineral – Arcilla expandida.

#### Aislantes sintéticos

Espuma de policloruro de vinilo (PVC): Para su obtención, se parte del tratamiento del acetileno con ácido clorhídrico, lo cual da como producto un monómero (cloruro de vinilo), que al ser expuesto a una luz se polimeriza formando el PVC. Para obtener la espuma se mezcla el PVC en forma de polvo con un agente porógeno, que al calentarse libera gases que quedan atrapados en el PVC dándole estructura esponjosa, estos gases son los que llenan los poros. También se mezcla con plastificantes que contribuyen a aumentar su flexibilidad y otros aditivos como colorantes. El calor necesario para el proceso proviene del vapor de agua inyectado a alta temperatura. Su conductividad térmica es de  $0,035 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ , la densidad varía entre  $100$  y  $200 \text{ kg/m}^3$ , es impermeable al agua e incombustible. Es muy costoso. En la Fig. 25, se muestra el aislante mencionado.



Figura 25: Aislante sintético – Espuma de PVC.

Poliestireno expandido: Comúnmente es conocido como telgopor. Su formación parte del monómero conocido como vinilbenceno. Se puede obtener por medio de expansión o de extrusión. Se mezcla el poliestireno con un gas a presión (pentano), anteriormente se utilizaban CFC y HCFC) como porógeno. El calor necesario para la expansión del material se obtiene de vapor de agua inyectado a la mezcla. Este proceso tiene la ventaja de que los poros en el interior del material no se encuentran conectados entre sí, lo cual reduce su conductividad térmica y proporciona una mejor homogeneidad en el material. Es inflamable y reaccionan con algunos disolventes. La densidad varía de 10 a 35 kg/m<sup>3</sup>, mientras que la resistividad térmica entre 0,033 y 0,058 W/m·K, es higroscópico (Palomo, 2017) (Amigo Martín, 2000). En el caso de la espuma de poliestireno extruida se obtienen mejores propiedades mecánicas y mayor vida útil (Amigo Martín, 2000). En la Fig. 26, se muestran un fragmento de poliestileno expandido.



Figura 26: Aislante sintético – Poliestireno expandido.

Espuma de poliuretano: Se forma por un proceso llamado poliadición, en el cual se requieren dos grupos de monómeros, uno de ellos es el isocianato y el otro el dialcohol. Durante la reacción química se libera  $\text{CO}_2$ , que actúa como porógeno, y queda atrapado en la masa de poliuretano generando los poros necesarios para que sea un buen aislante. Se comercializan como planchas rígidas o dos compuestos separados que al mezclarse forman la espuma, este formato es apto para realizar la espuma in situ. Tiene baja higroscopicidad y densidad, la cual varía entre 30 y 40  $\text{kg/m}^3$ , su conductividad térmica varía entre 0,023 y 0,040  $\text{W/m}\cdot\text{K}$  dependiendo de la densidad. Como se mencionó anteriormente el material aislante debe ser inflamable, por lo tanto, pueden agregarse agentes ignífugos en la mezcla de los compuestos, que le otorgan dicha propiedad. Aun así, al exponerse a una llama pequeña o una fuente de calor no muy grande, no se incendiará, pero si lo hará frente a altas temperaturas con o sin presencia de una flama. Las espumas elaboradas con isocianurato son las más resistentes a los efectos adversos de las altas temperaturas, llegando a resistir entre 10 y 25 minutos una llama de  $1200\text{ }^\circ\text{C}$ , con una densidad promedio de  $35\text{ kg/m}^3$ . Por lo general, es sensible al ataque de ácidos, bases fuertes y rayos ultravioletas (Amigo Martín, 2000) (Shawyer, M, et al. 2005). En la Fig. 27, se muestra un bloque de espuma de poliuretano.



Figura 27: Aislante sintético – Espuma de poliuretano.

Perlita expandida: Es una roca volcánica con un 2 a 5 % de contenido de agua, se compone de sílice, aluminio e impurezas, las cuales deben ser eliminadas ya que son higroscópicas, por lo tanto, la pureza del material es muy influyente en la calidad del producto final, otro factor determinante es el origen de la perlita y la temperatura a la que se realiza la expansión de las misma, ésta puede variar entre 800 y 1200 °C. Su densidad es de 130 kg/m<sup>3</sup> y posee una conductividad térmica de 0.046 W/m·k (Shawyer, M, et al. 2005). En la Fig. 28, se muestran los granos de perlita expandida y su tamaño respecto al de una moneda de dólar.



Figura 28: Aislante sintético – Perlita expandida.

---

#### 2.4.c. Intercambiadores de calor

En este punto, se realizará una breve explicación de los diferentes intercambiadores que se pueden encontrar en la práctica, así como también cuál fue la evolución de los mismos, indicando algunas de las ventajas y desventajas pertenecientes a cada uno.

Los intercambiadores de calor son utilizados, en el circuito de refrigeración planteado anteriormente, como evaporador en el interior de la heladera, como sistema de calentamiento de los adsorbedores y como condensador del vapor de refrigerante o adsorbato a la salida del adsorbedor. Como se puede notar, son ampliamente utilizados y en cada una de estas aplicaciones se requerirán características diferentes, ya que su finalidad es distinta. En este punto solamente se realiza una breve descripción de los mismos y a su debido tiempo se fundamentará la selección del intercambiador adecuado para cada necesidad.

Tal como lo indica su nombre, son equipos que tienen por finalidad transmitir calor de un fluido a otro. Pueden ser de aire-aire, aire-líquido o líquido-líquido, encontrándose en las formas constructivas más diversas, diseñadas para adaptarse a los diferentes fluidos, capacidades, rendimientos e instalaciones. Los materiales utilizados en su construcción también son muy variados, sin embargo, los más comunes son aluminio, cobre, hierro y fundición. En estos equipos, un fluido se enfriará al ceder su calor, este es el fluido primario, caloportador o fuente de calor, mientras que otro se calentará al absorber el calor cedido por el fluido primario, este es el fluido secundario o sumidero.

Dentro de sus principales características se puede mencionar que deben ser lo más pequeños posibles, con la mayor capacidad de transferencia de calor, deben ser estancos, de fácil y bajo mantenimiento. Pueden utilizarse como evaporadores o condensadores (Amigo Martín, 2000).

La utilización de estos equipos es muy amplia debido a la gran variedad de procesos que requieren mantener una temperatura dentro de valores acotados, ya sea superior a la

---

ambiente, como es el caso de la elaboración del dulce de leche o la fermentación de la cerveza; o a una temperatura menor a la ambiente, tal como en las cámaras para la conservación de alimentos (heladeras); enfriamiento y conservación de lácteos, etc. Se puede dividir a los intercambiadores en dos grandes grupos, los de tubos y los de placas.

### Intercambiadores de tubos

Fueron los primeros en desarrollarse. Consisten en un tubo en cuyo interior circula un fluido y por el exterior otro. La pared del tubo tiene la función de evitar el contacto de los fluidos y por lo tanto su mezcla. Si bien son simples, en muchos casos se requiere una gran longitud para obtener el intercambio de calor deseado. Posteriormente, evolucionaron a los intercambiadores en zig-zag, los cuales consisten en tubos lisos unidos en sus extremos por codos, formando un zig-zag. Pese a su mejora frente a los de tubos lisos, aún conservan un gran tamaño. Antiguamente eran colgados en las paredes y techos de las cámaras frigoríficas, actualmente se encuentran en desuso (Amigo Martín, 2000).

Luego se crearon los intercambiadores de haces tubulares, que consisten en tubos rectos y paralelos, unidos en sus extremos por soldadura a tubos más gruesos denominados colectores; por lo general trabajan sumergidos en el fluido a enfriar. Dentro de estos, se pueden mencionar los intercambiadores de tipo serpentín, similares a los intercambiadores en zig-zag, con la diferencia de que el tubo forma un helicoide a fin de evitar los codos, eliminando la desventaja de pérdida de carga en cada uno de ellos. El tubo del intercambiador puede ubicarse en contacto con el fluido exterior o separado por una camisa (Amigo Martín, 2000). Este tipo de intercambiador intercambiador se puede observar en la Fig. 29.



Figura 29: Intercambiador de calor de tubos helicoidal.

Debido a la gran longitud de tubo que se requiere para obtener un buen intercambio de calor con los intercambiadores de tubo, su costo de los mismos es muy elevado. Una forma de reducirlo costo consiste en unir a los tubos una pequeña lámina de metal o aletas, de modo que se garantice el mejor contacto posible. Esta unión puede ser por soldadura, embutido o cualquier otro método. La separación entre las aletas puede ser entre 3 y 18 mm dependiendo del fabricante y la aplicación.

Las aletas incrementan enormemente la superficie de transmisión de calor, y por lo tanto, la eficiencia de los intercambiadores. Además, posibilita la eficiente utilización de forzadores de aire y envoltorios con soportes adecuados para los mismos, facilitando la instalación, permitiendo que puedan estar a la intemperie y reduciendo el mantenimiento. Los equipos que utilizan estas aletas son frecuentes en aires acondicionados, cámaras frigoríficas y heladeras (Amigo Martín, 2000). En la Fig. 30, se puede visualizar un intercambiador de calor de tubos aletados.



Figura 30: Intercambiador de calor de tubos con aletas.

A continuación, se desarrollaron los intercambiadores de doble tubo, los cuales consisten en dos tubos de diferente tamaño centrados coaxialmente. En ellos un fluido circula por el interior del tubo de menor diámetro, mientras que el otro, lo hace por el espacio que existe entre el exterior del tubo más pequeño y el interior del más grande.

Los fluidos pueden circular en el mismo sentido, a contracorriente o en corrientes cruzadas (a  $90^\circ$ ). Las formas que pueden tomar estos tubos es muy variada de acuerdo a la aplicación. Un artilugio muy útil para mejorar la transmisión de calor consiste en utilizar tubos corrugados, los cuales producen turbulencia en el fluido haciéndolo cambiar de dirección constantemente, generando de este modo las corrientes cruzadas.

También se pueden encontrar intercambiadores de triple tubo, que están formados por tres tubos de diferente diámetro centrados coaxialmente, donde un fluido circula por el tubo de mediano tamaño y el otro fluido por los tubos de mayor y menor diámetro (Amigo Martín, 2000). En la Fig. 31, se puede observar un intercambiador de doble tubo de paso 3, este concepto se explicará más adelante.

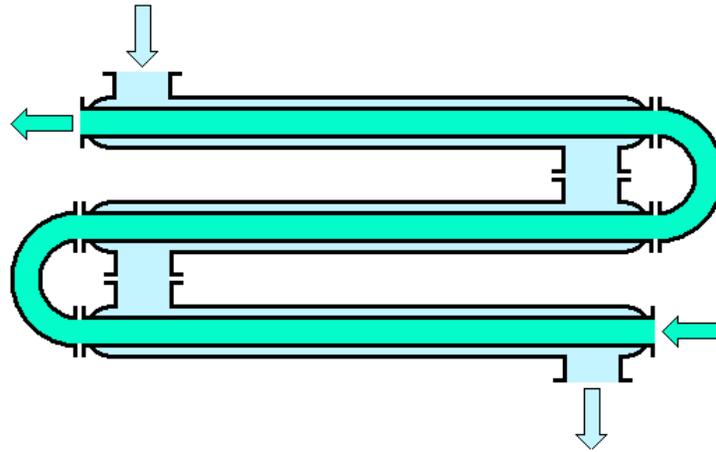


Figura 31: Intercambiador de calor de doble tubo, de paso 3.

Por último, dentro de los intercambiadores de tubo se encuentran los intercambiadores de casco y tubo o multitubulares, en los cuales se tiene una carcasa exterior, en cuyo interior se ubican los tubos y en los extremos dos bridas, tapas o placas tubulares para sujetar y conectar los tubos. Estas se encuentran agujereadas determinando la disposición de los tubos, que son soldados o mandrilados sobre las tapas para asegurar la estanqueidad.

Debido a que por el interior de los tubos circula un fluido y por el interior de la carcasa otro, éstos nunca entran en contacto. En el interior de la carcasa, se colocan placas deflectoras con la finalidad de obligar al fluido, que por allí circula, a cambiar su dirección generando corrientes cruzadas, y también para ayudar a mantener los tubos en la disposición preestablecida, dichas placas se colocan a intervalos regulares. La disposición de los tubos puede ser de lo más diversa por ej. triangular, cuadrada, rómbica, etc. La posición de los mismos dependerá de la utilización, mantenimiento y fluidos a utilizar. Si bien estos son de menor eficiencia que los de doble tubo, son más económicos (Amigo Martín, 2000). En la Fig. 32, se puede observar un esquema de dichos intercambiadores.

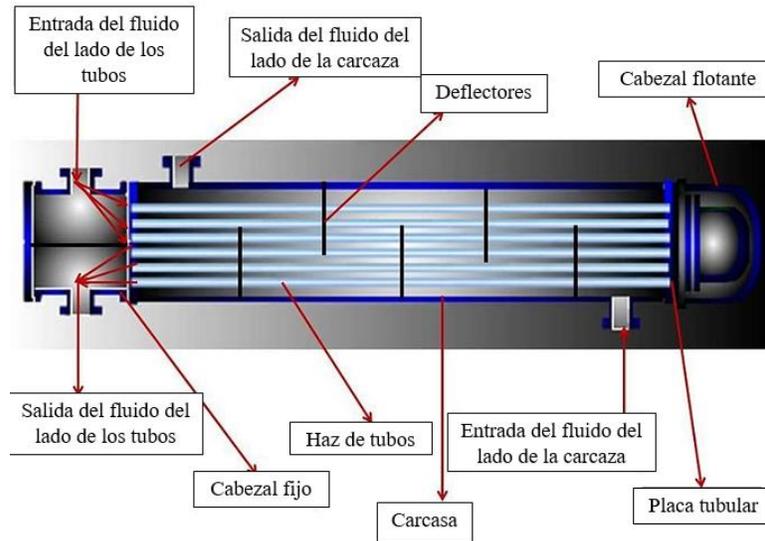


Figura 32: Intercambiador de calor de casco y tubo.

Los intercambiadores de doble tubo y los multitubulares admiten el intercambio de calor líquido-líquido.

Se denomina paso de un intercambiador al número de sentidos en los que los fluidos recorren el intercambiador en forma sucesiva. La Fig. 31, muestra un intercambiador de calor de tubos de paso 3.

### Intercambiadores de placas

Al inicio de su aparición, a las placas se les realizaba una canaladura para aumentar su superficie. Posteriormente, se unieron dos placas con canales lo cual formaba el circuito en su interior, estas placas eran unidas por medio de soldadura. Estos intercambiadores se sumergen en el fluido con el cual se debe intercambiar calor, siendo principalmente utilizadas para líquidos, heladeras domésticas y en algunos vehículos para el transporte de productos refrigerados o congelados.

---

Pueden ser utilizados como evaporadores o calefactores, y su forma puede ser muy variada para adaptarse a las necesidades de la instalación. En caso de necesitar mayor superficie, simplemente se pueden apilar una cierta cantidad de placas, y sus bordes estarán en contacto con el fluido a tratar térmicamente.

Los intercambiadores de placas con selladores consisten en un paquete de chapas corrugadas que se unen para formar el intercambiador. Estas se encuentran rodeadas por una junta de estanqueidad, la cual evita la fuga de los líquidos que intervienen en el circuito. La función del corrugado es análoga a la de los tubos.

Las placas poseen cuatro orificios en sus esquinas por donde circulan los fluidos primarios y secundarios. Dicho sistema tiene la ventaja de que cada placa se encuentra en contacto con los dos fluidos, una cara de la placa con cada fluido. Los materiales utilizados deben ser compatibles entre sí y con los fluidos. La separación entre las placas puede ser de 5 o 6 mm.

Estos intercambiadores tienen muchas ventajas, tales como su gran capacidad de transmisión de calor con tamaño reducido, bajas pérdidas, fácil mantenimiento y ampliación; aunque no se puede utilizar, en ellos, un fluido con sólidos en suspensión. De acuerdo al fluido, presión de trabajo y temperatura, pueden ser muy peligrosos (Amigo Martín, 2000). En la Fig. 33, se muestran las placas utilizadas en un intercambiador de placas con junta de estanqueidad.



Figura 33: Intercambiador de calor de placas con juntas de estanqueidad.

Posteriormente los intercambiadores de placas con junta de estanqueidad evolucionaron a los intercambiadores de placas soldadas, los cuales eliminan la junta de estanqueidad con los inconvenientes que presenta, realizando la unión de las placas por soldadura con cobre a lo largo de toda la periferia de las mismas.

En determinados puntos del interior de las placas se disponen lugares con un mayor sobresaliente que permite la unión interna, atribuyéndole una resistencia aún mayor; todo esto permite que trabajen con temperaturas de hasta 350 °C y presiones de hasta 40 bar. Los puntos de soldadura internos también incrementan considerablemente la turbulencia de los fluidos, sin embargo, estos equipos no pueden desmontarse para ser limpiados de forma física, por lo tanto, debe realizarse de forma química.

Por último, se tiene los intercambiadores de placas semisoldadas, los cuales son una combinación entre los intercambiadores con junta de estanqueidad y los de placas soldadas. En estos equipos se intercalan dos placas soldadas y a continuación placas con junta, debido a que las primeras resisten mayor presión se hace circular el fluido primario entre ellas, mientras que el fluido secundario circula por las placas con junta de estanquidad. En estos intercambiadores, se eliminan los puntos internos de soldadura y se utiliza un material de

soldadura diferente al cobre, permitiendo la utilización de amoníaco como fluido refrigerante (Amigo Martín, 2000).

#### 2.4.d. Adsorción

Este proceso ya se ha explicado con anterioridad en la sección 2.3.c. sistema de refrigeración por adsorción; en este punto se explicarán los modelos desarrollados por diferentes autores para determinar de forma teórica el funcionamiento de dicho proceso. Se definen las ecuaciones que determinarán el funcionamiento de la adsorción y desorción. Esta fase del ciclo termodinámico es fundamental ya que determinará el tiempo de ciclo.

Entiéndase por tiempo de ciclo al tiempo transcurrido desde que se inicia la adsorción, hasta luego de la desorción, momento en el cual, el adsorbente se encuentra en condiciones de realizar un nuevo ciclo. El principal parámetro a obtener es la concentración del adsorbato en el adsorbente, la cual depende de la presión y la temperatura.

Uno de estos autores en investigar este proceso fue Langmuir, quien basa su estudio en un equilibrio cinético entre la velocidad de adsorción y desorción, idealizando la superficie del adsorbente como cavidades regularmente dispersadas, que solamente pueden contener una molécula de adsorbato o quedar vacías. Las ecuaciones 7 y 8 muestran este modelo (Gonzales Martín, 2006) (Pino F., 2011):

$$V = V_0 \times \frac{k \times P}{1 + Y \times P} \quad (7)$$

$$Y = \frac{K}{\sqrt{T}} e^{\frac{\Delta H}{R \times T}} \quad (8)$$

Donde:

✓  $V$  = Volumen de adsorbato adsorbido por el adsorbente

- ✓  $V_0$  = Volumen que se requiere para saturar el adsorbente con una capa de adsorbato
- ✓ T = Temperatura
- ✓ P = Presión
- ✓  $\Delta H$  = Calor isostérico (a concentración constante)
- ✓ R = Constante de los gases
- ✓ Y = Constante de equilibrio

En este caso, se obtiene solamente el volumen adsorbido y no la concentración, sin embargo, al multiplicar este por la densidad ( $\rho$ ) del adsorbente (ecuación 9), se obtiene la masa adsorbida, permitiendo el cálculo de la concentración.

$$m_{adsorbida} = V \times \rho \quad (9)$$

Esta ecuación es útil para la quimisorción y la adsorción física a baja presión y alta temperatura.

El modelo de Brunauer, Emmet y Teller, considera que el adsorbente puede contener más de una molécula de adsorbato en sus poros, Las ecuaciones 10 (Gonzales Martín, 2006) y 11 (Pino F., 2011) son diferentes formas de expresar el modelo planteado.

$$\frac{P/\Pi}{V \times (1 - P/\Pi)} = \frac{1}{V_0 \times C} + \frac{C-1}{V_0 \times C} \times \frac{P}{\Pi} \quad (10)$$

Donde:

- 
- ✓ P = Presión de trabajo
  - ✓ V = Volumen de adsorbato adsorbido por el adsorbente
  - ✓  $\Pi$  = Presión de saturación del adsorbato a la temperatura de trabajo
  - ✓ C = Función que depende de la temperatura
  - ✓  $V_0$  = Volumen que se requiere para saturar el adsorbente con una capa de adsorbato

Otra forma de expresar esta ecuación es:

$$S = a_m \times W_m \times N_A \times 10^{-20} \quad (11)$$

Donde:

- ✓ S = Superficie específica ( $\text{m}^2/\text{gr}$ )
- ✓  $a_m$  = Capacidad de la monocapa ( $\text{mol}/\text{gr}$ )
- ✓  $W_m$  = Superficie que ocupa una molécula ( $\text{\AA}^2$ )
- ✓  $N_A$  = Número de Avogadro

La ecuación 26 permite obtener la superficie que corresponde a un gramo de adsorbente.

Para comprender el modelo de Frenlich, que permite obtener directamente la concentración, es necesario conocer el concepto de adsortividad; que es la facilidad con la cual el adsorbato es adsorbido por el adsorbente. La adsortividad se encuentra representada

por la pendiente de la isoterma resultante de graficar la concentración real/experimental con respecto a la concentración de equilibrio, es decir, aquella en la que el proceso de adsorción se detiene. Esto se ve en la Fig. 34 (Pino F., 2011).

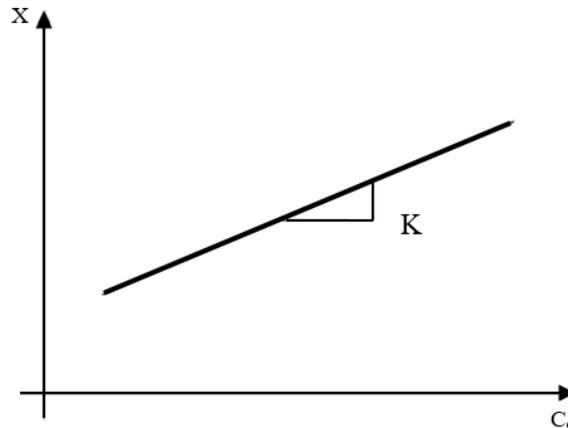


Figura 34: Isoterma de adsorción.

La ecuación 12 muestra la relación entre estas variables.

$$X = K \times (C_e)^{1/n} \quad (12)$$

Donde:

- ✓ X = Concentración
- ✓ K = Adsorptividad
- ✓  $C_e$  = Concentración de equilibrio, en la que se detiene la adsorción (es el equivalente a  $V_0$  en las ecuaciones anteriores)
- ✓ n = Constante adimensional dependiente de la temperatura

Notesé que el factor K en la ecuación 12 y la gráfica mostrada en la Fig. 42 no son las mismas que las utilizadas en el intercambiador de calor.

El siguiente modelo es el propuesto por Dubinin y Radustkhevich, el cual posteriormente fue modificado por Dubinin y Astakhov. Ambos modelos se utilizan para el llenado de microporos de sólidos utilizados como adsorbentes, tal como ocurre en el caso de los sistemas de refrigeración por adsorción, este modelo se expresa en la ecuación 13 (Gonzales Martín, 2006).

$$X = W_0 \times \rho \times e^{-D \times \left( T \times \ln \frac{\Pi}{P} \right)} \quad (13)$$

Donde:

- ✓ X = Concentración
- ✓  $W_0$  = Máxima capacidad de adsorción ( $m^3$  de adsorbato/kg de adsorbente)
- ✓  $\rho$  = Densidad del adsorbato en estado líquido
- ✓ D = Coeficiente de afinidad que depende de las características de los compuestos utilizados
- ✓  $\Pi$  = Presión de saturación del adsorbato a la temperatura de trabajo
- ✓ P = Presión de trabajo
- ✓ T = Temperatura de trabajo

La modificación propuesta por Dubinin y Astakhov consistió en agregar solamente un exponente “n” a la ecuación, el cual define el tipo de curva a la que se adapta la adsorción;

esto es para lograr un buen acercamiento a los resultados experimentales realizados sobre sólidos microporosos. Esto se expresa en la ecuación 14 (Gonzales Martín, 2006).

$$X = W_0 \times \rho \times e^{-D \times \left( T_x \ln \frac{P}{P} \right)^n} \quad (14)$$

#### 2.4.e. Sistema de captación de energía solar térmica

A continuación, se dan a conocer brevemente los diferentes equipos más difundidos en la actualidad, para el uso de la energía solar en el calentamiento de agua.

El principal objetivo de estos equipos, es el aprovechamiento de la radiación solar para elevar la temperatura de un fluido, generalmente agua. El funcionamiento es muy similar en todos los equipos, una serie de tubos o placas absorben la radiación solar y calientan el fluido. Los sistemas de aprovechamiento de la energía solar térmica pueden clasificarse en dos grandes grupos: colectores solares y termotanques solares (Placco, et al., 2007).

##### *Tipos de colectores solares:*

a) Colectores solares de placa plana con cubierta: Consisten en una caja metálica aislada, cerrada por una cubierta transparente en la parte superior y una placa absorbadora oscura en la parte inferior del interior de la caja. Un marco de aluminio o acero galvanizado es utilizado para la sujeción del colector, el marco y la cubierta transparente, evitando la contaminación del fluido. El rango de temperatura alcanzado por el fluido es de 30 a 70 °C (Placco, et al., 2007). En la Fig. 35, se puede visualizar un colector de este tipo.



Figura 35: Colector solar de placa plana con cubierta.

b) Colectores concentradores parabólicos compuestos (CPC) estacionarios: Similares a los anteriores, con la diferencia de que en su interior poseen concentradores parabólicos compuestos que permiten elevar la eficiencia al 50 %, obteniendo mayores temperaturas (Placco, et al., 2007).

c) Colectores de placa plana sin cubierta: Estos equipos son similares a los ya mencionados, pero sin cubierta transparente. Se trata de tubos plásticos o de metal, recubiertos de pigmentos ennegrecidos. Debido a su exposición al ambiente, gran parte del calor se pierde por convección hacia el mismo y, por lo tanto, su temperatura se limita a 20 °C sobre la temperatura ambiente (Placco, et al., 2007). En la Fig. 36, se puede visualizar un colector de placa plana sin cubierta.



Figura 36: Colector de placa plana sin cubierta.

d) Colectores de tubo de vacío: Consisten en una serie de tubos de vacío en cuyo interior, cada uno, posee un absorbedor, el cual, por lo general, consiste en una chapa negra. Debido a que el vacío es un buen aislante térmico, con estos equipos se pueden alcanzar temperaturas superiores a los 70 °C. Si bien son de mayor eficiencia que los colectores de placa plana, también son de mayor costo.

Estos colectores a su vez pueden ser de flujo directo o con tubo de calor. En el primer caso, se tiene una aleta de aluminio absorbedor, que permite la absorción del calor de la radiación solar y lo transmite a un tubo de metal o vidrio, estos equipos son utilizados con agua. En la Fig. 37, se muestra el extremo de los tubos de vacío, junto con las aletas de aluminio. También poseen un espejo parabólico, el cual mejora la eficiencia. En el segundo caso, en el espacio entre los tubos, donde existe el vacío, se coloca un fluido que se evapora producto de la absorción de la radiación solar, asciende por el tubo y al encontrarse con partes a menor temperatura se condensa, cediendo su calor. El fluido luego desciende por el tubo, producto de la gravedad y comienza nuevamente al ciclo. Debido al modo de funcionamiento, estos equipos siempre deben instalarse con una inclinación no menor a 25° (Placco, et al., 2007).



Figura 37: Colector solar con tubos de vacío - extremo de los tubos de vacío, junto con las aletas de aluminio.

#### *Termotanques solares:*

Se diferencian de los sistemas anteriores en que poseen un depósito aislado para almacenar agua caliente. Esto permite mantenerla a elevada temperatura para ser usada en aquellos momentos en los cuales la radiación es baja o nula, como por ejemplo los días nublados o durante los períodos nocturnos. Resultando ventajoso en gran manera, debido a la imprevisibilidad del clima y la continua necesidad de agua caliente que se tiene en los hogares.

Como se ha visto anteriormente, ningún aislante evita la transferencia de calor completamente, por lo tanto, el depósito no podrá mantener la temperatura del agua indefinidamente. Para calentar el agua mediante la radiación solar se puede utilizar cualquier tipo de colector mencionado anteriormente. La capacidad de los depósitos varía de acuerdo a la aplicación que se le requiera. En la Fig. 38, se muestra un termotanque solar.



Figura 38: Termotanque solar.

## 2.5. Selección y cálculo de los diferentes componentes del sistema para refrigeración

En esta sección se seleccionarán los diferentes componentes que se requieren para el sistema, así como el cálculo necesario para determinar sus dimensiones, cantidades, o cualquier otra propiedad que se considere necesaria e importante. Dentro de estos se encuentran:

1. Para el diseño del refrigerador
  - a. Selección del par de trabajo
  - b. Capacidad del equipo
  - c. Carga de enfriamiento
  - d. Dimensiones internas

### I. Aislación

- 
- e. Evaporador
  - f. Adsorbedor
  - g. Condensador
  - h. Depósito de líquidos
2. Para el suministro de calor requerido por la desorción
- a. Termotanque solar
  - b. Resistencias eléctricas, baterías, regulador de carga y paneles solares
3. Controladores

En esta sección, también se tratarán aspectos necesarios para el cálculo de las diferentes partes que componen el circuito. Se decide iniciar desde la cantidad de alimentos a conservar, de modo que el equipo sea capaz de cumplir con los objetivos propuestos en un inicio. Algunos de los puntos considerados son extraídos de bibliografía provista por algún fabricante de heladeras, mientras que otras consideraciones, son generadas en base a cuestiones prácticas, observadas en el uso diario de estos productos.

Previo a este inicio, se establecerá el par de trabajo ya que este puede influir en los materiales que se utilizarán para la construcción del equipo y sus dimensiones, posteriormente se determinará la cantidad de cada uno de ellos a utilizar.

#### 2.5.a. Selección del par de trabajo

No todos los refrigerantes mencionados en la sección 2.4.a. Par de trabajo son adecuados para trabajar con cualquiera de los absorbentes descritos anteriormente, debido al

---

bajo rendimiento obtenido o su incompatibilidad. Algunos de los pares de trabajo más utilizados con la combinación de los adsorbentes/adsorbatos mencionados anteriormente son (Goyal P. et al., 2015):

- ✓ Silica gel - agua
- ✓ Carbón activado - metanol
- ✓ Carbón activado - amoníaco
- ✓ Zeolita - agua
- ✓ Zeolita - amoníaco

Si el desarrollo se realizase de forma puramente teórica, considerando una fuente de calor infinita, se debería seleccionar el par de trabajo zeolita/amoníaco debido a su gran capacidad de extracción de calor (4000-6000 kJ/kg). Sin embargo, requiere altas temperaturas (150 a 200 °C) y de acuerdo con el esquema planteado y los objetivos del trabajo, se pretende utilizar un colector solar como fuente de calor primaria, lo cual limita la temperatura de trabajo, así como también, las horas de funcionamiento (Goyal P. et al., 2015).

Además de esto, se debe tener en cuenta que, como se mencionó anteriormente, el amoníaco, no se biodegrada con facilidad, es perjudicial para el medioambiente acuático, resulta muy perjudicial para la salud humana cuando se expone a dicho compuesto, y para su producción se requieren altas temperaturas y presiones. No se entrará en mayores detalles al respecto, debido a que la temperatura que requiere en la fuente caliente es suficiente motivo para descartar dicho par de trabajo.

La fuente de calor primaria que suministrará la energía calórica requerida por el sistema, se encuentra formada por un termotanque solar, el cual, posee venteo a la atmósfera, para de este modo, evitar elevadas presiones que comprometan al equipo, y, por lo tanto, la temperatura máxima que puede alcanzar el fluido caloportador, es de 100 °C, siendo esta menor que la requerida para el par de trabajo mencionado. Además de esto, se debe considerar que el amoníaco reacciona con el cobre, sus aleaciones y algunos lubricantes,

---

limitando los tipos de materiales a utilizar para la construcción de los diferentes componentes del sistema.

En el extremo opuesto, se encuentra el par de trabajo gel de sílice/agua, el cual requiere las menores temperaturas de los pares de trabajo mostrados (por debajo de 90 °C), así como también trabajar con presiones inferiores a la atmosférica (de 0,001 a 0,3 bar) (Goyal P. et al., 2015). Ambos compuestos son de fácil acceso, el agua no produce efectos adversos en la salud humana ni en el medioambiente, tampoco requiere un proceso de producción. Sin embargo, debe presentar un nivel de pureza muy elevado para evitar el depósito de diferentes sedimentos y la formación de algas en la instalación; esto puede implicar la adición de diferentes productos químicos. El agua corroe a materiales como el hierro, limitando nuevamente los componentes a utilizar en la instalación.

El par carbón activado/metanol es el más utilizado en los experimentos y la bibliografía mencionada, es un buen par de trabajo gracias a la relativa baja temperatura de trabajo (debajo de 120 °C), una extracción de calor media (de 1800 a 2000 kJ/kg) y son productos de fácil acceso (Goyal P. et al., 2015). La molécula de metanol es de pequeño tamaño, haciéndola ideal para ser adsorbida por el carbón activado. Sin embargo, la producción industrial y contaminación ambiental que genera dicho compuesto (huella de carbono) lo hace poco deseable desde un enfoque medioambiental.

Tal como se ha mencionado en un inicio, el objetivo del desarrollo presentado es la reducción del consumo eléctrico para producir un ahorro económico en el usuario; lo cual, reduciría indirectamente, la quema de combustibles fósiles para la generación de energía eléctrica; también, se planteó, evitar la utilización de compuestos CFC o cualquier otro que produzca grandes daños a la naturaleza, ya sea en un medio acuático o en la atmósfera.

La producción del metanol requiere gran cantidad de energía calórica y altas presiones (menores que para el amoníaco), lo cual solamente es viable mediante la utilización de

---

combustibles fósiles. Además de esto, se debe tener en cuenta la toxicidad que representa para el ser humano cuando este se expone al mismo.

En cuanto al par carbón activado/amoníaco es uno de los que mayor capacidad de producción de frío poseen (de 2000 a 2700 kJ/kg) (Goyal P. et al., 2015). Sin embargo, requieren temperaturas muy superiores a los 100 °C, siendo esta, la máxima temperatura que puede alcanzar un colector solar en condiciones normales de funcionamiento (con venteo a la atmósfera para liberar el exceso de presión). A esto se deben sumar los efectos adversos que conlleva la utilización del amoníaco, mencionados anteriormente y la necesidad de producción del refrigerante, cuyo requerimiento de energía calórica y presión es mayor que en el caso del metanol.

Para la utilización de zeolita/agua como par de trabajo, se tiene una buena combinación de sistema de extracción de calor (desde 3300 a 4200 kJ/kg) junto con bajos niveles de contaminación ambiental producto de su utilización. Sin embargo, la zeolita es tóxica para el ser humano y requiere temperaturas muy elevadas para la finalidad buscada (por sobre los 200 °C) (Goyal P. et al., 2015). También requiere, una fuente de calor alternativa que posibilite alcanzar las temperaturas necesarias para el funcionamiento del ciclo. Además de esto, es necesario realizar un tratamiento especial del agua, de modo que se evite la formación de sedimentos y proliferación de algas en los diferentes componentes del sistema.

Como alternativa a los pares de trabajo mencionados se presenta el par carbón activado/etanol, los cuales pueden ser obtenidos con una relativa baja huella de carbón (respecto a los otros compuestos), no presentan altos niveles de contaminación ambiental ni son tóxicos para el ser humano. Si bien la molécula de etanol ( $C_2H_6O$ ) es de mayor tamaño que la de metanol, ( $CH_4O$ ) puede ser absorbida con facilidad por el carbón activado en niveles elevados a baja temperatura (Chávez Carbajal & Mostacero Armas, 2013). Debido a que su punto de ebullición del etanol, es mayor que el del metanol, es de esperar que también se requiera mayor temperatura en la fuente caliente. Sin embargo, continúa estando por debajo de los 100 °C, temperatura que puede alcanzar un sistema de colector solar tal como

---

se ha mencionado con anterioridad (ROTH - N° CE: 200-578-6, 2018) (ROTH. N° CE: 200-659-6, 2018).

En base a las ventajas, desventajas, huella de carbono, disponibilidad y eficiencia se selecciona la alternativa carbón activado/etanol como par de trabajo.

### 2.5.b. Capacidad del equipo

En esta sección, se da una breve explicación acerca del funcionamiento normal de una heladera a compresión, y la variación que se tendrá en el equipo diseñado.

La capacidad del equipo ( $C_e$ ) es la cantidad de kcal por hora que puede entregar el sistema, aunque se suele expresar por 24 h, dividida el tiempo de funcionamiento (Dossat, 2004). La forma de calcularla se muestra en la ecuación 15.

$$C_e = \frac{Q/24}{t_f} \quad (15)$$

Donde:

- ✓  $C_e$  = Capacidad del equipo (kJ·h)
- ✓  $Q/24$  = Cantidad de calor que puede extraer el equipo en 24h
- ✓  $t_f$  = Tiempo de funcionamiento (h)

En la mayoría de los equipos de refrigeración el tiempo de funcionamiento no es de 24 h, es decir, no son de funcionamiento continuo. Esto se debe a la formación de escarcha en la superficie del evaporador, gracias a que la humedad del aire se condensa sobre esta

---

superficie, y, debido a las bajas temperaturas, se congela sobre la misma. El hielo formado tiene la peculiaridad de contener poros en su interior convirtiéndolo en un buen aislante. De este modo, se evita la correcta extracción de calor del interior del refrigerador y los alimentos allí almacenados. Por lo tanto, el equipo deberá trabajar a mayor capacidad, es decir, en el caso de los equipos de refrigeración por compresión, se incrementa el trabajo del compresor; mientras que en los equipos por absorción y adsorción, se incrementa el tiempo de ciclo, ya que no se evapora la cantidad de fluido frigorígeno necesaria para generar la refrigeración, producto de la aislación del evaporador. Dado que los equipos no son de funcionamiento continuo, se reduce la cantidad de escarcha formada (Dossat, 2004).

Los métodos para eliminar la escarcha son muy variados y, dependiendo de la aplicación del sistema de refrigeración, es conveniente uno u otro. En este proyecto solo se mencionarán los métodos aplicables a las heladeras domiciliarias.

Un método consiste en disminuir el tiempo de funcionamiento del equipo, es decir, funciona solo una fracción del día, por lo general 16 h para las cámaras frigoríficas. Durante el tiempo que no está funcionando, la temperatura de la cámara a refrigerar (temperatura interna de la heladera) se incrementa por sobre la temperatura de congelación del agua a la presión interna, produciendo que el hielo se derrita desde las capas exteriores hacia los tubos del evaporador. Este proceso es lento y puede generar temperaturas superiores a las admitidas para la conservación de los alimentos, dando lugar al posible deterioro de los mismos.

Otro método utilizado consiste en la circulación de refrigerante caliente por el interior del evaporador. Es utilizado en aquellas aplicaciones donde el equipo debe funcionar de forma casi continua o la temperatura de conservación posee límites muy acotados y, sobrepasarlos implica el considerable deterioro o la descomposición de los productos. Al circular refrigerante caliente por el interior del evaporador, la escarcha comienza a derretirse desde el interior hacia el exterior. En este caso no es necesario que se derrita completamente, ya que cuando forma una pequeña capa sobre las superficies, caerá por su propio peso.

Como se puede notar, el método más eficiente consiste en hacer circular refrigerante caliente por el interior del evaporador. Para el sistema de refrigeración por adsorción seleccionado y según el esquema mostrado en la Fig. 39 (ídem a Fig. 14), realizar este proceso es simple. El mismo se puede lograr evitando que el vapor pase por el condensador y circule en un bucle cerrado entre el evaporador y el adsorbedor activo, es decir, aquel que se encuentra recibiendo el calor del termostanque solar. De este modo, el adsorbedor se encontrará caliente, y se evitará que el vapor de etanol sea adsorbido por el mismo. El adsorbedor restante deberá quedar aislado del circuito por medio de válvulas (Dossat, 2004).

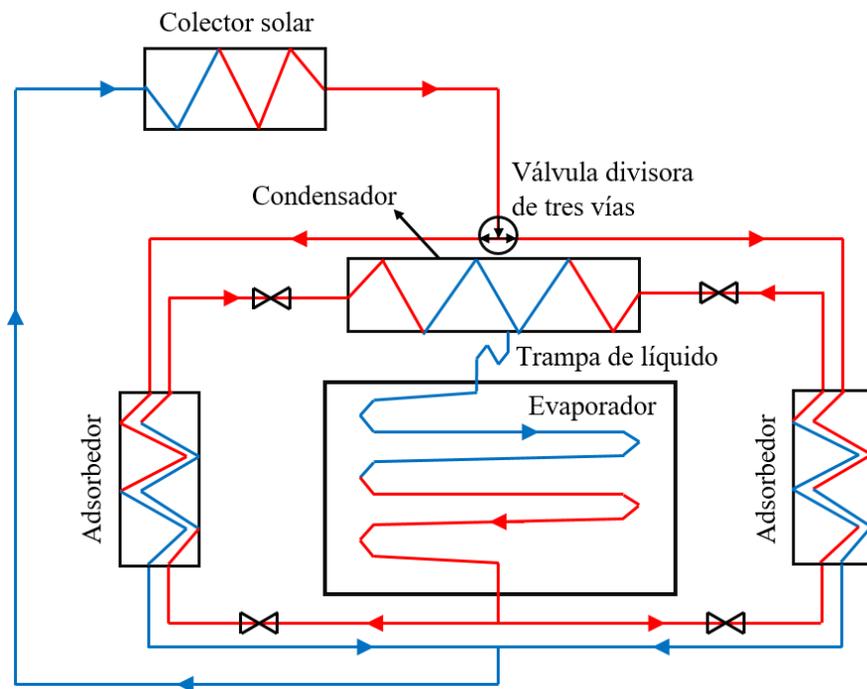


Figura 39: Esquema del circuito de refrigeración por adsorción planteado (ídem a Fig. 14).

El tiempo de que demora la escarcha en derretirse es función de la temperatura alcanzada en el interior de la heladera y la humedad relativa del aire en su interior, así como también de la temperatura y velocidad de circulación del vapor de etanol. Más adelante se determinará la temperatura de conservación de los alimentos, la cual es superior a la temperatura de congelación del agua (a presión atmosférica), y por lo tanto, se espera que la

---

formación de escarcha sea mínima e incluso nula. Sin embargo, con el método planteado anteriormente, se puede producir la eliminación de la misma en caso de ser necesario. Esto deberá ser verificado en la práctica, dado que, según la bibliografía consultada, los resultados del funcionamiento práctico no siempre son acordes a los cálculos teóricos (Dossat, 2004).

### 2.5.c. Carga de enfriamiento

La información utilizada en el desarrollo de este punto ha sido obtenida de Dossat, 2004, salvo que se exprese explícitamente lo contrario.

La carga de enfriamiento es la cantidad de calor que debe extraerse del interior de la heladera, y se encuentra compuesta por:

- ✓ La carga del producto
- ✓ La carga de las paredes
- ✓ La carga por cambio de aire

La carga del producto está dada por la cantidad de calor que se debe extraer de los diferentes productos a almacenar en la heladera, esto es, para llevarlos de la temperatura a la que se encuentran a la temperatura de conservación. Si se requiriese congelar el producto, debería tenerse en cuenta el calor latente de solidificación del mismo. Sin embargo, como ya se ha establecido anteriormente, el objetivo es diseñar un refrigerador y no un congelador, por lo tanto, dicho calor no se involucra en el cálculo de la carga del producto.

Pueden darse dos casos contrarios, uno en el cual el producto ingrese a menor temperatura que la de conservación, y otro en el que ingrese a mayor temperatura. En el

primer caso, el producto absorberá calor del medio, enfriándolo, mientras que en el segundo, el medio absorberá calor del producto, calentándose.

Los productos como la carne solamente entregan su calor al enfriarse, una vez que alcanzan su temperatura de conservación no intercambiarán calor a no ser que se produzca una modificación en la temperatura. Si el cambio es positivo, aumenta la temperatura del medio, y este, absorbe calor; si es negativo, disminuye la temperatura del medio, y por lo tanto, el producto absorberá calor.

Sin embargo, las frutas y verduras constantemente entregan calor generado por la respiración de las mismas. De este modo se tiene que la carga que supone un producto u otro varía de acuerdo a si está vivo o no (Dossat, 2004). La cantidad de calor cedido por un producto viene dada por la ecuación 16.

$$Q_1 = m \times c \times \Delta T \quad (16)$$

Donde:

- ✓  $Q_1$  = Calor cedido (kJ)
- ✓  $m$  = Masa del producto (kgm)
- ✓  $c$  = Calor específico (kJ/kg·k)
- ✓  $\Delta T$  = Cambio de temperatura (k)

El resultado de la ecuación 8 es la cantidad de calor que intercambia un producto, al enfriarse desde una temperatura inicial a la temperatura final, pero no tiene en cuenta el tiempo durante el cual el producto será enfriado. Es por ello que, se divide la ecuación anterior por el tiempo de enfriamiento ( $t_e$ ), es decir, el tiempo que transcurre desde el ingreso

del producto hasta que alcanza su temperatura de conservación. De este modo se obtiene como resultado la razón de enfriamiento horaria, que luego es multiplicada por 24 h para obtener la carga del producto para 24 h. De este modo la ecuación 16 se transforma en la ecuación 17.

$$Q_1' = \frac{m \times c \times \Delta T}{t_e(h)} \times 24 h \quad (17)$$

Es lógico pensar que la carga producida por los productos es mayor cuando apenas ingresan a la heladera que en un tiempo posterior. Esto se debe a la diferencia de temperatura que existe entre el producto y el ambiente que lo rodea. Por lo tanto, si se dimensiona el equipo de refrigeración para una carga uniformemente distribuida a lo largo del período de enfriamiento, se tendrá un equipo subdimensionado, con capacidad insuficiente para cubrir la carga durante los períodos iniciales.

Para sobrellevar esta deficiencia se utiliza un factor denominado “*rapidez de enfriamiento*” ( $R_e$ ), el cual incrementa el valor de la carga del producto para hacer que la carga horaria promedio sea similar a la carga máxima, es decir, cuando el producto ingresa al interior de la heladera. Dicho factor puede tomar cualquier valor en el rango  $0 < R_e \leq 1$ . Como resultado de la utilización de este factor se tiene un equipo sobredimensionado, pero con capacidad de sobrellevar la carga inicial de los productos (Dossat, 2004). Al aplicar la rapidez de enfriamiento a la ecuación 17 esta se transforma en la ecuación 18.

$$Q_1'' = \frac{m \times c \times \Delta T}{T_e(h)} \times \frac{24 h}{R_e} \quad (18)$$

Para determinar los productos que normalmente las personas tienen en sus heladeras, se realizaron encuestas a diversas personas. El resumen de las mismas se encuentra en el Apéndice N° 1: Encuestas, en ellas se indica el producto y la cantidad de cada uno. Para obtener una mayor heterogeneidad en los productos y así lograr un diseño que pueda adaptarse a los diferentes estilos de vida de los usuarios, dichas encuestas, fueron realizadas

---

a personas con diferentes oficios, edades y grupo familiar. En las tablas 10.10 a 10.13 de la bibliografía Dossat – 2004, se muestran las temperaturas de conservación de diferentes productos (en °F), así como también el tiempo máximo de almacenamiento de los mismos. Para este trabajo, se han extraído los datos necesarios de dichas tablas.

Si bien esta temperatura varía considerablemente de un producto a otro, la temperatura interna se establece en base a los productos más críticos y comunes que se obtuvieron de las encuestas, tales como carne, manteca, queso y huevos. En la Tabla 2, se muestran los datos necesarios para los cálculos de algunos de los productos mencionados en las encuestas.

Tabla 2: Datos para el cálculo de la carga de enfriamiento.

Producto	Temperatura de conservación [°C]	Calor específico antes del congelamiento [kJ/kg·k]	Calor emitido por hora (solo frutas y verduras) [kJ/kg·h]	Masa almacenada / cantidad [kg]	Tiempo de enfriamiento [h]	Factor de rapidez de enfriamiento
Carne	1,7	3,14		1	18	0,67
Manteca	4,4	2,68		0,5	S/E	S/E
Queso	4,4	2,93		1	S/E	S/E
Huevos	4,4	3,56		0,78	10	0,85
Leche	1,7	3,77		1,03	10	0,85
Naranjas	15,6	3,81	0,24	1	22	0,7
Zanahorias	4,4	3,89	0,17	0,5	18	0,7
Tomate	7,2	3,85	0,06	1	34	1
Agua		4,19		2	S/E	S/E
Mermeladas	7,2	2,05		0,4	S/E	S/E

S/E: Sin especificar

La continuación de la tabla 2 presenta los resultados de los cálculos expresados anteriormente.

Tabla 2 Continuación: Resultados de la aplicación de los cálculos.

Producto	$Q_1$ (kJ)	Calor emitido por hora (kJ / h)	Razón de enfriamiento horaria	$Q_1''$ (kJ / 24h)	$Q_1''$ (kJ / h)
Carne	79,91		4,44	159,03	6,63
Manteca	34,10		34,10	818,47	34,10
Queso	74,57		74,57	1789,64	74,57
Huevos	70,6		7,07	199,54	8,31
Leche	98,82		9,88	279,03	11,63
Naranjas	96,96	0,24	4,41	151,11	6,30
Zanahorias	49,50	0,09	2,75	94,29	3,93
Tomate	97,98	0,06	2,88	69,16	2,88
Agua	213,27		213,27	5118,50	213,27
Mermeladas	20,87		20,87	500,86	20,87
<b>Total</b>	<b>836,67</b>	<b>0,39</b>	<b>374,24</b>	<b>9179,64</b>	<b>382,49</b>

Con los valores de la Tabla 2, se puede establecer que el rango de temperatura de conservación requerido usualmente por los alimentos se encuentra entre los 1,7°C y los 7,2°C. Por lo tanto, se establece que la temperatura en el interior de la heladera debe mantenerse alrededor de los 2°C. Si bien esto es superior a lo requerido por la leche y la carne, la diferencia es menor a medio grado, por lo tanto, se considera aceptable. Sin embargo, no debe superar los 4,5°C debido a que, a temperaturas superiores a esta, la mayoría de los alimentos quedan fuera de su temperatura óptima de conservación.

---

Para la temperatura exterior, se considera la información obtenida de National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA, 2019), donde se expresa que la temperatura media anual para la provincia de Córdoba en 2018 fue de 13,1 °C, para el mes de julio fue de 10,7 °C y para enero de 23,8 °C, mientras que la temperatura máxima registrada fue para el mes de enero, donde alcanzó los 31,1 °C.

Para este proyecto, se considera que la temperatura máxima exterior es el promedio entre el máximo obtenido en el mes de enero (31,1 °C) y su promedio (23,8 °C), con lo cual se obtiene una temperatura de 27,5 °C. Esta estimación se realiza dado que, como se ha explicado al inicio del proyecto, la temperatura media mundial aumenta año a año, y, estimando que la vida útil de un electrodoméstico se encuentra entre 8 y 14 años, el producto debe ser diseñado para que mantenga correctamente los alimentos durante su vida útil.

Por lo tanto la temperatura media anual resulta en un valor bajo para los meses más críticos, es decir los de verano, la temperatura promedio de enero también se considera baja, debido a que en ocasiones se han tenido días con temperaturas cercanas a los 40 °C (2 de enero de 2019) (LaVoz, 2019). Si se considera la temperatura máxima el equipo quedaría sobredimensionado, elevando considerablemente los costos.

Para la obtención del calor cedido, la diferencia de temperatura se considera entre los 2 °C que se tomaron anteriormente como temperatura de conservación y 27,5 °C, la cual se considera como temperatura ambiente.

De la Tabla 2 continuación, se obtiene que la cantidad de calor que ceden los alimentos hasta alcanzar su temperatura de conservación, es de 382,49 kJ·h más 0,39 kJ·h del calor que emiten las frutas de forma constante, es decir 382,87 kJ·h. Sin embargo, se debe tener en cuenta que estos alimentos no ocupan mucho espacio, por lo tanto pueden almacenarse en una heladera pequeña, además de que las encuestas muestran que las personas almacenan mayormente 18 unidades de productos (considerando 1 docena de huevos como una unidad), mientras que en la Tabla 2 se consideran solamente 11 unidades, por lo tanto para sobrellevar

esta diferencia se multiplica por un factor de compensación de 3 al calor que ceden los productos:

$$Q_1'' = 382,87 \frac{kJ}{h} \times 3 = 1148,61 \frac{kJ}{h}$$

De este modo, el evaporador podrá sobrellevar la carga producida por una mayor cantidad de alimentos almacenada, lo cual puede ocurrir al inicio de mes, momento en el que, por lo general, las personas adquieren mayor cantidad de alimentos, que utilizarán a lo largo de los días subsiguientes. También debe tenerse en cuenta que el calor cedido por los alimentos almacenados representa la mayor carga del equipo.

La carga por el cambio de aire viene dada por la cantidad de aire caliente que ingresa al interior de la heladera cada vez que se abre la puerta, con la consecuente expulsión de aire frío de la misma. La forma más efectiva para reducir este factor es la reducción del tamaño de la puerta. En cuanto a este punto, debe tenerse en cuenta que esto no siempre es posible, debido a que, en estos electrodomésticos, el usuario busca tener una apertura que le permita extraer los productos de cualquier parte del interior, de forma cómoda y accesible, es por ello que por lo general, las puertas abarcan todo el frente de las heladeras comerciales.

El aire que ingresa se encuentra a temperatura ambiente y por lo tanto a mayor temperatura que el aire del interior. También contendrá mayor humedad; por lo que se puede decir que ingresa en condiciones muy desfavorables para la conservación de los alimentos, y debe ser enfriado y deshumificado tan pronto como sea posible.

Al mismo tiempo, se debe tener en cuenta que, en la superficie de contacto entre la puerta y las paredes, se puede generar hielo, quedando “pegada” a la pared e imposibilitando su apertura. Para solucionar este inconveniente se suele colocar una resistencia eléctrica en el interior del burlete de la puerta, la cual mantiene una temperatura superior al punto de rocío evitando, que se condense y congele la humedad del aire en esta zona. La carga por cambio de aire se obtiene con la ecuación 19.

---

$$Q_2 = m \times (h_e - h_i) \quad (19)$$

Donde:

- ✓  $Q_2$  = Carga por cambio de aire por 24 h (kcal)
- ✓  $m$  = Masa de aire que ingresa (kg)
- ✓  $h_e$  = Entalpía del aire exterior (kcal / kg)
- ✓  $h_i$  = Entalpía del aire interior (kcal / kgm)

Esta ecuación da como resultado solamente el calor que añade un cambio de aire, sin embargo, para llevarlo a 24 h se debe multiplicar por la cantidad de veces que se renueva el aire por hora (C), y considerar si la masa de aire en cada renovación es constante o no. Esto transforma la ecuación anterior en la ecuación 20:

$$Q'_3 = m \times (h_e - h_i) \times C \quad (20)$$

Donde:

- ✓  $C$  = Cantidad de veces que se renueva la masa de aire “m”

Debido a la relación entre la superficie de la puerta, el ancho y la profundidad de la heladera y al tiempo que habitualmente se demora en retirar un producto de la misma, se estima que cada vez que se abre, se renueva completamente el volumen de aire del interior. Si bien la cantidad de veces por hora que se abre la puerta a lo largo de un día no es constante, se estimará que se abre una vez por hora, es decir 24 veces en un día, quedando sobreestimado para algunos momentos del día como ser la madrugada y subestimado para otros como lo es al mediodía. Se consideran despreciables las fugas de aire por fallas en el sello de las partes

móviles (puerta), uniones de las diferentes partes y la transmisión de calor por el evaporador y los conductos que entran y salen.

Según los datos brindados por la estación meteorológica 873440 (SACO) a tutiempo.net, la humedad relativa, en 2018, en la provincia de Córdoba fue del 69 %; con este dato y el valor de la temperatura ambiente considerado para los cálculos (27,5 °C), se procede a obtener las entalpías del diagrama psicrométrico del aire expuesto a continuación (Fig. 40). Esto también se realiza para la temperatura del interior de la heladera, es decir 2 °C con el mismo porcentaje de humedad, 69 % (tutimepo.net, 2019). Por lo tanto, del diagrama se obtiene:

✓  $h_1 = 10 \text{ kJ/kg de aire}$

✓  $h_2 = 77,5 \text{ kJ/kg de aire}$

La densidad del aire para 27,5 °C es de aproximadamente 1,174 kg/m<sup>3</sup>. Para llevarlo a masa se debe multiplicar por el volumen de la heladera (360 L) obteniendo:

$$m = 0,423 \text{ kg}$$

Reemplazando los valores de entalpía y masa en la ecuación 21.

$$Q'_3 = m \times (h_e - h_i) \times C \quad (21)$$

Se tiene:

$$Q'_3 = 0,423 \text{ kg} \times (77,5 - 10) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \times 24$$

---

$$Q'_3 = 684,67 \frac{kJ}{24h}$$

Y por hora el resultado es de:

$$Q'_3 = 28,52 \frac{kJ}{h}$$

Otro punto a tener en cuenta es que el aire caliente es menos denso que el aire frío. Al abrir la puerta, ingresa el aire caliente y se desplaza el aire frío tal como ya se ha explicado anteriormente. Al cerrarla, el aire caliente comienza a enfriarse, disminuyendo su densidad y por lo tanto su volumen. Esto genera una diferencia de presión entre el interior y el exterior que ayuda a mantener la puerta cerrada, sin embargo, si dicha diferencia de presión es excesiva puede producir que quede “chupada” o “pegada” a la heladera dificultando su apertura. Para solucionar este inconveniente los fabricantes utilizan un elemento que calienta el aire que ingresa e iguala las presiones.

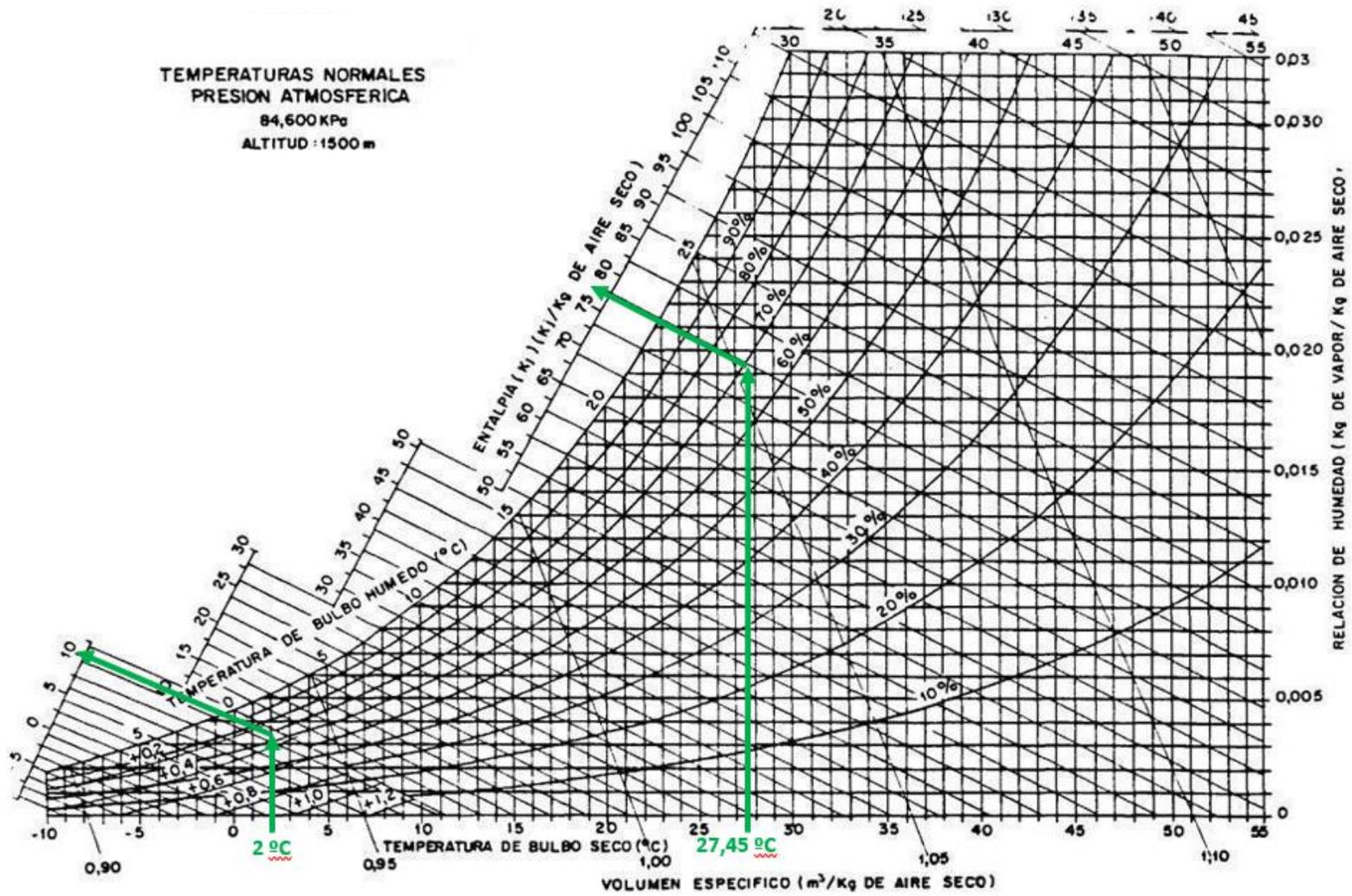


Figura 40: Diagrama psicrométrico del aire.

La ganancia por carga de las paredes, representa la cantidad de calor que se filtra desde el exterior hacia el interior a través de las paredes. Para este proyecto, se considera que, no debe ser superior al 20 % del calor que se debe extraer de los alimentos almacenados en el interior de la heladera, para lograr dicho objetivo, se trabajará sobre la aislación utilizada en el equipo, esto se determina mediante la ecuación 22:

$$Q_2' = 0,2 \times Q_1'' \quad (22)$$

$$Q_2' = 0,2 \times 1148,61 \frac{kJ}{h}$$

$$Q_2' = 229,72 \frac{kJ}{h} \cong 63,81 W$$

La suma de las diferentes cargas mencionadas da como resultado la carga total del sistema, es decir, la cantidad de calor que se debe eliminar en 24 h, esto se expresa en la ecuación 23:

$$Q = Q_1 + Q_2' + Q_3' \quad (23)$$

$$Q = 1148,61 \frac{kJ}{h} + 229,72 \frac{kJ}{h} + 63,81 \frac{kJ}{h}$$

$$Q = 1513,42 \frac{kJ}{h}$$

Esta es la cantidad de calor que se debe extraer del interior de la heladera y está formada por diferentes elementos. Dentro de ellos se tiene la ganancia por carga del producto ( $Q_1$ ), por carga de las paredes ( $Q_2'$ ) y por cambio de aire ( $Q_3'$ ) y. El adsorbato elegido fue etanol, que posee las siguientes características (Jarabo F. E. y García A., 2012):

- ✓ Calor latente de evaporación de 841 kJ/kg ( $Q_v$ )
- ✓  $C_p$  de 2,4 kJ/(kg\*k)
- ✓ Densidad de 0,79 kg/L

Con estos datos, se procede a obtener el volumen de etanol que se debe evaporar por hora para lograr extraer la cantidad de calor ( $Q$ ) determinada anteriormente (ecuación 24). Debido a que evapora a temperatura ambiente y el  $C_p$  (calor sensible del etanol) es muy pequeño con respecto al calor latente de evaporación, su efecto de refrigeración se considera despreciable.

$$\text{Volumen de etanol} = \frac{Q}{Q_v} \times \frac{1}{\rho} \quad (24)$$

$$\text{Volumen de etanol} = \frac{1513,42 \frac{\text{kJ}}{\text{h}}}{841 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}} \times \frac{0,79 \text{ L}}{1 \text{ kg}}$$

$$\text{Volumen de etanol} = 1,80 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \times 1,42 \frac{\text{L}}{\text{kg}} = 1,42 \frac{\text{L}}{\text{h}}$$

#### 2.5.d. Dimensiones internas y aislación

Como ya se ha dicho anteriormente, la ganancia por carga de las paredes, representa la cantidad de calor que se filtra desde el exterior hacia el interior. Dado que, en función de las características del aislante, siempre existirá una cierta cantidad de calor que lo atravesará, esta es directamente proporcional a la superficie de la pared expuesta al exterior ( $A$ ), a la diferencia de temperatura entre el interior y el exterior ( $\Delta T$ ) y una constante propia de cada material

conocida como coeficiente de aislación ( $\lambda$ ), la cual determina la cantidad de W por m<sup>2</sup> por k que atraviesa al aislante. Para los diferentes materiales viene tabulada, y por lo general son datos provistos por el proveedor del aislante seleccionado. La relación entre las variables viene dada por la ecuación 25.

$$Q_2' = \frac{A \times \nabla T \times \lambda}{L} \quad (25)$$

Donde:

- ✓  $Q_2'$  = Carga por las paredes por 24 h (kcal)
- ✓  $A$  = Área (m<sup>2</sup>)
- ✓  $\nabla T$  = Diferencia de temperatura entre el interior y el exterior (°C)
- ✓  $\lambda$  = Coeficiente de conductividad térmica [kcal / (m<sup>2</sup> \* °C)]

Al analizar la ecuación 17, se puede deducir con facilidad que, para reducir la carga de enfriamiento por ganancia de las paredes se debe reducir el área o incrementar la calidad del aislante buscando tener un menor coeficiente  $\lambda$ . La diferencia de temperatura no se puede modificar dado que la temperatura a mantener en el interior de la heladera y la temperatura considerada como ambiente ya se han definido con anterioridad y, se consideran constantes para todo el desarrollo.

Para reducir el área, se debe tener en cuenta que, al ser un electrodoméstico, por lo general el usuario busca que ocupe la menor superficie posible en el suelo, con una gran capacidad de almacenamiento de productos. Es por ello que los diseños de las heladeras comerciales por lo general son altos, con un ancho y una profundidad pequeña relativa a la altura.

Para determinar el tamaño de la heladera se elige una capacidad mediana de 360 litros. Es importante medir la capacidad en litros y no solamente por sus medidas exteriores o interiores, dado que éstas son muy arbitrarias y engañosas. Por un lado, las medidas exteriores consideran el grosor del aislante, lo cual da como resultado una capacidad muy superior a la real. En el caso de las medidas interiores, al considerar solo las dimensiones de las paredes, no se tiene en cuenta los accesorios que puede incluir, tales como rejillas, cajones para verduras y hueveras, por solo mencionar algunos. Al dar la capacidad en litros, se expresa la cantidad de litros de agua que pueden entrar en la heladera, considerando los accesorios que incluye (Electrolux, 2011).

Debido a que la superficie que ocupa en el suelo de un hogar debe ser la menor posible, se considera para la profundidad el tamaño de una botella de 2,5 L. Este elemento, es de forma habitual, uno de los de mayor longitud que se suelen ubicar dentro de las heladeras, dicha medida se puede observar en la Fig. 41a, a la misma se suman 50 mm más, para evitar cualquier posible golpe de los elementos con la pared interna de la puerta.

Para el ancho se considera una bandeja, cuyas dimensiones se muestran en la Fig. 41b, a este ancho se debe sumar una distancia suficiente, para que, en el estante donde se encuentre dicha bandeja pueda ubicarse algunas cosas más, como puede ser una botella, un pedazo de queso, algunos huevos, algún contenedor, etc. Por lo tanto, se diseña con una medida final de 600 mm (Electrolux - DF42 DW42X, 2012).

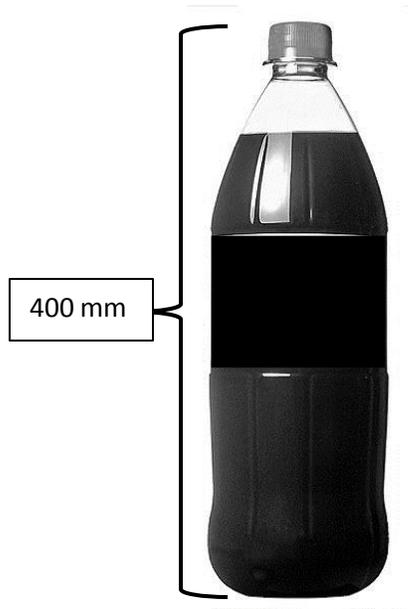


Figura 4119a: Botella 2,5 L.

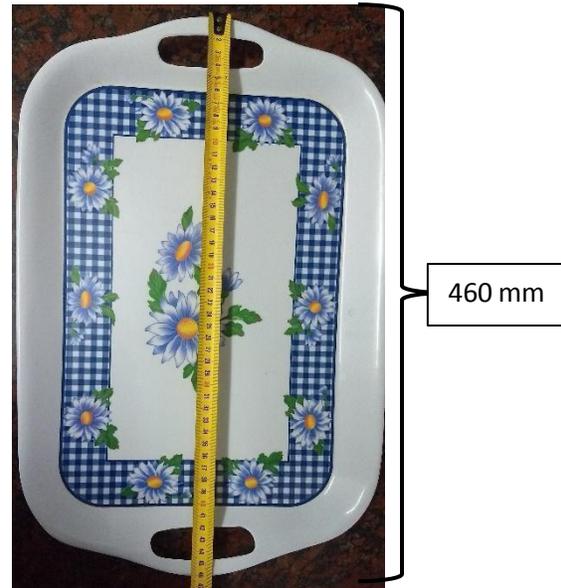


Figura 41b: Bandeja.

La altura se determina por medio de la ecuación de volumen de un paralelepípedo, a fin de obtener el volumen de 360 L, dando como resultado 1333,33 mm. A las medidas de ancho y largo se añade un 5 % de su longitud, mientras que al alto un 2 % para cubrir los accesorios que pueda incluir la heladera, obteniendo como medidas finales:

- ✓ Alto: 1360 mm
- ✓ Ancho: 630 mm
- ✓ Profundidad: 473 mm
- ✓ Volumen final aproximado sin accesorios: 405 L

---

Es preciso recordar que este cálculo se refiere a las medidas internas de la heladera; las exteriores serán, por lo tanto, superiores a las mismas debido al aislante necesario para minimizar la entrada de calor desde el exterior.

Como se ha mencionado anteriormente, la ganancia por carga a través de las paredes también depende del tipo de aislante. En la Tabla 3 se resumen las propiedades de cada aislante mencionados en la sección 2.4.b. Aislación.

Tabla 3: Resumen de las propiedades de los aislantes.

<b>Propiedad</b> <b>Aislante</b>	<b>Higroscopicidad</b>	<b>Resistencia al fuego</b>	<b>Resistencia a roedores y micro- organismos</b>	<b>Densidad [kg/m<sup>3</sup>]</b>	<b>Conductividad térmica [W/m·K]</b>
Paja	Muy alta	Muy baja	Muy baja	Sin especificar	Sin especificar
Madera	Muy alta	Muy baja	Muy baja	250 a 750	0,008
Corcho	Muy alta	Muy baja	Muy baja	86 a 250	0,043 a 0,40
Fibra de vidrio	Alta	Alta	Alta	10 a 144	0,03 a 0,04
Lana de roca	Muy baja	Muy alta	Muy alta	Sin especificar	0,038 a 0,042
Arcilla expandida	Muy alta	Muy baja	Muy baja	300 a 450	0,08 a 0,11
PVC	-----	-----	-----	100 a 200	0,035
Poliestileno expandido	-----	Muy baja	-----	10 a 35	0,033 a 0,058
Espuma de poliuretano	Baja	Alta (con aditivos)	Baja	30 a 40	0,023 a 0,040
Perlita expandida	Varía según la pureza	Muy baja	Muy baja	130	0,046

Debido a que los aislantes naturales poseen muchas desventajas en cuanto a la resistencia al fuego, higroscopicidad e higiene, además de corta vida útil, se descartan como posibles aislantes para este proyecto. En cuanto a los aislantes minerales su densidad los convierte en materiales muy pesados para la aplicación que se desea, por lo tanto, se desestimarán. Por último, los aislantes sintéticos son los más utilizados para estas aplicaciones y reúnen las condiciones necesarias. Dentro de éstos se selecciona a la espuma de poliuretano ya que es la más utilizada en el mercado para estas aplicaciones (Electrolux, 2011) y cumple con los requisitos establecidos. También se selecciona la densidad necesaria para obtener la conductividad térmica de  $0,023 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ .

Para ayudar a mejorar la resistencia a la higroscopicidad, a los roedores y microorganismos, así como aumentar su vida útil, se utilizará una envoltura de plástico de polipropileno de 3 mm tanto para el interior como para el exterior. Esto incrementará la aislación siendo su coeficiente de transmisión térmica de 0,1 a  $0,22 \text{ W/m}\cdot\text{K}$  (goodfellow, 2019), sin embargo, debido a que ésta es muy superior a la del aislante se desprecia su efecto de aislación a fin de simplificar los cálculos posteriores.

En este punto ya se ha determinado el tamaño interno de la heladera y el tipo de aislante, la siguiente pregunta lógica a responder es: ¿qué cantidad de aislante se debe utilizar?. Como ya se ha adelantado con anterioridad. para este proyecto, se considera que el flujo de calor a través de las paredes, no debe ser superior al 20 % del calor que se debe extraer de los alimentos almacenados en el interior de la heladera, es decir:

$$Q_2' = 229,72 \frac{\text{kJ}}{\text{h}} \cong 63,81 \text{ W}$$

Aplicando la ecuación 17, mencionada con anterioridad, se puede obtener el espesor del aislante que se requiere:

$$L = \frac{A \times \nabla t \times \lambda}{Q_2}$$

---

Para esta ecuación los valores utilizados son:

- ✓  $A = 3,59 \text{ m}^2$
- ✓  $\nabla t = 25,45 \text{ K}$
- ✓  $\lambda = 0,023 \text{ W/m}\cdot\text{K}$
- ✓  $Q_2' = 63,81 \text{ W}$

Por lo tanto, se obtiene como resultado:

$$L = 0,04 \text{ m} \cong 40 \text{ mm}$$

Debe recordarse que, para la simplificación de los cálculos, se ha admitido la omisión de la aislación que produce el plástico que recubre tanto el interior como el exterior de la heladera, debido a que su conductividad térmica es muy inferior a la del aislante, sin embargo, produce una aislación extra que reducirá aún más la densidad de flujo. De este modo se concluye finalizado el dimensionamiento del aislante de acuerdo a la carga de las paredes establecida con anterioridad.

#### 2.5.e. Intercambiador de calor

De acuerdo con a las características mencionadas con anterioridad en la sección 2.4.c. Intercambiadores de calor, en el presente proyecto, se selecciona para el evaporador, un intercambiador de placas con junta de estanqueidad, debido a que son fácilmente aislados del exterior evitando que absorba el calor del mismo. Además, poseen mayor superficie,

haciéndolo ideal para esta aplicación. El mismo ocupará completamente la pared posterior de la heladera (la pared contraria a la puerta), la cual posee una superficie de  $0,85 \text{ m}^2$ .

Para definir las condiciones de trabajo del equipo se debe considerar que, la extracción del calor es principalmente generada por el cambio de estado del etanol (de líquido a vapor). La temperatura a la cual ocurre dicho cambio es dependiente de la presión, por lo tanto, se puede lograr que el etanol evapore a baja temperatura con la correcta disminución de la presión. Para el condensador, dado que se requiere producir el cambio de estado contrario, la presión debe ser lo mayor posible; con esta diferencia de presión se consigue que el fluido circule por el sistema sin la necesidad de una bomba o algún dispositivo similar. En la Fig. 42, se muestra una gráfica que representa la presión de vapor del etanol en función de la temperatura.

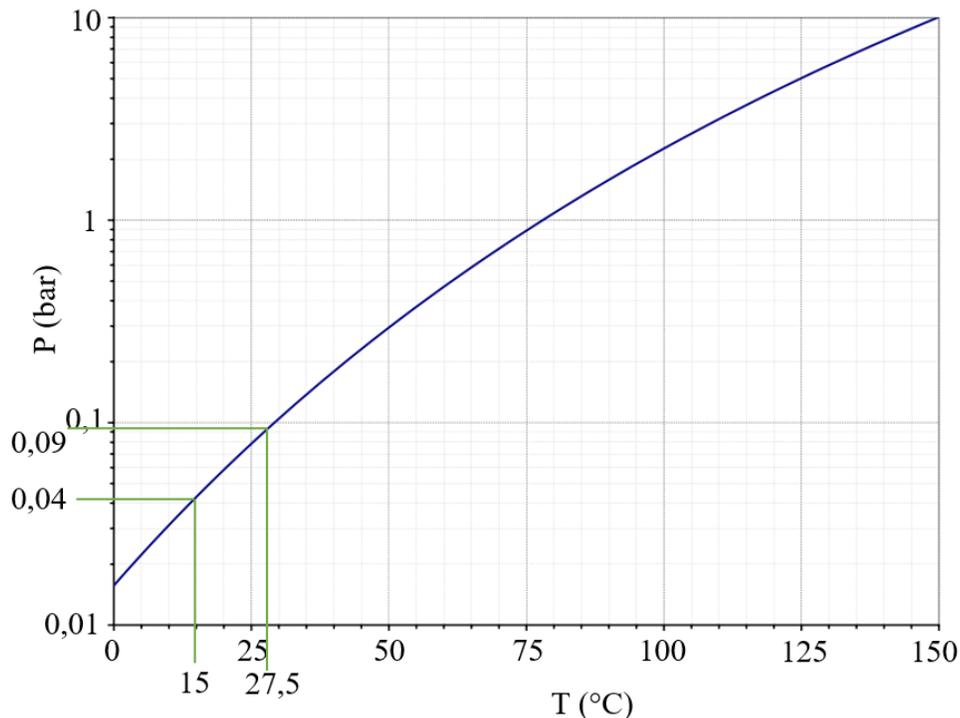


Figura 42: Presión de evaporación del etanol en función de la temperatura.

---

Se supone que la temperatura a la cual ingresa el etanol al evaporador es igual a la temperatura ambiente ( $27,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), esto es debido a que se debe instalar un depósito de líquido anterior al evaporador, el cual permitirá suplir las diferentes variaciones en la carga del equipo, y, por lo tanto, la necesidad de refrigerante.

Debido a que se produce el cambio de fase en el interior del evaporador, la temperatura de salida de este será igual a la de ingreso. La presión que corresponde a esta temperatura para producir la evaporación del etanol es de aproximadamente  $68,25\text{ mmHg}$ , sin embargo, se debe llevar el equipo a una presión aún menor, para lograr la evaporación del etanol a la menor temperatura posible.

Debe tenerse en cuenta que, por la forma de la curva mostrada en la Fig. 42 si se alcanza una presión menor a la necesaria para producir la ebullición del etanol por debajo de los  $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ , se requiere “alto vacío” para reducir en una pequeña fracción la temperatura de ebullición, por lo tanto se toma como límite los  $15\text{ }^{\circ}\text{C}$  como temperatura de ebullición, a lo cual le corresponde una presión de  $30\text{ mmHg}$ .

Si bien una vez que el interior de la heladera se encuentre a una temperatura menor que la ambiente, la velocidad de evaporación disminuirá, por lo tanto, el siguiente punto consiste en determinar la velocidad de dicha evaporación a la presión y temperatura del evaporador. Para esto se considera como base que la velocidad relativa de evaporación del etanol es de 2,4 (con respecto al butil acetato). Según la norma ASTM D 3539 – 87 para que se produzca la evaporación del 90 % de  $0,70\text{ mL}$  de Methyl n-propyl ketone transcurren  $200\text{ s}$ , el cual posee el mismo valor de evaporación relativa que el etanol (2,4); esto es a temperatura y presión atmosférica.

Llevado dichos valores a una hora y suponiendo una relación lineal, entre la cantidad evaporada y el tiempo, se tiene que se evaporarán  $11,34\text{ mL}\cdot\text{h}$  a presión y temperatura atmosférica, con un flujo de aire de  $21\text{ L/min}$ . Sin embargo, en este caso la presión seleccionada para el evaporador es aproximadamente 25 veces menor que la atmosférica,

---

produciendo que aún a la temperatura de conservación de la heladera, el etanol esté cercano a la temperatura de ebullición. Además, se debe tener en cuenta que el volumen total del evaporador, es muy superior al volumen de etanol que se debe evaporar para lograr la extracción del calor necesaria, estos conjuntos de factores se traducen en la evaporación del etanol a mayor velocidad que la dada por la norma ASTM D 3539 – 87.

Hasta aquí, ya se ha definido la superficie del evaporador ( $0,85 \text{ m}^2$ ) y la cantidad de fluido que se debe evaporar por hora (1,42 L de etanol), por lo tanto, se procederá a obtener el coeficiente global de transmisión del calor (K), para luego compararlo con valores aproximados de otros equipos e investigaciones, y de este modo, determinar si su funcionamiento será el correcto.

El factor K determina la eficiencia del intercambiador, puede tomar cualquier valor por sobre cero y depende de muchas variables, tales como, coeficientes de convección de ambos lados de las placas, resistencia de las placas a la suciedad, conductividad térmica del material, área en contacto con los fluidos, espesor de la pared, las características del fluido, del flujo y otros factores relacionados con la forma constructiva del equipo (Salazar Valdez, 2001).

No es un valor constante y, debido a la complejidad de su obtención, el valor teórico es muy diferente al real, por lo tanto, se suele considerar como constante, y en lugar de calcularlo se toman valores prácticos de experimentos realizados por los fabricantes (Amigo Martín, 2000). Cuanto mayor es este valor, mejor es el funcionamiento del intercambiador, ya que como se puede ver en la ecuación 20 la potencia térmica intercambiada es directamente proporcional a K.

El primer paso consiste en obtener la diferencia de temperaturas en ambos lados del evaporador mediante las ecuaciones 26 y 27:

$$\Delta t_1 = t_{f2} - t_{f1} \quad (26)$$

$$\Delta t_1 = (27,5 - 27,5) K$$

$$\Delta t_1 = 0 K$$

$$\Delta t_2 = t_{c2} - t_{c1} \quad (27)$$

$$\Delta t_2 = (2 - 27,4) K$$

$$\Delta t_2 = -25,41 K$$

Donde:

- ✓  $t_{f1}$  = temperatura del fluido frigorígeno a la entrada del evaporador
- ✓  $t_{f2}$  = temperatura del fluido frigorígeno a la salida del evaporador
- ✓  $t_{c1}$  = temperatura máxima que se tendrá en el interior del refrigerador, igual a la ambiente
- ✓  $t_{c2}$  = temperatura a alcanzar en el interior del refrigerador, igual a la de conservación de los alimentos

El signo negativo indica que la temperatura ha disminuido, por lo tanto, el aire del interior de la heladera cedió calor. A continuación, debería calcularse la diferencia media logarítmica de la temperatura. Sin embargo, debido a que se considera que la temperatura del etanol no varía, se calculará solamente la diferencia de temperatura con el interior de la heladera. La potencia térmica intercambiada, es decir, la cantidad de calor cedido por el aire y absorbido por el etanol viene dada por la ecuación 28.

$$Q = K \times S \times \Delta t_2 \quad (28)$$

$$1513,42 \frac{kJ}{h} = K \times 0,85 m^2 \times |-25,4K|$$

$$K = 70,1 \frac{kJ}{h \times m^2 \times K}$$

Donde:

- ✓ Q = Cantidad de calor a extraer (kJ·h)
- ✓ K = Factor que determina la eficiencia del intercambiador (kJ/(h·m<sup>2</sup>·K))
- ✓ S = Superficie del intercambiador (m<sup>2</sup>)
- ✓ Δt<sub>2</sub> = Diferencia de temperatura en el interior de la heladera, entre la temperatura máxima y la de conservación de los alimentos (K)

Para comparar este resultado se toma como referencia lo expuesto por *Salazar Valdez, 2001*, donde, si bien no se otorga el valor preciso de K que se requiere, se exponen algunos números orientativos, los cuales resultan superiores a los obtenidos; esto quiere decir que las demás variables definidas permiten que el intercambiador requiera un bajo coeficiente de transmisión del calor; por lo tanto, se considera que su funcionamiento es adecuado. Por otro lado, según lo expuesto en Mariela S., Díaz J., la superficie que se utiliza para este caso es muy superior a la seleccionada por los autores. Es debido a estas comparaciones que se establece como adecuado el dimensionamiento del evaporador.

La superficie de la pared en la cual se decide instalar el intercambiador es de 0,85 m<sup>2</sup>. Si se establece una separación de 3 mm entre las placas, éste podrá contener 2,5 L de etanol; y con una separación de 5 mm, 4,25 L. La cantidad de etanol a evaporar se puede limitar cerrando las electroválvulas en la entrada y salida del evaporador. Por lo tanto, tener un intercambiador de mayor volumen que la cantidad de refrigerante teórico a evaporar, no afectará el funcionamiento del equipo. Esto es, gracias a que en el peor de los casos, quedará sobredimensionado, con la posibilidad de corregir el flujo de etanol luego de una prueba práctica, con las electroválvulas correspondientes, por lo tanto, se decide adoptar el espacio de 3 mm.

#### 2.5.f. Adsorbedor

A continuación, se define la cantidad de adsorbato requerido, el volumen necesario para albergar a los componentes y la temperatura necesaria.

Tal como se ha mencionado anteriormente, el par de trabajo elegido para el desarrollo del proyecto es el carbón activado/etanol. El primer parámetro a determinar es la saturación del adsorbente, ya que una vez saturado se deberá proceder a iniciar el ciclo de desorción, limitando, por lo tanto, el tiempo del ciclo. La concentración ( $x$ ) es la relación entre la masa adsorbida y la masa del adsorbente tal como se muestra en la ecuación 29 (Gonzales Martín, 2006) (Pino F., 2011).

$$x = \frac{Kg_{adsorbidos}}{Kg_{adsorbente}} \quad (29)$$

De las ecuaciones planteadas en la sección 2.4.d. Adsorción, la que mejor se adapta a los sistemas de refrigeración por adsorción, es la de Dubinin - Astakhov y por lo tanto, esta será la utilizada en el desarrollo. El modelo se idealiza mediante el supuesto de que todo el vapor de etanol generado es adsorbido por el carbón activado, es decir, el vapor de etanol no debería ser capaz de atravesar completamente el adsorbente de un adsorbedor antes de realizar el cambio de adsorbedor.

Por los resultados obtenidos por Br. Chávez Carbajal Jessyca et. al. – 2013 utilizando un carbón activado de hulla bituminosa, se logra adsorber 0,297 g de etanol por cada gramo de carbón activado. Con el mismo carbón, pero luego de haberle realizado un proceso de apertura de los poros, los resultados que fueron obtenidos arrojaron una adsorción de 0,364g de etanol por cada gramo de carbón activado. Con la utilización de carbón activado proveniente de la cáscara de coco, 0,163 g de etanol por cada gramo de carbón activado.

Pese a una mayor adsorción obtenida en el carbón tratado, las menores temperaturas para el proceso se dan con el carbón de hulla bituminosa, por lo tanto, se lo selecciona para

el desarrollo del proyecto. Teniendo en cuenta estos resultados, se puede calcular el exponente de la isoterma de adsorción para el par de trabajo seleccionado, de acuerdo con la fórmula de Freundlich (ecuación 30); la cual, si bien es utilizada para distribuciones heterogéneas en los sitios de adsorción, es la isoterma que mejor se adapta a la mayoría de los adsorbentes heterogéneos (Br. Chávez Carbajal Jessyca et. al.; 2013).

$$n = Y \times c^m \quad (30)$$

$$n = 0,15 \times 0,297^{0,51}$$

$$n = 0,081$$

Donde:

- ✓  $n$  = Exponente de la isoterma de adsorción
- ✓  $Y$  = Constante de equilibrio
- ✓  $c$  = Concentración de equilibrio
- ✓  $m$  = Exponente positivo, pero normalmente no entero

Los valores de  $Y$  (0,15) y  $m$  (0,51) se obtienen por Rudy Jones, 2012 y para  $c$  se considera 0,297 gr de etanol por cada gramo de carbón activado (Rudy Jones; 2012).

Con este exponente y los datos extraídos de Br. Chávez Carbajal Jessyca et. al., 2013 se puede proceder a la obtención del coeficiente de afinidad para el par de trabajo elegido, se considerará constante a fin de simplificar los cálculos. Esto se logra partiendo de la ecuación 14, esta es, la de Dubinin y Astakhov (Br. Chávez Carbajal Jessyca et. al.; 2013).

$$X = W_0 \times \rho \times e^{-D \times \left( T \times \ln \frac{P}{P} \right)^n}$$

$$0,297 = 3,76 \times 10^{-4} \times 790 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times e^{-D \times \left( 296,15 \text{ K} \times \ln \frac{1359 \text{ kg/m}^2}{10330 \text{ kg/m}^2} \right)^{0,081}}$$

Obteniendo como resultado un coeficiente  $D = -0,056$ .

Con los datos obtenidos, se puede proceder a calcular la concentración que tendrá el adsorbato en las diferentes etapas del ciclo, esto es,  $X_1$  luego de la adsorción y  $X_2$  después de la desorción. Sin embargo, aún se debe definir la presión de trabajo del condensador, que debe ser mayor a la del evaporador para permitir que el etanol se condense a una mayor temperatura. También influirá en el título que poseerá el adsorbente durante el ciclo, por lo tanto se toma una presión en el condensador de 200 mmHg, con lo cual se produce la condensación a temperaturas inferiores a los 40 °C, es decir, el etanol puede condensarse a temperatura ambiente.

El hecho de que esta temperatura sea superior a la del ambiente considerada en un inicio, esto es 27,5 °C, es ventajoso, debido a que como ya se ha explicado, es necesario un depósito de líquido para compensar la variación en la carga del equipo, que se encontrará expuesto al ambiente. Si la presión del condensador es menor y, por lo tanto, la temperatura de condensación muy cercana a la del ambiente, se producirá la evaporación del etanol en el depósito de líquido, dando como resultado fallas en el funcionamiento del equipo durante la temporada de verano, época en el cual la temperatura ambiente puede ser superior a la estimada.

Los parámetros de cálculo para  $X_1$  son:

✓  $W_0 = 0,297 \text{ g adsorbato/g adsorbente} = 3,759 \times 10^{-4} \text{ m}^3 \text{ adsorbato/kg adsorbente}$

- ✓  $\rho = 790 \text{ kg/m}^3$
- ✓  $D = -0,056$
- ✓  $T_1 = 15 \text{ }^\circ\text{C} = -260,15 \text{ K}$
- ✓  $\Pi_1 = 30 \text{ mmHg}$
- ✓  $P_1 = 200 \text{ mmHg}$
- ✓  $n = 0,081$

$$X_2 = W_0 \times \rho \times e^{-D \times \left( T \times \ln \frac{\Pi}{P} \right)^n}$$

$$X_2 = 3,759 \times 10^{-4} \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \times 790 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times e^{-(-0,056) \times \left( -260,15 \text{ K} \times \ln \frac{30 \text{ mmHg}}{200 \text{ mmHg}} \right)^{0,081}}$$

$$X_2 = 0,326$$

Debido a que la ecuación de Dubinin - Astakhov no considera el tiempo y el calor suministrado para producir la desorción, no puede ser utilizada para obtener el valor del título reinante en el adsorbedor luego de la desorción, el cual depende de dichos parámetros. El cálculo teórico de este valor requiere de un estudio con mayor profundidad sobre el fenómeno de la adsorción, que escapa de los objetivos y la finalidad del proyecto desarrollado.

Por lo expresado anteriormente no se puede garantizar que la desorción sea completa, aun así, más adelante, los cálculos se basarán en la transmisión del calor necesario para dicho proceso. Por lo tanto, en base a la investigación realizada y la interpretación de los resultados de los trabajos mencionados en el Apéndice n° 2: Estado de la técnica se estima que el título reinante en el adsorbedor luego de la desorción será del 15 % del valor de  $X_1$ .

Con los valores de  $X_1$  y  $X_2$  se puede obtener la cantidad de adsorbente que se requiere para la cantidad de etanol evaporado, de acuerdo con la ecuación 31.

$$\Delta X = \frac{\text{Kg}_{\text{adsorbidos}}}{\text{Kg}_{\text{adsorbente}}} \quad (31)$$

$$Kg_{adsorbente} = \frac{Kg_{adsorbidos}}{\Delta X}$$

$$Kg_{adsorbente} = \frac{1,80 \text{ Kg etanol}}{(0,326 - 0,15 \times 0,326) \frac{Kg \text{ etanol}}{Kg \text{ carbón activado}}}$$

$$Kg_{adsorbente} = 6,50 \text{ kg de carbón activado}$$

Debido a las suposiciones realizadas, es probable que el adsorbedor esté sobredimensionado en cuanto a la cantidad de carbón activado, produciendo que nunca se llegue a la saturación del mismo. Sin embargo, esto no es desventajoso ya que, en el peor de los casos (cuando el sobredimensionamiento es verdadero) no se producirán fallas en el sistema. Si la cantidad de carbón activado fuese deficiente quedaría vapor de etanol sin condensar y se produciría un fallo en las presiones establecidas para el funcionamiento del circuito. Sin embargo, los resultados de los cálculos realizados concuerdan con los valores obtenidos de Mariela S., Díaz J. (2012), considerando una relación lineal entre la relación de la cantidad de carbón activado y de refrigerante que necesita cada caso.

El sistema del adsorbedor que contendrá al carbón activado; permitirá la circulación del etanol y del fluido que aportará el calor necesario para el proceso desorción. Estará formado por tubos cuya longitud es igual de la profundidad de la heladera (47,2 cm), con un diámetro de 1 3/4" (44,5 mm de diámetro exterior, y una pared de 1,56 mm), en el interior de estos tubos se colocará el carbón activado hasta su completo llenado. Concéntricamente a este se colocará un tubo de 2" (50,8 mm de diámetro exterior, y una pared de 1,51 mm de espesor). Por el espacio que se encuentra entre ambos tubos, circulará el agua de calefacción para el proceso de desorción.

Debido a las características de funcionamiento que debe tener cada tubo, se decide que el tubo interior sea de aluminio, de modo que permita una mayor eficiencia en la transferencia de calor al carbón activado. Mientras que el tubo exterior será de acero, permitiendo obtener

una mayor resistencia mecánica, la cual es necesaria debido a que se encuentra expuesto a la intemperie, pudiendo ser dañado por un golpe no intencional. En la Fig. 43a y 43b, se puede observar el esquema en corte del adsorbedor. A continuación, se procederá a calcular la cantidad de tubos necesarios para contener el carbón activado.

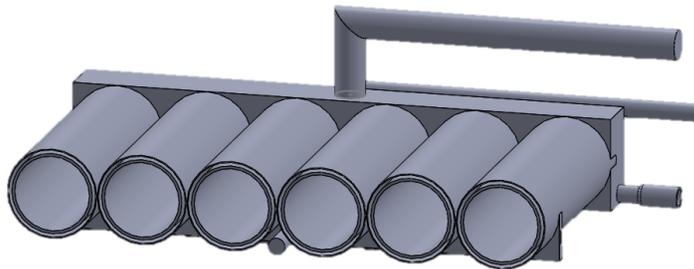


Figura 43a: Corte vertical del adsorbedor.

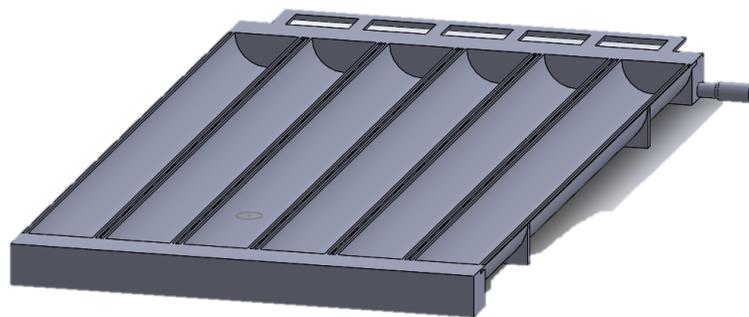


Figura 43b: Corte horizontal del adsorbedor.

El volumen que ocupa el carbón activado ( $V_1$ ) es el obtenido por medio de la ecuación 32.

$$V_1 = \frac{kg_{adsorbente}}{\rho} \quad (32)$$

$$V_1 = \frac{6,50 \text{ kg}}{1400 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}$$

$$V_1 = 4,64 \times 10^{-3} \text{ m}^3 = 4639,90 \text{ cm}^3$$

De acuerdo con la ecuación 33, cada tubo tiene un volumen ( $V_2$ ) de:

$$V_2 = \pi \times \frac{D^2}{4} \times l \quad (33)$$

$$V_2 = \pi * \frac{[44,45 - (2 \times 1,56)]^2 \text{ cm}^2}{4} \times 47,2 \text{ cm}$$

$$V_2 = 633,23 \text{ cm}^3$$

Y la cantidad de tubos es obtenida por medio de la ecuación 34.

$$N = \frac{V_1}{V_2} \quad (34)$$

$$N = \frac{4639,90 \text{ cm}^3}{633,23 \text{ cm}^3}$$

$$N = 7,33 \cong 7$$

Como se mencionó en un inicio, se utilizarán dos adsorbedores iguales para permitir el trabajo intermitente de cada uno, cuyo funcionamiento correctamente coordinado permitirá que en uno se produzca la adsorción, a la vez que en el otro se realiza la desorción. La disposición elegida consiste en colocar ambos adsorbedores sobre el techo de la heladera, uno al lado del otro. Debido a que el área que brinda dicha superficie no es suficiente, se decide compactar el carbón activado en 6 tubos.

El área ocupada por cada adsorbedor es de 472 mm \* 304 mm, mientras que la superficie disponible en el lugar seleccionado para su instalación es de 472 mm \* 630 mm, es decir, con el formato de instalación planteado, se pueden separar ambos adsorbedores por

una capa de aislante de aproximadamente 22 mm, cuya única funcionalidad, es evitar el paso del calor del adsorbedor que se encuentra en la etapa de desorción hacia el otro.

También debe tenerse en cuenta que, debido a que en la parte superior de la heladera se tendrá una temperatura mayor que la atmosférica utilizada para el cálculo, se deberá colocar una capa de mayor espesor de aislante. En este caso, se utilizarán 70 mm de espesor de aislante, en lugar de los 40 mm planteados en un inicio. Cada tubo contendrá entonces, 1 kg de carbón y adsorberá, aproximadamente, 0,243 kg de etanol en cada ciclo de 1 hora de duración.

La cantidad de calor que se debe suministrar al carbón activado para producir la desorción ( $Q_{des}$ ), es la necesaria para elevar la temperatura del etanol, que se encuentra a la temperatura y presión del evaporador (15 °C y 30 mmHg), a la temperatura y presión del condensador (40 °C y 200 mmHg), esto se ve expresado en la variación de la entalpía ( $\Delta H$ ). El cálculo en este caso es realizado en tres partes: la primera comprende la diferencia de calor necesaria para elevar la temperatura del etanol de 15 °C a 40 °C ( $Q_A$ ); la segunda, la cantidad necesaria para evaporar el etanol ( $Q_B$ ) y la tercera, la cantidad necesaria para elevar la temperatura del carbón activado de 15 °C a 40 °C ( $Q_C$ ). Esto se ve expresado en las ecuaciones 35 a 38.

$$Q_{des} = Q_A + Q_B + Q_C \quad (35)$$

$$Q_A = m_e \times C_{pe} \times \Delta t \quad (36)$$

$$Q_B = m \times Q_V \quad (37)$$

$$Q_C = m_{ca} \times C_{pca} \times \Delta t \quad (38)$$

Donde:

- ✓  $m_e$  = Masa de etanol (1,80 kg)
- ✓  $C_{Pe}$  = Calor específico a presión constante del etanol (2,4 kJ/(kg·K))
- ✓  $\Delta t$  = Variación de la temperatura (40 °C – 15 °C = 25 °C)
- ✓  $Q_v$  = Calor latente de evaporación (841 kJ/kg) a presión constante
- ✓  $C_{Pca}$  = Calor específico a presión constante del carbón activado (0,25 kJ/(kg·K))
- ✓  $M_{ca}$  = Masa del carbón activado (6,5 kg)

Por lo tanto se obtiene:

$$Q_A = 108,00 \frac{kJ}{h}$$

$$Q_B = 1513,8 \frac{kJ}{h}$$

$$Q_C = 40,62 \frac{kJ}{h}$$

$$Q_{des} \cong 1662,42 \frac{kJ}{h}$$

En los resultados se ha agregado la unidad h a los valores, dado que el cálculo se realiza para un ciclo, el cual, como ya se ha definido inicialmente, tiene una duración de 1 h.

$Q_{des}$  es la cantidad total de calor a extraer en los seis tubos que componen el adsorbedor, por lo tanto, el calor por cada uno de ellos es de 277,07 kJ·h.

---

### 2.5.g. Condensador

Esta parte del sistema, cumple la función de condensar los vapores de etanol provenientes de la desorción desarrollada en el adsorbedor. A diferencia del adsorbedor donde se tienen dos equipos idénticos que funcionan de forma intercalada, en este caso se tendrá uno solo y de uso continuo, ya que, al dejar de recibir el vapor de uno de los adsorbedores, comenzará a recibir el vapor del otro. Los condensadores no son más que intercambiadores de calor al igual que los evaporadores, con la diferencia de que el flujo de calor en este caso es en sentido contrario. En el evaporador se absorbe el calor de un recinto o fuente caliente, para producir la evaporación del líquido que se circula, por lo general, por el interior del evaporador. En el condensador, se busca la eliminación del calor del fluido que circula en su interior, logrando una disminución de la temperatura y la condensación del mismo.

La mayoría de los fabricantes de equipos de refrigeración utilizan un intercambiador de calor de tubos con aletas como condensador. Estos equipos permiten la liberación de calor del fluido a condensar mediante un intercambio de calor vapor-aire, con el menor espacio posible y dando lugar a la utilización de forzadores de aire en caso de ser necesarios, lo cual permite una mayor velocidad de intercambio de calor.

En este caso se decide utilizar un intercambiador de calor de tubos con aletas sin forzador de aire como condensador. El mismo ocupará exteriormente la pared posterior del refrigerador, estando separado de la misma 30 mm a fin de permitir la circulación natural del aire. En cuanto a sus dimensiones se debe tener en cuenta que, si los tubos son de menor diámetro, el intercambio de calor será más efectivo producto del mayor contacto entre el vapor del etanol y los tubos, y entre los tubos y el aire exterior.

El volumen de etanol a evaporar es de 1,42 L, y se seleccionan tubos de 5 mm de diámetro interior, por donde circulará el vapor del etanol. Anteriormente en la sección 2.5.d

---

Dimensiones internas y aislación, se determinó que las medidas internas de la heladera son: 1360 mm de altura y 630 mm de ancho.

El condensador será instalado en la misma pared que el evaporador, pero del lado exterior, permitiendo que pueda dar contra una pared y, por lo tanto, no se verá a simple vista, lo cual es favorable estéticamente debido a su forma constructiva. Con una separación de 30 mm entre los tubos y recorriéndolo en sentido horizontal, con una leve inclinación se permitirá la circulación del fluido condensado por efecto de la gravedad. Con esta disposición, se realizarán 31 cambios de dirección del tubo, lo cual permite ocupar casi la totalidad del espacio previsto.

Utilizando tubos de aluminio de 5 mm, el volumen de etanol que puede contener el condensador es de 0,56 L, es decir, aproximadamente el 39,5 % del volumen máximo de etanol que circulará por el sistema. Esto es adecuado, ya que la evaporación no se producirá de forma repentina e inmediata, sino que será paulatina a lo largo del período de desorción.

Al multiplicar el ancho de la heladera por la cantidad de cambios de dirección del tubo, se obtiene que la longitud del mismo deber ser de aproximadamente 28,35 m. Las aletas de los tubos también serán de aluminio separadas por una distancia de 1 cm cada una, las mismas atravesarán transversalmente los tubos, con un espesor de 0,5 mm y un ancho de 10 mm. En la Fig. 44, se puede observar el diseño mencionado.



Figura 44: Condensador

#### 2.5.h. Depósito de líquidos

Su función es la de contener una cierta cantidad de etanol que garantice el suministro constante al sistema, y pueda compensar las diferencias de carga que pueden producirse a lo largo del día y del año, así como también, disminuir aún más la temperatura del etanol proveniente del condensador.

En la práctica, por lo general, se estima que su volumen debe ser igual a la suma de todos los volúmenes de etanol en los equipos individuales, incluyendo las cañerías, multiplicados por un factor de ampliación que va de 3 a 5, a fin de evitar el ingreso de fluido

---

caliente al circuito. Se considera que el volumen de las cañerías será de un 10 % de la suma de los volúmenes de los equipos. Los volúmenes a considerar son:

- ✓ Evaporador: 2,57 L
- ✓ Adsorbedor: 1,456 kg o 2,60 L
- ✓ Condensador: 0,56 L
- ✓ Tuberías: 10 % de la suma de los valores anteriores, aproximadamente 0,57 L

Esto da como resultado un volumen de 6,3 L, que al ser modificado por el factor mencionado anteriormente (3) se tiene un volumen de aproximadamente 19 L. Debido a que el etanol condensado pasará al depósito de líquidos por medio de efecto de la gravedad, éste deberá ubicarse en la parte inferior del refrigerador; ocupará toda el área de la base para que sirva de soporte al refrigerador e incremente lo menor posible sus dimensiones. De este modo las dimensiones del depósito serán:

- ✓ Ancho: 630 mm
- ✓ Largo: 470 mm
- ✓ Alto: 70 mm

Obteniendo así la superficie suficiente para contener los 19 L de etanol necesarios para el funcionamiento del equipo.

---

## **2.6. Selección y cálculo de los diferentes componentes del sistema para el suministro de calor requerido por la desorción**

### 2.6.a. Termotanque solar

Anteriormente se ha adelantado que la calefacción del adsorbedor se realizará por medio de agua caliente proveniente de un termotanque solar. A continuación, se expresa el motivo de esta selección.

Debido a las condiciones de funcionamiento del equipo de refrigeración que se han determinado en el punto 4.3.c, principalmente en la necesidad de reducir el tiempo del ciclo de 24 h a 1 h mediante la utilización del doble adsorbedor, se requiere un suministro de calor de forma continua para producir la desorción, incluso en los períodos nocturnos y días nublados.

Según la información provista por GISEner, para la ciudad de San Francisco (Longitud: 062°8'0.31" Latitud: S31°24'48.42"), en promedio a lo largo de todo el año, la radiación solar tiene una duración de 11,5 h, siendo de 13,5 h para los períodos de verano y de 9,5 h para los períodos de invierno; estos valores son aproximados, debido a la variación en las condiciones climáticas y otros factores que influyen tanto directa, como indirectamente sobre la radiación solar (GISEner, 2019).

Es por estas condiciones que se elige un termotanque solar, el cual permitirá el almacenamiento de agua caliente para ser utilizada como fuente de calor en el proceso de desorción. A continuación, se procede a calcular las temperaturas de trabajo del equipo y seleccionar el termotanque solar adecuado para la aplicación que se desarrolla.

Según los catálogos obtenidos del fabricante Termosol<sup>®</sup>, los termotanques solares mantienen la temperatura del agua en su depósito, a un promedio de 50 °C en invierno y de

---

85 °C en verano. Se considera que la temperatura del agua al ingresar al adsorbedor es de 85 °C y sale a una temperatura de 45 °C.

Como el adsorbedor se encuentra expuesto al ambiente, su eficiencia se considera del 50 %, es decir, solamente la mitad del calor que pueda suministrar el agua al adsorbedor será transmitida al mismo. Aplicar una aislación a los tubos de los adsorbedores no es viable, dado que, durante la desorción se debe suministrar calor, sin embargo, durante la adsorción el calor debe ser liberado, provocando que la mayor eficiencia en el aprovechamiento del calor del agua se vea opacada por la menor eficiencia en la adsorción.

No obstante, se considera prudente utilizar una cubierta plástica, con agujeros de no más de 7 mm de diámetro, para ventilación como recubrimiento de los adsorbedores, de este modo se evitará cualquier contacto, sea intencional o no, de una persona con los tubos que contienen agua caliente. Más adelante se abordarán las cuestiones constructivas con mayor profundidad.

Con el salto de temperatura del agua entre la entrada y la salida del adsorbedor planteado anteriormente, y la cantidad de calor que se debe suministrar al mismo para producir la desorción (1662,42 kJ), se puede obtener la masa de agua a circular por el adsorbedor, por medio de la ecuación 39:

$$Q_{des} = m \times C_v \times \Delta t \times e \quad (39)$$

Donde:

- ✓  $Q_{des}$  = Calor que debe ceder el agua, igual al calor necesario para la desorción
- ✓  $m$  = Masa de agua que debe circular
- ✓  $C_v$  = Calor específico del agua

- ✓  $\Delta t$  = Salto de temperatura del agua
- ✓  $e$  = Eficiencia del intercambiador de calor

$$1662,42 \frac{kJ}{h} = m \times 4,190 \frac{kJ}{kg \times K} \times [(-188,15) - (-228,15)] K \times 0,5$$

$$m \cong 20 \frac{kg}{h} H_2O$$

Este es el caudal másico, y el caudal volumétrico (suponiendo una densidad igual a  $1000 \text{ kg/m}^3$ ) es de:

$$Q_V \cong 20 \frac{L}{h}$$

Anteriormente se ha adelantado que se debe almacenar agua caliente para permitir el suministro de calor, necesario para la desorción, durante los períodos de menor radiación, lo cual determina la capacidad del termotanque. Para este caso, se consideran las horas de radiación promedio anual, para la ubicación mencionada, es decir, 11,5 h, por lo tanto, se debe almacenar suficiente agua caliente para suministrar el calor necesario las 12,5 h restantes. Al multiplicar el caudal de agua por el tiempo, se obtiene la capacidad de almacenamiento que se requiere. Esto se expresa en la ecuación 40:

$$C = Q_v \times t \tag{40}$$

$$C = 20 \frac{L}{h} \times 12,5 h$$

$$C = 250 L$$

---

Se puede deducir con relativa facilidad que el equipo se encuentra sobredimensionado para los períodos de verano, donde la duración de la radiación solar es mayor que el promedio anual, y subdimensionado para los períodos de invierno, durante los cuales la duración de la radiación solar es menor al promedio anual. Sin embargo, durante los períodos invernales las temperaturas ambiente son menores, los alimentos ingresan a menor temperatura al refrigerador y la carga por cambio de aire y por pérdidas del aislante son menores, lo que conduce a que se evapore menor cantidad de etanol y por lo tanto, se requiera menor cantidad de calor para la desorción.

Del fabricante Termosol<sup>®</sup> se selecciona entonces, el equipo *Termosolar Compacto de Acero Inoxidable*, con una capacidad de 240 L, siendo de sus productos el que posee una capacidad de almacenamiento más próxima a los cálculos realizados (Termosol, 2016).

Con la finalidad de aprovechar lo más posible el calor remanente del agua que sale del adsorbedor a 45 °C, esta será reenviada al termotanque para recalentarse, debido a que se encuentra a una temperatura superior a la del ambiente, de este modo se mejora la eficiencia del equipo.

Los cálculos anteriores han sido realizados, bajo el supuesto de que el termotanque, cada día, alcanza su temperatura promedio de verano, sin embargo, esto no ocurre en invierno. Al hablar de temperatura promedio, se da a entender que habrá días en los cuales se alcancen mayores temperaturas y días en los que la temperatura alcanzada sea menor a la establecida.

Por estos motivos, se decide instalar una resistencia eléctrica en cada adsorbedor, a fin de suministrar el calor necesario faltante para producir la desorción. Las resistencias serán controladas individualmente, de modo que se suministre el calor al tubo del adsorbedor que lo requiera, evitando suministrar calor por medio de las resistencias a aquellos tubos que se encuentren a la temperatura adecuada.

De forma teórica el vapor de etanol se distribuiría uniformemente por los tubos al salir del evaporador, en la práctica esto se ve condicionado por variables constructivas, tales como la distancia desde la salida del evaporador hasta la entrada de cada tubo, la curvatura de los caños, el estado de las cañerías, etc. Por lo tanto, la distribución del etanol no necesariamente será equitativa entre los tubos, produciendo que la cantidad de calor necesario para la desorción no sea la misma en cada uno de ellos. El control individual de las resistencias debería permitir adecuar dicho suministro de calor adaptándose al funcionamiento de forma dinámica.

Suponiendo que el agua ingresa al adsorbedor a la temperatura promedio de invierno (50 °C) y sale a los 45 °C estipulados, el calor que suministra el mismo caudal de agua obtenido con anterioridad es el calculado por medio de la ecuación 41.

$$Q_{H_2O} = m \times C_v \times \Delta t \times e \quad (41)$$

$$Q_{H_2O} = 20 \frac{kg}{h} \times 4,179 \frac{kJ}{kg \times K} \times (50 - 45)K \times 0,5$$

$$Q_{H_2O} = 208,95 \frac{kJ}{h}$$

Siendo el calor a extraer de 1662,42 kJ·h, se requiere que la resistencia eléctrica suministre el calor faltante, es decir, 1453,47 kJ·h o 403,65 W·h. Este calor mencionado, es el necesario para los seis tubos del adsorbedor, por lo tanto, cada uno requeriría un suministro de 67,27 W·h. Se decide no aumentar el caudal de agua caliente, y reducir de este modo el calor suministrado por la resistencia, debido a que esto demandaría un depósito de mayor capacidad, incrementando el costo inicial de la instalación y una mayor demanda de espacio físico requerido para la instalación del equipo.

La empresa SCRAM® dentro de sus productos ofrece resistencias flexibles a medida. Estas son cables de resistencia, cuya potencia se puede regular de acuerdo a la longitud del

cable, lo cual en conjunto con la flexibilidad las hacen ideales para la aplicación que se requiere. El producto que ofrece posee una potencia que va desde los 10 W/m a los 50 W/m con una alimentación de 220 V o 24 V (SCRAM, 2019). En primer lugar, se selecciona la tensión de alimentación de 24 V debido a que es la tensión de seguridad establecida para la República Argentina (ENRE, 2019), permitiendo utilizar baterías sin la necesidad de elevar la tensión.

Si se selecciona la máxima potencia ofrecida por el fabricante (50 W/m), de acuerdo con la ecuación 42:

$$P_R = P_r \times D \quad (42)$$

Donde:

- ✓  $P_R$  = Potencia requerida para suministrar la energía calórica necesaria para la desorción
- ✓  $P_r$  = Potencia de las resistencias
- ✓  $D$  = Longitud de los conductores

$$67,27 \text{ W} = 50 \frac{\text{W}}{\text{m}} \times D$$

$$D = 1,35 \text{ m}$$

Se requiere que las resistencias tengan una longitud de 1,35 m. Las mismas serán ubicadas junto a la pared exterior del tubo interno del adsorbedor, formando un helicoide sobre su superficie. De este modo, se evita el contacto directo de las resistencias (a alta temperatura) con el etanol, lo cual podría generar un riesgo de incendio.

### 2.6.b. Suministro de energía para las resistencias

Como se ha mencionado con anterioridad, la energía eléctrica requerida por las resistencias será suministrada por paneles solares. Permitiendo de este modo que el refrigerador pueda ubicarse en aquellas zonas, donde el acceso a la red de energía eléctrica es limitado debido a la falta de la infraestructura necesaria.

Durante el período invernal, la utilización de las resistencias será máxima, producto de las menores temperaturas del agua almacenada en el termotanque solar. Por lo tanto, se debe prever el almacenaje de la energía eléctrica, de modo que se asegure el suministro de calor necesario.

Las seis resistencias seleccionadas (una por cada tubo del adsorbedor), trabajando en conjunto a su máxima potencia demandarán una energía máxima de 403,62 W. Es en base a este valor que se debe dimensionar la instalación solar fotovoltaica (paneles solares fotovoltaicos y baterías), de modo que se garantice el suministro de energía eléctrica necesario para las resistencias calefactoras. Estos paneles aprovechan la radiación solar para la generación de energía eléctrica.

El espectro de radiación solar se puede dividir en tres partes de acuerdo a su longitud de onda, de las cuales cada una transfiere una porción de la energía total, esto se puede ver en la Tabla 4.

Tabla 4: Espectro de radiación.

Zona del espectro	Longitud de onda (en $\mu\text{m}$ )	Porcentaje de la energía total (en %)
Ultravioleta	$X \leq 0,4$	14
Visible	$0,4 < X \leq 0,7$	46
Infrarrojo	$0,7 < X$	40

De los diferentes espectros, los que se pueden convertir en energía eléctrica por medio de paneles solares de silicio son: el visible y parte del infrarrojo. El valor normalizado de radiación solar directa, en la superficie de la tierra a nivel del mar, es de  $1000 \text{ W/m}^2$ :

- ✓ *Radiación directa*: es aquella que incide sobre un cuerpo sin interferencia de otro, como pudieran serlo una nube o un objeto sólido.
- ✓ *Radiación difusa*: es la que incide sobre un objeto luego de haber atravesado algún cuerpo. Estos pueden ser, una superficie con agua, una nube, etc.
- ✓ *Radiación reflejada*: es la que incide sobre un cuerpo luego de haber sido reflejada por otro, por ejemplo, la radiación que incide en la pared de una casa luego de haber sido reflejada por el suelo.

La Fig. 45, muestra los tres tipos de radiación mencionados.

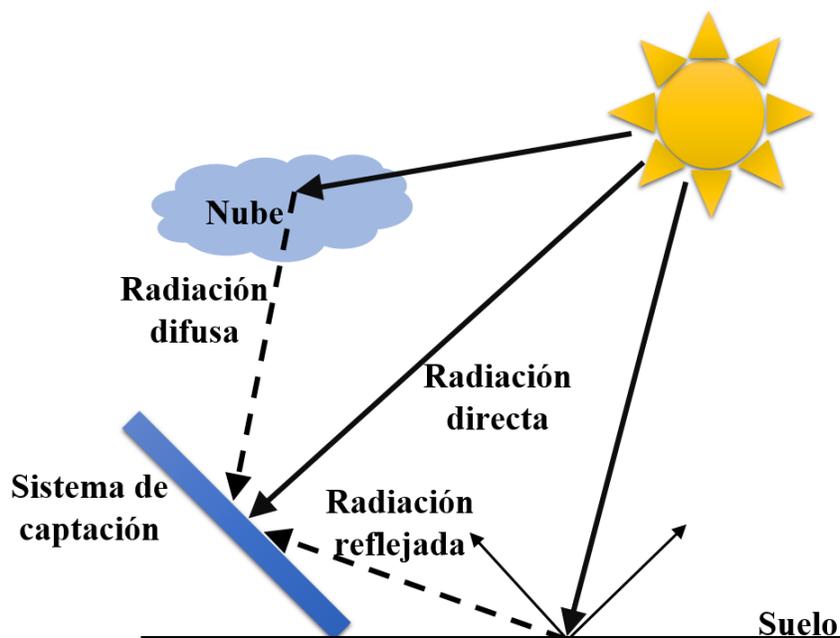


Figura 45: Tipos de radiación solar que pueden incidir sobre un sistema de captación.

Estos tres tipos de radiación contribuyen al aprovechamiento de la energía solar. En el caso de la generación de energía eléctrica a partir de la energía solar, la radiación directa es el componente más influyente dado que es la que mayor energía puede otorgar. La radiación difusa influye en menor medida, pero permite que la generación continúe en los días nublados o con lluvia. Finalmente, la radiación reflejada es la de menor influencia, debido a que, por lo general, en las instalaciones domiciliarias, los paneles solares fotovoltaicos, se encuentran en los techos de las casas o en lugares elevados, donde este tipo de radiación, pocas veces tiene influencia (GISEner, 2019).

Los paneles solares fotovoltaicos son formados por celdas solares de silicio de alta pureza, que permiten captar la radiación solar y transformarla en energía eléctrica. Los más difundidos son los monocristalinos y policristalinos. En condiciones estándar, los paneles monocristalinos poseen mayor eficiencia, sin embargo, a alta temperatura los policristalinos adquieren mayor eficiencia. En cuanto a la vida útil son muy similares y superan ampliamente a la de una heladera (más de 20 años para un panel solar fotovoltaico, contra los 12 años de vida útil promedio de una heladera) (OCU; 2019). En la Fig. 46, se puede observar a modo ilustrativo seis paneles solares fotovoltaicos.



Figura 46: Seis paneles solares fotovoltaicos.

---

Según la información provista por el grupo de I + D GISEner (GISEner, 2019), estos paneles solamente entregan su máxima potencia durante un breve período del día, en el cual las condiciones climáticas y atmosféricas son óptimas. Esto solamente ocurre en verano y en un horario cercano al mediodía. Durante el período invernal, debido a la mayor distancia entre la Tierra y el Sol, la radiación máxima es menor a los  $1000 \text{ W/m}^2$  y por lo tanto, la generación de energía eléctrica es menor. Sin embargo, esta situación se puede mejorar de dos maneras, una es instalando dos paneles solares de menor potencia y otra es sobredimensionando el banco de baterías.

Sobredimensionar el banco de baterías no es una buena opción, debido principalmente a que esta acción requiere de un sobredimensionamiento de la alimentación de las mismas. Suponiendo una semana con mucha nubosidad, los paneles solares fotovoltaicos continúan generando energía eléctrica, entregando una menor potencia producto de que la radiación que llega a los mismos, es en su mayoría, del tipo difusa. Bajo estas condiciones desfavorables, la temperatura del agua del termostato solar también será menor, esto se debe a que la influencia de la variación de la radiación afecta en mayor medida a los colectores solares y, por lo tanto, las resistencias consumirán mayor cantidad de energía de las baterías.

De este modo, se genera la peor situación posible, en la cual las baterías entregan mayor cantidad de energía de la que reciben. Durante un período corto de tiempo, esta situación no conlleva a mayores problemas. Sin embargo, en caso de que la nubosidad se extienda por un período de tiempo prolongado, las baterías se descargarán y el sistema no será capaz de suministrar el calor necesario para producir la desorción.

Obteniendo como resultado, la saturación del adsorbente, evitando que pueda adsorber mayores cantidades de adsorbato y por lo tanto deteniendo la evaporación del mismo. Todo esto converge en el incremento de la temperatura del refrigerador, y en la descomposición de los alimentos allí almacenados.

---

La solución implica un análisis de costos y expectativa de uso del equipo, a fin de lograr una correcta relación de compromiso entre el sistema de generación y el sistema de almacenamiento de la energía.

Las tres características más importantes que deben tener las baterías son:

- ✓ Larga vida útil: esto implica menores costes por reposición.
- ✓ Gran cantidad de ciclos de carga y descarga: permite que se carguen y descarguen mayor cantidad de veces, adaptándose de mejor forma a la variación del clima y los ciclos solares.
- ✓ Poco mantenimiento: debido a que la instalación se diseña para un hogar promedio, es posible que el usuario no conozca la importancia de un adecuado mantenimiento en las baterías, lo cual puede llevar a un deterioro prematuro. Esto resulta en mayores costos por reposición, paradas repentinas de la instalación y pérdida de la temperatura de conservación de los alimentos.

Con el fin de seleccionar una batería que cumpla con estos requisitos, se eligen las baterías denominadas selladas de ciclo profundo, que, si bien al ser selladas soportan menor cantidad de cargas y descargas, otorgan seguridad de funcionamiento sin mantenimiento. Otra ventaja de dichas baterías es que pueden ser de gel o AGM (electrolito absorbido). Si se opta por el segundo tipo además se tendrá una baja autodescarga. También, disminuyen la emisión de gases a la atmósfera y son más robustas. Un punto importante a tener en cuenta es la eficiencia de las mismas, que se encuentra vinculada a la eficiencia en la carga y descarga, dependiendo de la temperatura de la batería y su estado de carga (Energizar, 2016).

Es por estos motivos que se decide seleccionar un banco de baterías con capacidad para funcionar de forma autónoma durante 24 h. Se considera una profundidad de descarga del

80 % y una eficiencia global, la cual incluye la eficiencia del regulador de carga y de las baterías, de 75 %. La capacidad de las mismas se determina por medio de la ecuación 43.

$$C_b = C_P \times \frac{(D_N+1)}{30} \times \frac{1}{V \times P_d \times \eta_g} \quad (43)$$

Donde:

- ✓  $C_b$  = Capacidad el banco de baterías (A·h)
- ✓  $C_P$  = Consumo promedio (de las resistencias) (W·h)
- ✓  $D_N$  = Días de duración de las baterías
- ✓  $V$  = Tensión del banco de baterías (V)
- ✓  $P_d$  = Profundidad de descarga
- ✓  $\eta_g$  = Eficiencia global

$$C_b = 403,62 \frac{W}{h} \times \frac{(1+1)}{30} \times \frac{1}{12 V \times 0,8 \times 0,75}$$

$$C_b = 3,73 A \cdot h$$

Dado que en este caso se requiere una batería de poca capacidad, respecto a los modelos comerciales más comunes, se selecciona la menor ofrecida por Bornay<sup>®</sup>, del tipo Monobloc AGM (MEBA 12-8), cuya tensión de salida es de 12 V y posee una capacidad de 8 A·h

(BORNAY, 2017). Con esta capacidad se obtiene una duración teórica de 2 días, sin alimentación a las baterías. En este producto, la capacidad se clasifica como 8 A·h C20, esto significa que pueden entregar 8 ampere por hora durante 20 horas de funcionamiento continuo sin alimentación. Por lo tanto, se decide dimensionar los paneles de modo que puedan alimentar directamente las resistencias y la carga sobrante sea entregada a las baterías, con un regulador de carga-descarga que administre dicho proceso.

Dado que la energía entregada por los paneles debe pasar por el regulador y las baterías antes de llegar a las resistencias, tal como se muestra en la Fig. 45 y cada uno de estos equipos tiene un nivel de eficiencia diferente, en la práctica se considera un 75 % de eficiencia global (energizar 2016). El grupo de paneles deberá dimensionarse de modo que puedan sobrellevar estas pérdidas, es decir, deberán entregar más de un 25 % de la energía consumida por las resistencias (403,62 W·h).

Por lo tanto, se selecciona de SOLARTEC® el panel SOL-6M-60-285-5BB, que puede entregar una potencia máxima de 285 W a 31,4 V (SOLARTEC, 2019). Debido a que con un panel la cantidad máxima de energía eléctrica suministrada (285W·h) es menor a la requerida por las resistencias (403,62 W·h), se deberán utilizar dos paneles conectados en paralelo, a fin de mantener la tensión de salida de los paneles seleccionada, siendo esta, adecuada para el regulador de carga. Por medio de la ecuación 44 se verifican estos valores.

$$E_R = E_P \times N_P \times \varepsilon_g \quad (44)$$

Donde:

- ✓  $E_R$  = Energía máxima requerida por las resistencias (W·h)
- ✓  $E_P$  = Energía máxima entregada por el panel (W·h)
- ✓  $N_P$  = Cantidad de paneles
- ✓  $\varepsilon_g$  = Eficiencia global

$$403,62 \frac{W}{h} = 285 \frac{W}{h} \times N_p \times 0,75$$

$$N_p = 1,88 \cong 2 \text{ paneles}$$

El regulador de carga ofrece la protección adecuada para las baterías durante los períodos de carga y descarga. Dentro de sus funciones se puede encontrar:

- ✓ Evitar la sobrecarga de las baterías.
- ✓ Evitar que las baterías se descarguen por debajo del nivel adecuado.
- ✓ Mantener aislados los paneles de las baterías si su tensión es menor a la de las baterías.
- ✓ Optimizar la carga para que sea en el menor tiempo posible.
- ✓ Monitorear el nivel de carga, la corriente de carga y de descarga (solo disponible en algunos modelos de reguladores).

Además, debe ser capaz de cargar el banco de baterías de la forma más eficiente posible. Esto se logra con una carga rápida hasta una tensión de referencia, 80% del valor nominal de tensión de la batería; luego de este valor, la velocidad de carga debe disminuir para alargar la vida útil de las mismas. El regulador de carga seleccionado es el ProStar PS15M-48V (Morningstar, 2019), que posee la capacidad de trabajar con 48 V de entrada de los paneles y regula la carga de las baterías por medio del sistema PWM, haciéndolo ideal para la aplicación buscada.

---

### 2.6.c. Control de temperatura

A continuación, se describe el sistema de control de la temperatura. Este es un parámetro fundamental, dado que no solamente se debe controlar la temperatura en el interior de la heladera, sino también en diversos puntos del sistema, como por ejemplo, la temperatura del agua que ingresa y sale del adsorbedor, la temperatura a la cual se encuentra el adsorbedor, etc. Con la finalidad de poder regular el flujo de los diferentes fluidos y del calor en el sistema.

Este elemento deberá ser capaz de controlar las válvulas que unen el depósito de líquidos con el evaporador, el termotanque solar con los adsorbedores, y regular la cantidad de corriente que circula por cada resistencia. Esto debe realizarse de modo tal que el calor generado en cada tubo del adsorbedor sea lo más próximo al ideal posible y, por lo tanto, en el caso de que se utilicen las resistencias, funcionen con el menor consumo de energía eléctrica.

Un controlador o regulador de temperatura es un dispositivo que censa la temperatura de un objeto, la compara con otro y entrega una señal eléctrica de salida en base a los datos obtenidos, que acciona diferentes elementos, como puede ser un relé o una electroválvula. Estos equipos pueden ser (Omega, 2019):

✓ Controlador de temperatura ON/OFF: Son los más simples, su salida solamente puede ser una señal para que un dispositivo se encienda o apague según corresponda, cuando la temperatura ha pasado un límite configurado por el usuario. Dado que el equipo se enciende o apaga, la temperatura oscila continuamente, lo cual lo convierte en inadecuado para algunos procesos de control. Si la variación de la temperatura es muy repentina puede producir el deterioro prematuro de los equipos, producto de los constantes encendidos y apagados de los mismos.

---

✓ Controlador de temperatura proporcional: Regula la potencia suministrada al calentador de modo que sea menor al acercarse a la temperatura deseada, logrando de este modo mayor estabilidad en la variable controlada y evitando que se sobrepase el límite establecido. Al definir la banda de flotación del sistema, es decir, los límites superior e inferior, el controlador funciona en estado ON y en estado OFF cuando la temperatura se encuentra fuera de los límites establecidos.

✓ Controlador de temperatura PID: Combina las funciones del controlador proporcional con un sistema derivativo e integral, lo cual otorga un control más preciso y estable. Es ideal para sistemas que poseen una masa relativamente pequeña ya que reacciona rápidamente a los cambios en la energía añadida al sistema.

Debido a lo expresado anteriormente el sistema debe ser capaz de:

- ✓ Medir la temperatura de entrada y salida del agua al adsorbedor.
- ✓ Medir la temperatura a la que se encuentra el carbón activado.
- ✓ Regular la corriente que circula por la resistencia de acuerdo a la temperatura sensada.
- ✓ Controlar las diferentes válvulas que intervienen en el flujo de etanol y agua por el circuito.

Con esto se logra controlar la cantidad de calor suministrado al adsorbedor para realizar la desorción. Se selecciona un controlador PID de temperatura CS6S, del proveedor WIKA®. El mismo actuará sobre relés eléctricos que permitirán actuar sobre las electroválvulas de los equipos y las resistencias eléctricas de cada adsorbedor, regulando de este modo el flujo de agua y la corriente que circula por cada resistencia calefactora (Goyal P. et al., 2015).

---

#### 2.6.d. Electroválvulas

Son las encargadas de cambiar la dirección del flujo tanto del vapor de etanol proveniente del evaporador, como del agua para la calefacción de los adsorbedores, permitiendo una correcta sincronización de los mismos a fin de obtener una duración del ciclo de adsorción de una 1 hora, tal como se había planteado en un inicio, con las consecuentes mejoras que ofrece dicha duración.

Los tipos de electroválvulas más comunes que pueden conseguirse en el mercado son (Altecdust, 2012):

- ✓ De acción directa: El solenoide actúa sobre el émbolo y este abre o cierra directamente el orificio por el cual pasa el fluido. No son útiles para bajas presiones.

- ✓ De acción indirecta: Funcionan por diferencia de presiones, donde el solenoide abre un orificio piloto, que despresuriza la cámara superior del diafragma, y por la presión ejercida por el fluido en la cámara inferior a la membrana, ésta se desplaza abriendo el orificio principal. La presión mínima que requieren es de 0,2 bar.

- ✓ De acción mixta: Son una combinación de las anteriores, donde el diafragma se encuentra sujeto al émbolo por medio de un resorte, sin embargo, la apertura del orificio principal se da por la diferencia de las presiones.

En el circuito planteado en el presente proyecto, resultan necesarias las siguientes electroválvulas:

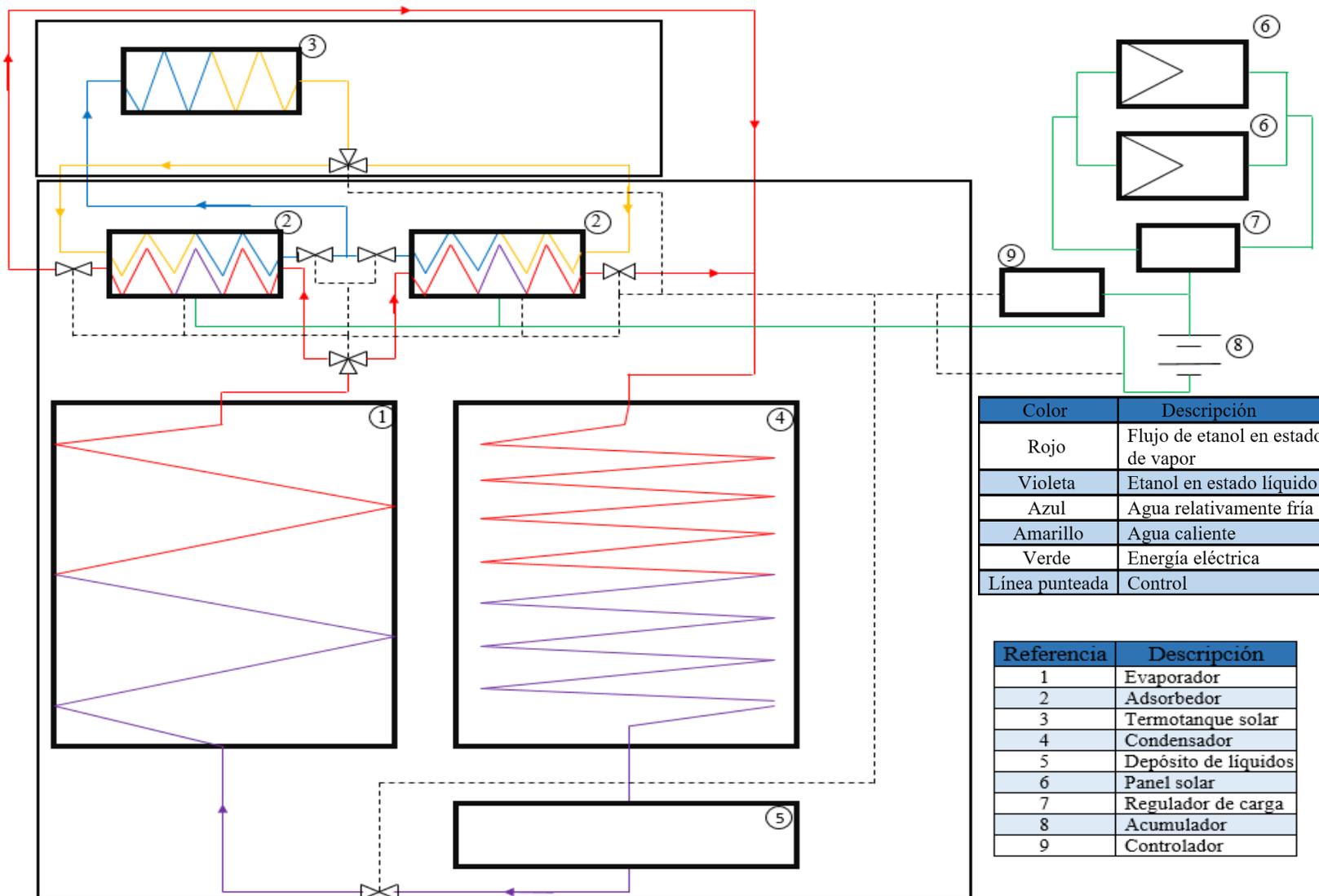
- ✓ 2 válvulas de 3 vías: Una se colocará entre cada adsorbedor y el termotanque solar, que permitirá direccionar el flujo de agua caliente al adsorbedor correspondiente. La otra, deberá ser instalada entre el evaporador y los adsorbedores, la cual permitirá direccionar el flujo de vapor de etanol proveniente del evaporador hacia el adsorbedor que corresponda.

---

✓ 5 válvulas de 2 vías: Una entre el depósito de líquidos y el evaporador. Esta es de importancia, ya que detiene el funcionamiento del ciclo. Es decir, cumple la función de encendido y apagado. 2 deberán instalarse luego de cada adsorbedor y antes del condensador, estas regularán que adsorbedor entregará el vapor de etanol producto de la desorción al condensador. Las 2 últimas deberán instalarse a la salida de agua para la calefacción de cada adsorbedor, de modo que bajo cualquier situación se pueda evitar el retorno de agua caliente por dicha tubería.

A su vez se deben coordinar todas las válvulas de modo que los diferentes elementos puedan trabajar de la forma que se ha descripto a lo largo del proyecto y también, aislar los diferentes componentes, unos de otros, en caso de falla de alguno, sin comprometer el resto de la instalación.

En la Fig. 47, se puede observar un esquema representativo del circuito completo del equipo, en el mismo, se ha omitido la representación de las resistencias eléctricas para facilitar su comprensión, las mismas se ubicarían dentro de los adsorbedores. El color rojo indica flujo de etanol en estado de vapor; el violeta, etanol en estado líquido; el azul, agua relativamente fría; el amarillo, agua caliente; el verde energía eléctrica; y la línea punteada negra indica los elementos sobre los que el controlador tiene el control.





---

# Capítulo 3

---

## Resultados y discusión

Se ha logrado demostrar la posibilidad de la utilización de un ciclo de adsorción, mediante el aprovechamiento de energía solar térmica, como fuente de calor para el proceso de desorción; como método para realizar la refrigeración de alimentos en un hogar.

A lo largo del desarrollo, se han evidenciado las características de los diferentes componentes del sistema, y expresado explícitamente los motivos de la selección y diseño de cada uno de ellos, así como también su cálculo.

Las mejoras planteadas en un inicio: Sistema de doble adsorbedor, reducción de la duración del ciclo de 24 h a 1 h, división definida entre el sistema de captación solar y el sistema de refrigeración y la utilización de etanos/carbón activado como par de trabajo; fueron incluidas a lo largo del desarrollo.

Estas mejoras, se han utilizado como base para el desarrollo del ciclo, buscando realizar el cálculo teórico de un refrigerador, que permita producir el proceso de refrigeración en una heladera doméstica de 360 L de capacidad, con los alimentos que los normalmente los usuarios almacenan en su interior. Estos datos han sido obtenidos de encuestas realizadas a diferentes personas, pertenecientes a diferentes grupos familiares y de distintas edades.

El sistema de suministro de calor al adsorbedor, compuesto por el termotanque solar y las resistencias eléctricas, alimentadas por dos paneles solares fotovoltaicos; permiten la reducción de la duración del ciclo de refrigeración de 24 h a 1 h, mejorando de este modo el funcionamiento del ciclo. Lo que incluye una reducción de la variación de la temperatura en el interior de la heladera, aumentando su capacidad y dando mayor versatilidad al producto respecto de otros prototipos desarrollados.

El sistema de suministro de calor ha sido pensado para permitir la separación del refrigerador con dicho sistema, abriendo la posibilidad al usuario de que ubique la heladera en el interior del hogar, donde se la requiere, y, mantener al sistema de suministro de calor en un lugar a la intemperie, convenientemente ubicado.

---

Las mejoras planteadas junto con el ciclo de refrigeración elegido, dan la posibilidad de proveer un sistema de refrigeración alternativo, idóneo para los hogares que aún no poseen acceso a la red de energía eléctrica, o su acceso es limitado, mejorando su calidad de vida y las posibilidades que esto representa.

Aun así, se reconoce que el ciclo se encuentra en los inicios de su desarrollo, por lo tanto, presenta ciertas limitaciones, tal como la cantidad de componentes necesarios para asegurar el suministro de calor al adsorbedor, sin embargo, dicho sistema es muy prometedor.

Con el desarrollo presentado, se dejan sentadas las bases para continuar con su estudio y desarrollo en temas como: tuberías, esquemas de conexión, planos para montaje, definición de los diferentes materiales a utilizar en los componentes; tomando como base una relación calidad-costos, continuar con la mejora del producto, análisis económico, expansión del proyecto a nuevas áreas o elementos que requieran de dicho sistema, diseño estético del equipo, entre otros.



---

## Lista de referencias

### Referencias de texto

- Alok P., Sahu D. (2018). *Experimental Study on Vapor Adsorption Refrigeration System with Carbon - Methanol Pair*. Amrita School of Engineering, Department of Mechanical Engineering. India.
- altec dust. (2012). ¿Qué son las electroválvulas?. Monterrey, N.L. Mexico. Recuperado de <https://www.altecdust.com/soporte-tecnico/que-son-las-electrovalvulas>
- Amigo Martín, P. (2000). *Termotecnia Aplicaciones Agroindustriales*. Mundi Prensa. Buenos Aires, Argentina
- Anyanwu, E. E., Ezekwe, C. I. (2003). *Design, construction and test run of a solid adsorption solar refrigerator using activated carbon-methanol as adsorbent-adsorbate pair*. Nsukka, Nigeria.
- ASTM: D 3539 – 87 (1996). *Standard Test Methods for Evaporation Rates of Volatile Liquids by Shell Thin-Film Evaporometer*.
- Avantor Performance Materials. (2011). Óxido de Aluminio - N° CAS: 1344-28-1.
- Báez Q., C., Sáenz G., M., Rodríguez N., G. (2005). *Estudio de las condiciones de reacción para la obtención de Sílica Gel Adsorbente (SGA)*. Universidad Nacional de Colombia, Ingeniería Química. Bogotá, Colombia.
- BORNAY. (2017). Baterías Me - Baterías AMG / GEL.
- CAMMESA. (Enero 2019). *Informe mensual - Principales variables del mes*. Argentina: CAMMESA.
- Cardona, C. A., Sánchez, Ó. J., Montoya, M. I., Quintero, J. A. (2005). *Simulación de los procesos de obtención de etanol a partir de caña de azúcar y maíz*. Sistema de Información Científica Redalyc Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal. Pereira, Colombia
- Casas, X. (09 de Febrero de 2019). El mapa de la distorsión de precios de la luz: hay provincias que pagan más del doble que otras. Argentina. Recuperado de <https://www.infobae.com/economia/2019/02/09/el-mapa-de-la-distorsion-de-precios-de-la-luz-hay-provincias-que-pagan-mas-del-doble-que-otras/>
- Chávez Carbajal, J., Mostacero Armas, K. E. (2013). *Influencia de la relación etanol/carbón activado en sistemas de refrigeración*. Facultad de Ingeniería química -

---

Universidad nacional de Trujillo, Escuela académico profesional de ingeniería ambiental. Trujillo, Perú.

chemicalsafetyfacts. (2019). Etanol. Chemicalsafetyfacts. Recuperado de <https://www.chemicalsafetyfacts.org/es/etanol/>

Curcio, H., Muller, C., Podepiora, C. (s.f.). *Obtención del metanol: Propiedades - Usos*. edUTecNe. Argentina.

Dossat, R. J. (2004). *Principios de refrigeración*. 15° Edición. México: Continental.

E. Hernández Arroyo, E.J. Córdoba Tuta, (2011). *Diseño, construcción y prueba de un refrigerador solar por adsorción, usando carbón activado*. Universidad Pontificia Bolivariana, Facultad de Ingeniería Mecánica. Bucaramanga, Bolivia.

Electrolux. (2011). *Manual de Usuario*.

Electrolux. (2012). *Manual de instrucciones - DF42 DW42X*.

energizar. (2016). Argentina. Recuperado de <https://www.energizar.org.ar/inicio/>

ENRE. (2019). CAPITULO 14 INSTALACIONES ELECTRICAS. Argentina. Recuperado de <https://www.enre.gov.ar/web/bibliotd.nsf/58d19f48e1cdebd503256759004e862f/fb674409a000bfa1032569a6006f264b?OpenDocument>

EPEC. (2019). *Tarifa para usuarios finales a aplicar por la EPEC desde el 01/05/2019*. Córdoba, Argentina.

Pino, Fernando Fernández. (2011). *Análisis de los sistemas de refrigeración solar por adsorción*. Sevilla. Escuela Técnica Superior de Ingenieros. Sevilla, España.

Faretto, T., Legorburu, Í., Montes, M. (2018). *Eliminación de emisiones atmosféricas de COVs por catálisis y adsorción*.

FUNDELEC. (2011). *Consumo hogareño de electricidad y su impacto en la tarifa final*. Argentina.

GISEner. (2019). Grupo de Investigación Sobre Energía. Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional San Francisco. Córdoba, Argentina.

Gonzales Martín, M. I. (2006). *Refrigeración solar por adsorción con sistema de captación CPC: experimentos y modelos*. Universidad de Burgos, Física. Burgos, España.

goodfellow. (2019). Polipropileno (PP) Información sobre el material. Recuperado de <http://www.goodfellow.com/S/Polipropileno.html>

Goyal, P., Baredar, P., Mittal, A., Siddiqui, A. R. (2015). *Renewable and Sustainable Energy Reviews – Adsorption refrigeration technology – An overview of theory and*

- 
- its solar energy applications*. Maulana Azad National Institute of Technology, Energy. Bhopal, India.
- Greco, F. I. (1995). *Calor y principios de la termodinámica*. Nueva Librería.
- IDEAM. (2017). Información técnica sobre gases de efecto invernadero y el cambio climático.
- IPCC. (2013). Cambio climático 2015 - Bases técnicas - Resumen para responsables de políticas, Resumen técnico y Preguntas frecuentes.
- Jarabo F. E. y García A., (2012). Algunas propiedades termodinámicas de sustancias químicas. Recuperado de [https://campusvirtual.ull.es/ocw/pluginfile.php/1535/mod\\_folder/content/0/404\\_Propiedades\\_Termodinamicas.pdf?forcedownload=1](https://campusvirtual.ull.es/ocw/pluginfile.php/1535/mod_folder/content/0/404_Propiedades_Termodinamicas.pdf?forcedownload=1)
- Jones, R. (2012). *Enhanced ethanol production: In-situ ethanol extraction using selective adsorption*. Thesis for the degree of Doctorate in Philosophy, University of Ottawa, Chemical and Biological Engineering. Ottawa, EE. UU.
- LaVoz. (2019). Calor extremo en Córdoba sensación térmica llega a 47°. Córdoba, Argentina Recuperado de <https://www.lavoz.com.ar/ciudadanos/calor-extremo-en-cordoba-sensacion-termica-llega-47deg>
- Legislación Argentina (2019). SALARIO MÍNIMO, VITAL Y MÓVIL. Decreto 610/2019. Ciudad de Buenos Aires, Argentina. Recuperado de <https://www.boletinoficial.gob.ar/detalleAviso/primera/215373/20190903>
- Ley 27191. Ministerio de Justicia y Derechos Humanos. Modificación. Buenos Aires, Argentina 23 DE Septiembre de 2015.
- Lizarraga, J. M., González L. M., Aranguren V (2011). *Termodinámica aplicada*. Universidad de La Rioja. La Rioja, Argentina.
- Shawyer, M. (2005). *El uso de hielo en pequeñas embarcaciones de pesca. organización de las naciones unidas para la agricultura y la alimentación*. ISBN 92-5-205010-1, ISSN 1014-1138. Roma, Italia
- Mariela S., Díaz J. (2012). *Diseño de un prototipo de refrigerador solar por adsorción, empleando carbón activado/metanol*. Instituto Superior Politécnico, J. La Habana, Cuba
- Ministerio de Hacienda. (2019). Consumos promedio por artefacto (orden alfabético). Argentina. Recuperado de <https://www.argentina.gob.ar/energia/ahorro-y-eficiencia-energetica/archivo/informacion-tecnica-de-interes/consumos-promedio-por-artefacto-orden-alfabetico>
-

- 
- Mongalez, M. (2010). Obtención del amoníaco. Recuperado de <https://quimica.laguia2000.com/general/obtencion-del-amoniaco>
- Morante, F., Ramos, V., Montalván, J., Guerrero, J. (2005). *Obtención de Zeolita Sintética Clinoptilolita en Condiciones de Laboratorio*. Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra, Escuela Superior Politécnica del Litoral. Guayaquil, Ecuador
- Morningstar (2019). ProStar PS15M-48V.
- noaa. (2019). Climate prediction center. Argentina. Recuperado de [https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/JAWF\\_Monitoring/Argentina/index.shtml](https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/JAWF_Monitoring/Argentina/index.shtml)
- OCU (Organización de consumidores y usuarios) (2019). Estas son las marcas de electrodomésticos que más duran. Recuperado de <https://www.ocu.org/electrodomesticos/frigorificos/noticias/electrodomesticos-marcas-mas-duraderas#>
- omega (2019). Controladores de temperatura. España. Recuperado de <https://es.omega.com/prodinfo/controladores-de-temperatura.html>
- ONU (1992). Convención Marco de las Naciones Unidas Sobre el Cambio Climático.
- ONU (2015). Acuerdo de París. París: ONU.
- Palomo, M. (2017). *Aislantes térmicos. Criterios de selección por requisitos energéticos*. Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid. Madrid, España.
- Placco, C., Saravia, L., Cadena, C. (2007). *Colectores solares para agua caliente*. Universidad Nacional de Salta, CONICET. Salta, Argentina.
- Pongtornkulpanich, A. (2014). *Dynamic Simulation of Solid Adsorption Solar Refrigerator System with AC-CH<sub>3</sub>OH as a Working Pair*. Phitsanulok, Thailand: Scientific Research.
- Porzia, C. (1956). *Tratado de refrigeración*. Bueno Aires: Felco. Argentina.
- Qenawy, A. M., Mohamad, A. A. (2004). *Current technologies and future perspectives in solar powered adsorption systems*. Schulich School of Engineering, Mechanical and Manufacturing. Calgary, Canadá.
- Righini, R., Grossi Gallegos, H. (2011). *Mapa de energía solar colectada anualmente por un plano inclinado un ángulo óptimo en la República Argentina*. Actas del IV Congreso Nacional/Tercero Iberoamericano sobre Hidrógeno y Fuentes Sustentables de Energía (HYFUSEN)
- ROTH. (2018). Ficha de datos de seguridad - Agua desmineralizada, no estéril - N° CE: 231-791-2 - N° CAS: 7732-18-5.
-

- 
- ROTH. (2019). Ficha de datos de seguridad - Amoníaco en solución al 30% - N° CE: 215-647-6 - N° CAS: 1336-21-6.
- ROTH. (2016). Ficha de datos de seguridad - Carbón activado - N° CE: 931-334-3 - N° CAS: 7440-44-0.
- ROTH. (2018). Ficha de datos de seguridad - Etanol ROTISOLV® - N° CE: 200-578-6 - N° CAS: 64-17-5.
- ROTH. (2018). Ficha de datos de seguridad - Metanol ROTISOLV® HPLC Gradient Grade - N° CE: 200-659-6 - N° CAS: 67-56-1.
- ROTH. (2015). Gel de sílice - N° CE: 215-475-1 - N° CAS: 1327-36-2.
- rua.ua.es. (15 de Abril de 2011). Sistema de refrigeración por compresión. Recuperado de <https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/17271/1/refrigeracion.pdf>
- Salazar Valdez, J. F. (2001). *Diseño de equipos de transferencia de calor*. Universidad Autónoma de Nuevo Leon, Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica. Nuevo Leon
- SCRAM. (2019). FLEXIBLES A MEDIDA. Santa Fe, Argentina. Recuperado de <http://www.scram.com.ar/productos/resistencias-de-cables/flexibles-a-medida/>
- SOLARTEC. (2019). Módulos Fotovoltaicos Monocristalinos – 280 W- 300 W – SOL-6M-60-285-5BB.
- Termosol. (2016). Termotanques solares – Agua caliente sanitaria para hogar e industria.
- Turbidex. (2013). Clinoptilolite Zeolita - N° CE: 215-283-8 - N° CAS: 12173-10-3.
- Valladares Cisneros, M. G., Valerio Cárdenas, C., de la Cruz Burelo, P., Melgoza Alemán, R. (2016). *Adsorbentes no convencionales, alternativas sustentables para el tratamiento de aguas residuales*. Universidad de Medellín. Medellín, Colombia.
- VALTECH. (2017). Ficha de datos de seguridad - Etanol Alcohol - N° CE 200-578-6 - N° CAS 64-17-5.
- Vera, S., Echarri, R., Sratarelli, A., Cyrulies, E., Samson, I. (2008). *CONSTRUCCIÓN DE UNA HELADERA SOLAR POR ADSORCIÓN*. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente Vol. 12, 2008. Impreso en la Argentina. ISSN 0329-5184. Argentina
- Wiegand, A. (2019). Controlador PID de temperatura. Argentina. URL: [https://www.wika.com.ar/cs6s\\_cs6h\\_cs6l\\_es\\_es.WIKA](https://www.wika.com.ar/cs6s_cs6h_cs6l_es_es.WIKA)
- Wikipedia. (2019). Anexo:Salario mínimo en Argentina. Recuperado de [https://es.wikipedia.org/wiki/Anexo:Salario\\_m%C3%ADnimo\\_en\\_Argentina](https://es.wikipedia.org/wiki/Anexo:Salario_m%C3%ADnimo_en_Argentina)
-

---

Wikipedia. (2019). Clima de la Ciudad de Córdoba (Argentina). Recuperado de  
[https://es.wikipedia.org/wiki/Clima\\_de\\_la\\_Ciudad\\_de\\_C%C3%B3rdoba\\_\(Argentina\)](https://es.wikipedia.org/wiki/Clima_de_la_Ciudad_de_C%C3%B3rdoba_(Argentina))

### Referencias de figuras

Activated Charcoal.jpg (sin fecha). En Wikipedia. Recuperado el 22 de JULIO de 2019 de  
[https://es.m.wikipedia.org/wiki/Archivo:Activated\\_Charcoal.jpg](https://es.m.wikipedia.org/wiki/Archivo:Activated_Charcoal.jpg)

Aluminium oxide.jpg (sin fecha). En Wikipedia. Recuperado el 22 de JULIO de 2019 de  
[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Aluminium\\_oxide.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Aluminium_oxide.jpg)

BORDEAUX SL.jpg (sin fecha). En Wikipedia. Recuperado el 18 de JULIO de 2019 de  
[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:BORDEAUX\\_SL.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:BORDEAUX_SL.jpg)

Botella CocaCola.jpg (sin fecha). En Wikipedia. Recuperado el 7 de JUNIO de 2019 de  
[https://ast.m.wikipedia.org/wiki/Ficheru:Botella\\_CocaCola.jpg](https://ast.m.wikipedia.org/wiki/Ficheru:Botella_CocaCola.jpg)

Carbon activado.png (sin fecha). En Wikipedia. Recuperado el 22 de JULIO de de 2019  
[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Carbon\\_activado.png](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Carbon_activado.png)

Double Pipe Heat Exchanger.png (sin fecha). En Wikipedia. Recuperado el 15 de AGOSTO  
de 2019 de [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Double-Pipe\\_Heat\\_Exchanger.png](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Double-Pipe_Heat_Exchanger.png)

Esquema intercambiador de calor.jpg (sin fecha). En Wikipedia. Recuperado el 15 de  
AGOSTO de 2019 de [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Esquema\\_intercambiador\\_de\\_calor.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Esquema_intercambiador_de_calor.jpg)

Fixed Tilt Solar panel at Canterbury Municipal Building Canterbury New Hampshire.jpg (sin  
fecha). En Wikipedia. Recuperado el 25 de AGOSTO de 2019 de  
[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Fixed\\_Tilt\\_Solar\\_panel\\_at\\_Canterbury\\_Municipal\\_Building\\_Canterbury\\_New\\_Hampshire.jpg#mw-jump-to-license](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Fixed_Tilt_Solar_panel_at_Canterbury_Municipal_Building_Canterbury_New_Hampshire.jpg#mw-jump-to-license)

Flank Steak packed.jpg (sin fecha). En Wikipedia. Recuperado el 7 de JUNIO de 2019 de  
[https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/f/f3/Flank\\_Steak\\_packed.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/f/f3/Flank_Steak_packed.jpg)

---

Flatplate.png (sin fecha). En Wikipedia. Recuperado el 25 de AGOSTO de 2019 de <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Flatplate.png>

Hydroton.jpg (sin fecha). En Wikipedia. Recuperado el 30 de JULIO de 2019 de <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Hydroton.jpg>

Kork 2009.jpg (sin fecha). En Wikipedia. Recuperado el 25 de JULIO de 2019 de [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Kork\\_2009.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Kork_2009.jpg)

Lithium Ionen Accumulator.jpg (sin fecha). En Wikipedia. Recuperado el 8 de SEPTIEMBRE de 2019 de <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Lithium-Ionen-Accumulator.jpg>

Memory Foam slow.jpg (sin fecha). En Wikipedia. Recuperado el 01 de AGOSTO de 2019 de <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:MemoryFoam-slow.jpg>

PerliteUSGOV.jpg (sin fecha). En Wikipedia. Recuperado el 01 de AGOSTO de 2019 de <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:PerliteUSGOV.jpg>

Plate heat exchanger dismantled pic02.jpg (sin fecha). En Wikipedia. Recuperado el 15 de AGOSTO de 2019 de [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Plate\\_heat\\_exchanger\\_-\\_dismantled\\_pic02.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Plate_heat_exchanger_-_dismantled_pic02.jpg)

Rippenrohre DampfLUVO Biomasseheizkraftwerk Steyr.jpeg (sin fecha). En Wikipedia. Recuperado el 01 de AGOSTO de 2019 de [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Rippenrohre\\_DampfLUVO\\_Biomasseheizkraftwerk\\_Steyr.jpeg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Rippenrohre_DampfLUVO_Biomasseheizkraftwerk_Steyr.jpeg)

Rockwool 4lbs per ft3 fibrex5.jpg (sin fecha). En Wikipedia. Recuperado el 25 de JULIO de 2019 de [https://es.m.wikipedia.org/wiki/Archivo:Rockwool\\_4lbs\\_per\\_ft3\\_fibrex5.jpg](https://es.m.wikipedia.org/wiki/Archivo:Rockwool_4lbs_per_ft3_fibrex5.jpg)

Silica gel bag open with beads.jpg (sin fecha). En Wikipedia. Recuperado el 22 de JULIO de 2019 de [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Silica\\_gel\\_bag\\_open\\_with\\_beads.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Silica_gel_bag_open_with_beads.jpg)

Solar water heater.JPG (sin fecha). En Wikipedia. Recuperado el 15 de AGOSTO de 2019 de [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Solar\\_water\\_heater.JPG](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Solar_water_heater.JPG)

---

STEICO flex Natural Wood Fibre Insulation.jpg (sin fecha). En Wikipedia. Recuperado el 25 de JULIO de 2019 de [https://eo.m.wikipedia.org/wiki/Dosiero:STEICO\\_flex\\_Natural\\_Wood\\_Fibre\\_Insulation.jpg](https://eo.m.wikipedia.org/wiki/Dosiero:STEICO_flex_Natural_Wood_Fibre_Insulation.jpg)

Styropian.JPG (sin fecha). En Wikipedia. Recuperado el 01 de AGOSTO de 2019 de <https://es.m.wikipedia.org/wiki/Archivo:Styropian.JPG>

Techo típico de Benitagla.jpg (sin fecha). En Wikipedia. Recuperado el 25 de JULIO de 2019 de [https://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Techo\\_típico\\_de\\_Benitagla.jpg](https://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Techo_típico_de_Benitagla.jpg)

UVDistressedFlexMoldedFoam800x600.png (sin fecha). En Wikipedia. Recuperado el 01 de AGOSTO de 2019 de <https://es.m.wikipedia.org/wiki/Archivo:UVDistressedFlexMoldedFoam800x600.png>

Vakuumrohrenkollektor 01.jpg (sin fecha). En Wikipedia. Recuperado el 25 de AGOSTO de 2019 de [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Vakuumrohrenkollektor\\_01.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Vakuumrohrenkollektor_01.jpg)

Vakuumrohrenkollektor 02.jpg (sin fecha). En Wikipedia. Recuperado el 25 de AGOSTO de 2019 de [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Vakuumrohrenkollektor\\_02.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Vakuumrohrenkollektor_02.jpg)

Vapour pressure ethanol.svg (sin fecha). En Wikipedia. Recuperado el 20 de JUNIO de 2019 de [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Vapour\\_pressure\\_ethanol.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Vapour_pressure_ethanol.svg)

Zeolita.png (sin fecha). En Wikipedia. Recuperado el 22 de JULIO de 2019 de <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Zeolita.png>

# Apéndice

## Apéndice N° 1: Encuestas

Las siguientes encuestas fueron realizadas a diferentes personas, pertenecientes a diferentes grupos sociales. Dentro de ellas se encuentran: 2 Familias de 3 personas, con un niño pequeño cada una; mujer joven soltera, vive sola; matrimonio menor de 30 años, sin hijos; familia 5 personas, hijos entre 15 y 24 años; joven soltero, dueño de micro-emprendimiento, vive solo; familia 4 personas; matrimonio, ambos mayores de edad.

En las siguientes Tablas, se muestran solamente los resultados ya procesados de dichas encuestas.

Tabla 5: Encuestas de 1 a 3

Encuesta n° 1	Encuesta n° 2	Encuesta n° 3
0,1 kg de crema	Crema	Leche
1,5 L de soda	6 huevos	Yogur
0,2 kg de manteca	2 mayonesas	Queso unttable
0,4 kg de mermelada	1 paquete de queso rallado	Dulce de leche
0,4 kg de dulce de leche	0,8 kg de leche	Manteca
0,2 kg de mayonesa	Queso cremoso	Dulce de frutilla
6 huevos	1 Botella de jugo	Dulce de durazno
0,5 kg de puré de tomate	1 Botella de terma	Cebollas
10 limones	2 Botellas de agua	Zanahorias
2 tomates	Tomates	Pimientto
2 cebollas	Bananas	Tomate
0,2 kg de queso	Zanahorias	Agua
2 L de agua	1 Limón	Huevos
-----	1 lata de choclo	Leche
-----	Dulce de leche	Yogur
-----	1 pascualina	-----

Tabla 6: Encuestas de 4 a 6

Encuesta n° 4	Encuesta n° 5	Encuesta n° 6
Granadina	1 kg de papas	0,3 kg de lechuga
Queso	1 docena de huevs	0,5 kg de tomate
Huevos	0,5 kg de tomate	3 zanahorias
Zapallitos	6 L de agua	0,5 kg de peras
Leche	0,5 kg de mandarinas	2 kg de naranjas
-----	1 L de leche	4 L de soda
-----	-----	2 L de agua
-----	-----	1 L de leche
-----	-----	0,4 kgr de manteca
-----	-----	2 huevos

Tabla 7: Encuestas de 7 a 9

Encuesta n° 7	Encuesta n° 8	Encuesta n° 9
3 L de agua	1 gaseosa	0,4 kg mermelada de higo
1 L de jugo	1 botella de agua	0,4 gr mermelada de frutilla
1 sifón de soda	1 maple de huevos	4 bandejas de ensaladas
Queso cremoso	1 horma de queso	Una docena de huevos
Mayonesa	1 kg de carne	1 L de leche
Mostaza	Dulce de leche	1 L de yogur
Sal	Mermelada	Pack de 6 cervezas
Esencia de vainilla	Mayonesa	0,2 kg de manteca
0,2 kg de crema	Mostaza	0,2 kg de crema
1 L de jugo	Pascualina	1 kg de dulce de leche
1 salsa para helado	Manteca	Paquete de 6 chorizos
1 kg de manzana	Queso rallado	0,3 gr de queso
1 kg de naranjas	Palta	1 L de terma
35 huevos	2 paquetes de salchicha	2 L de soda
Picadillo	Jamón	-----

Tabla 8: Temperatura de conservación, calor específico y emitido por diferentes alimentos y bebidas.

Producto	Temperatura de conservación [°C]	Calor específico antes del congelamiento [BTU / lb · F]	Calor específico antes del congelamiento [kJ / kg · F]	Calor emitido por hora (solo frutas y verduras) [BTU / lb · h]	Calor emitido por hora (solo frutas y verduras) [kJ / kg · h]
Carne	1,67	0,75	3,14	-----	-----
Manteca	4,44	0,64	2,68	-----	-----
Queso	4,44	0,70	2,93	-----	-----
Huevos	4,44	0,85	3,56	-----	-----
Leche	1,67	0,90	3,77	-----	-----
Naranjas	15,55	0,91	3,81	0,104	0,24
Zanahorias	4,44	0,93	3,89	0,073	0,17
Agua		4,186	4,19	-----	-----
Mermeladas	7,22	0,49	2,05	-----	-----

Las ecuaciones de conversión de unidades y equivalencias utilizadas en esta sección son:

$$1 \frac{BTU}{lb \cdot f} = 4,1868 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C} \quad 1 lb = 0,45 kg \quad 1 BTU = 1,055 kJ$$

---

## Apéndice N° 2: Estado de la técnica

A modo orientativo, a continuación se exponen algunos de los trabajos realizados en diferentes países con sus respectivos resultados para poder expresar el avance de la técnica.

(Anyanwu & Ezekwe, 2003) Para la zona de Owerri, en Nigeria, se logró reducir la temperatura de agua que inicialmente oscilaba entre 24 °C y 28 °C a una temperatura final que oscilaba entre 1 °C y 8,5 °C. Con una temperatura ambiente que variaba entre 18,5 °C y 35 °C, obteniendo un enfriamiento diario útil máximo de 266,6 kJ/m<sup>2</sup>, mediante la utilización de carbón activado/metanol como par adsorbente/adsorbato y un área de captación solar de 1,2 m<sup>2</sup>.

(Mariela S., Díaz J., s.f.) Para la zona de Falcón, en Venezuela, se logró producir 3 kg de hielo con la utilización de 2,85 L de metanol y 7,5 kg de carbón activado, una superficie de captación de 0,374 m<sup>2</sup>.

(Pongtornkulpanich, 2014) Para la zona de Phitsanulok, en Tailandia, se obtuvo, mediante la utilización de carbón activado/metanol como par de adsorbente/adsorbato, un ciclo de funcionamiento de 24 h, con un punto de ebullición del par de 65 °C y una temperatura nocturna del par de 30 °C.

(Alok P. y Sahu D., 2018) Se logró reducir la temperatura del agua en más de 10 °C de un recipiente de 0,75 m × 0,48 m × 0,62 m utilizando carbón activado/metanol como par adsorbente/adsorbato, un calentador eléctrico de 1 kW como fuente de calor y, 6 kg de carbón activado y 2,5 L de metanol.

(Vera, Echarri, Sratarelli, Cyrulies, & Samson) Para la zona de San Miguel, Buenos Aires, se logró una producción de 0,3 kg de hielo por día (en condiciones óptimas) mediante la utilización de carbón activado/metanol como par de adsorbente/adsorbato, un colector solar de 0,6 m<sup>2</sup> de superficie y 3 kg de carbón activado.

---

(E. Hernández A., E.J. Córdoba T., 2011) Para la zona de Bucaramanga, Bolivia, se logró reducir la temperatura de 5 L de agua de 23 °C a 8 °C, mediante la utilización de carbón activado/metanol como par de adsorbente/adsorbato, un condensador de 0,6 m<sup>2</sup> de superficie, 3 L de metanol y 15 kg de carbón activado.

Es de destacar que los resultados obtenidos en los trabajos mencionados son muy variables debido a que se realizaron en diferentes lugares con diferentes climas y condiciones ambientales. Además de esto en varios de ellos se destaca que uno de los objetivos fue una construcción económica.

En todos ellos se utilizó carbón activado/metanol como par de adsorbente/adsorbato, siendo la obtención del carbón activado y sus características uno de los puntos clave en la construcción de los equipos dada la amplia variedad comercial que se puede conseguir y su variación en la capacidad de adsorción de un tipo de carbón a otro. El enfoque de los trabajos mencionados fue la construcción de una “heladera solar”.

Según los resultados obtenidos se puede ver que la obtención de hielo mediante este sistema requiere materiales de elevada calidad y costo, así como gran precisión en el proceso de construcción. Sin embargo, no es algo imposible dado que la bibliografía citada lo demuestra. Pese a esto el objetivo del proyecto no es la generación de hielo sino la creación de un refrigerador, que precisamente disminuya la temperatura de un recinto cerrado y la mantenga a un nivel suficiente para poder conservar alimentos y algunos medicamentos de uso cotidiano.

Otra de las desventajas que presentan los trabajos expuestos es que en su mayoría utilizan solamente una cámara de adsorción, lo cual puede llevar a grandes variaciones de temperatura en el compartimiento que se enfría. La cámara de adsorción es expuesta directamente a la radiación solar, limitando la duración del ciclo a la duración de un día (24 h). Durante dicho tiempo la cantidad de hielo puede verse disminuida producto de la imposibilidad del ciclo de mantener la temperatura de congelación durante largos períodos.

---

### Apéndice N° 3: Hoja de datos

En esta sección, se presenta un resumen de los elementos que conforman el equipo, cuya selección fue explicada con anterioridad a lo largo del desarrollo.

✓ *Ciclo de refrigeración:* Adsorción

✓ *Impacto ambiental:* Reducción de la utilización de gases refrigerantes, que contribuyen al calentamiento global y al deterioro de la capa de ozono, así como también reducción del consumo eléctrico, y por lo tanto, de la dependencia de la quema de combustibles fósiles para su generación

✓ *Impacto social:* Posibilidad de la conservación de alimentos en regiones donde el acceso a la red de energía eléctrica es reducido o inexistente

✓ *Temperatura exterior:* 27,5 °C

✓ *Temperatura interior:* 2 °C

✓ *Capacidad del equipo:* 1513,42 kJ·h

✓ *Dimensiones internas:*

➤ *Alto:* 1360 mm

➤ *Ancho:* 630 mm

➤ *Profundidad:* 473 mm

✓ *Volumen final aproximado sin accesorios:* 405 L

- 
- ✓ *Aislación:* 40 mm de espesor de espuma de poliuretano
  - ✓ *Evaporador:* De placas con selladores, de 1360 mm \* 630 mm \* 3 mm.  
30 mmHg de presión de trabajo
  - ✓ *Par de trabajo:* 1,42 L·h de etanol / 6,5 kg de carbón activado
  - ✓ *Adsorbedor:* Dos adsorbedores formados por 6 tubos de aluminio, de 44,5 mm de diámetro interior, con una pared de 1,56 mm de espesor; ubicados concéntricamente con 6 tubos de acero, de 50,8 mm de diámetro interior, con una pared de 1,51 mm de espesor. Esto es, para cada adsorbedor
  - ✓ *Calor para la desorción:* Suministro por medio de agua calentada con energía solar y resistencias eléctricas
  - ✓ *Temperatura de entrada del agua al adsorbedor:* 85 °C
  - ✓ *Temperatura de salida del agua al adsorbedor:* 45 °C
  - ✓ *Caudal de agua que circula por el adsorbedor:* 20 L·h
  - ✓ *Equipo de termotanque:* Termosolar Compacto de Acero Inoxidable, de 240 L de capacidad, del proveedor Termosol®
  - ✓ *Controlador de temperatura:* PID de temperatura CS6S, del proveedor WIKA®
  - ✓ *Electroválvulas:*
    - 2 Válvulas de 3 vías
-

- 
- 5 de 2 vías
  
  - ✓ *12 Resistencias eléctricas:* Flexibles a medida de la empresa SCRAM<sup>®</sup>, de 50 W·h, con una longitud de 1,35 m cada una
  
  - ✓ *Panel solar:* 2 paneles solares fotovoltaicos SOL-6M-60-285-5BB, de 285 W del proveedor SOLARTEC<sup>®</sup>
  
  - ✓ *Regulador de carga:* ProStar PS15M-48V, del proveedor SOLARTEC<sup>®</sup>
  
  - ✓ *Batería:* Monobloc AMG (MEBA 12-8), del proveedor Bornay<sup>®</sup>
  
  - ✓ *Condensador:* De tubos de aluminio de 5 mm de diámetro con aletas, cuyas dimensiones exteriores son: 1360 \* 630 mm. Con una separación de las aletas de 30 mm
  
  - ✓ *Depósito de líquidos:*
    - *Ancho:* 630 mm
  
    - *Largo:* 470 mm
  
    - *Alto:* 70 mm
  
    - *Capacidad:* 19 L



## Apéndice N° 4: Representaciones del diseño

En este apéndice se encuentran algunas de las representaciones del diseño del equipo, las perspectivas han sido adaptadas de modo que proporcionen la mayor cantidad de detalles posible. Las mismas se encuentran en el mismo orden que fueron desarrolladas a lo largo del proyecto.

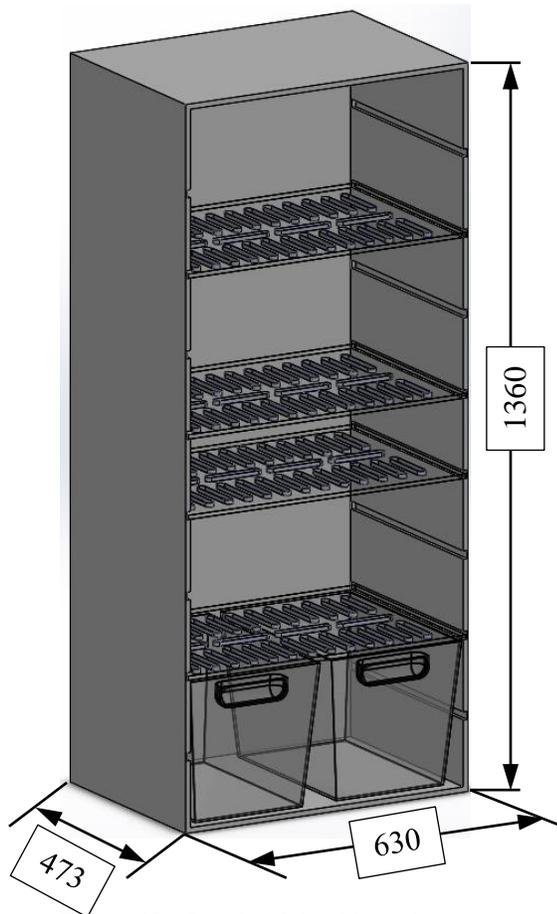


Figura 48a: Interior del refrigerador.

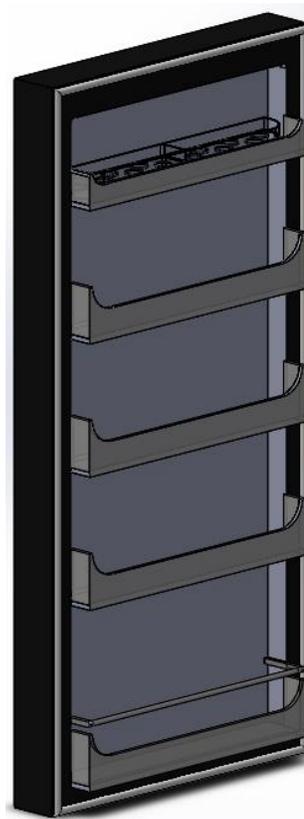


Figura 48b: Puerta del refrigerador.

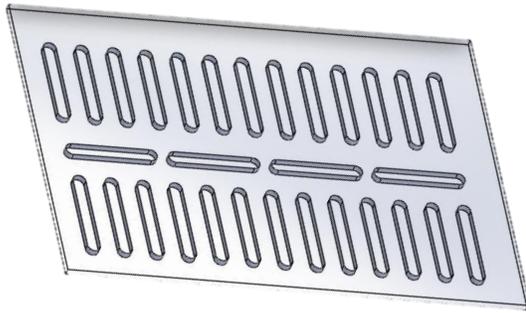


Figura 49a: Accesorio - Bandeja para estantes.

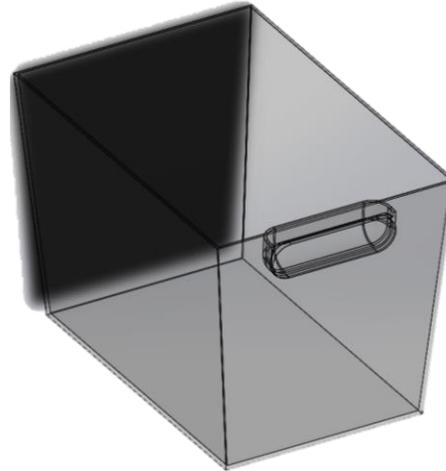


Figura 49b: Accesorio Cajones para verduras.



Figura 50a: Intercambiador de placas.



Figura 50b: Intercambiador de placas (zoom).

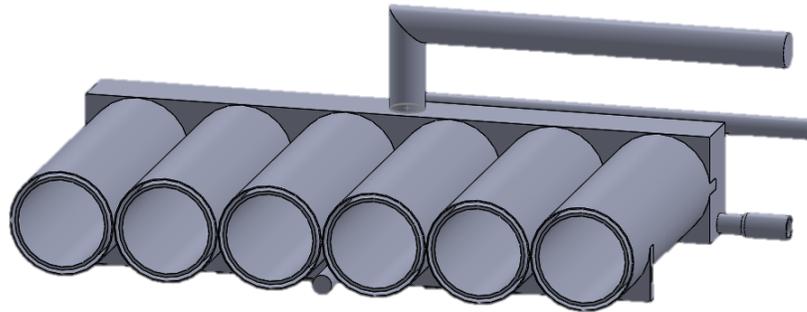


Figura 51a: Corte vertical del adsorbedor.

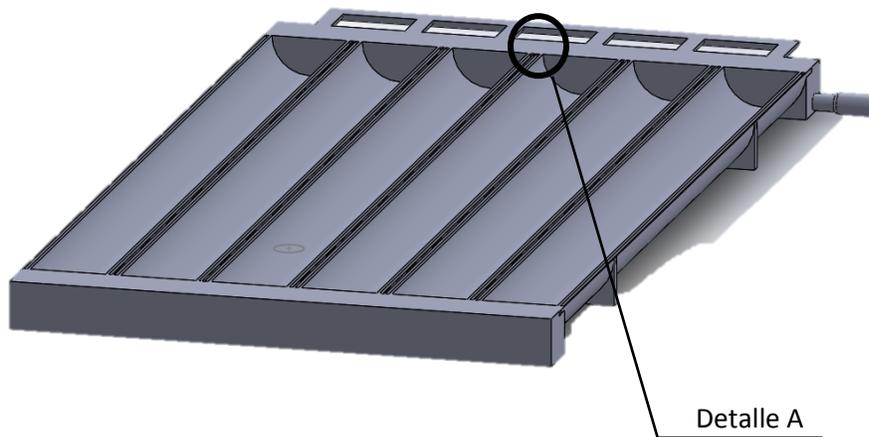


Figura 51b: Corte horizontal del adsorbedor

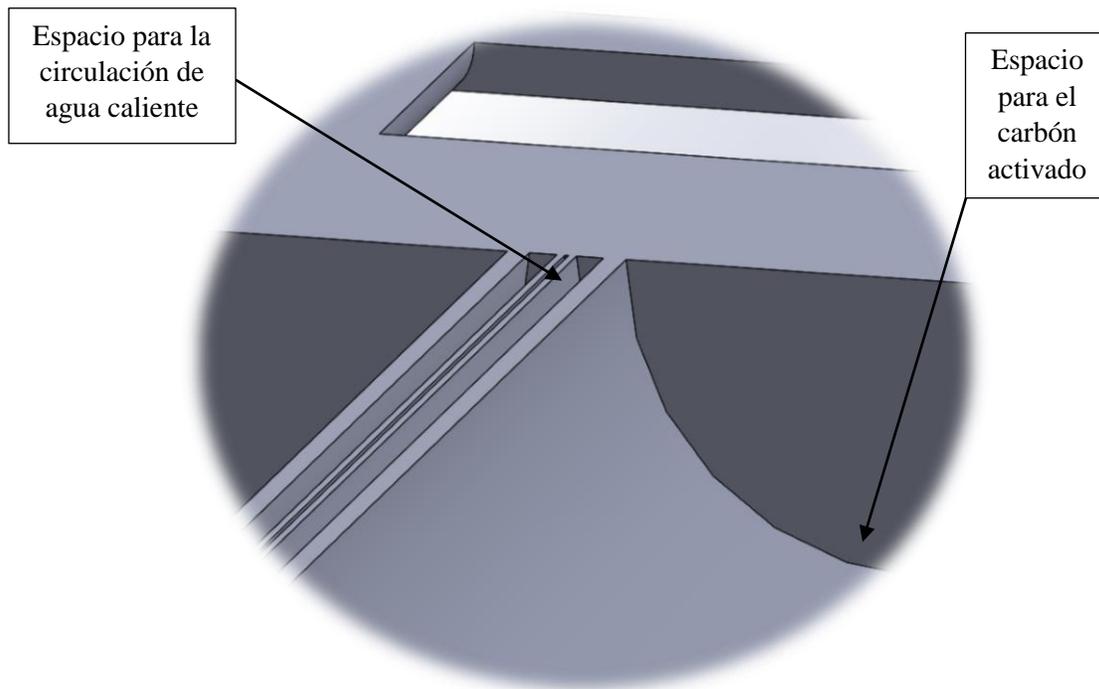


Figura 51c: Detalle A

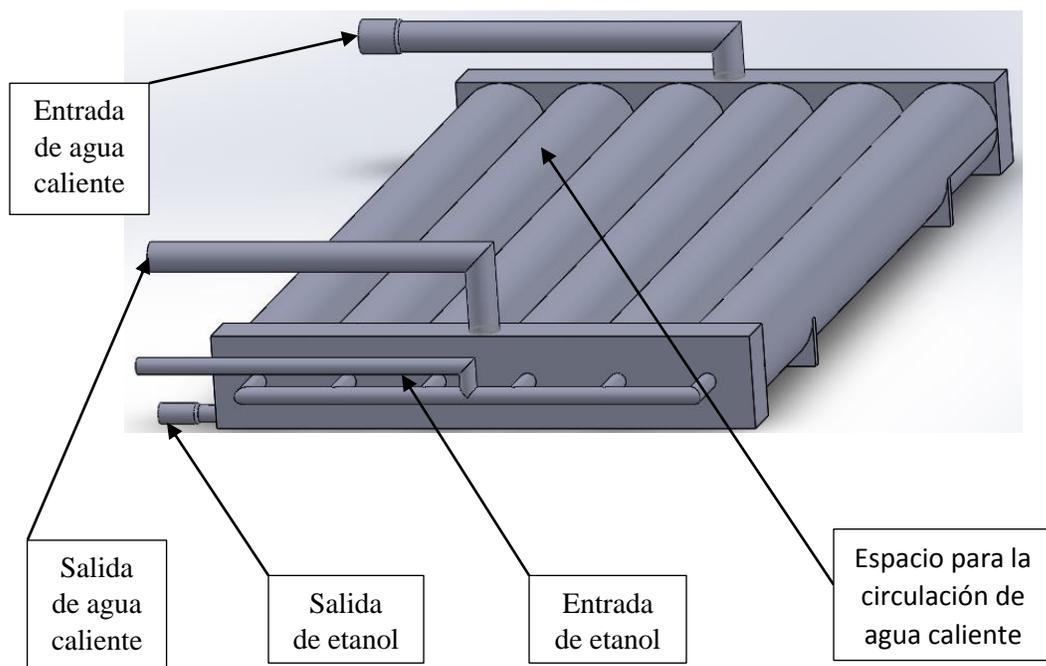


Figura 51d: Adsorbedor

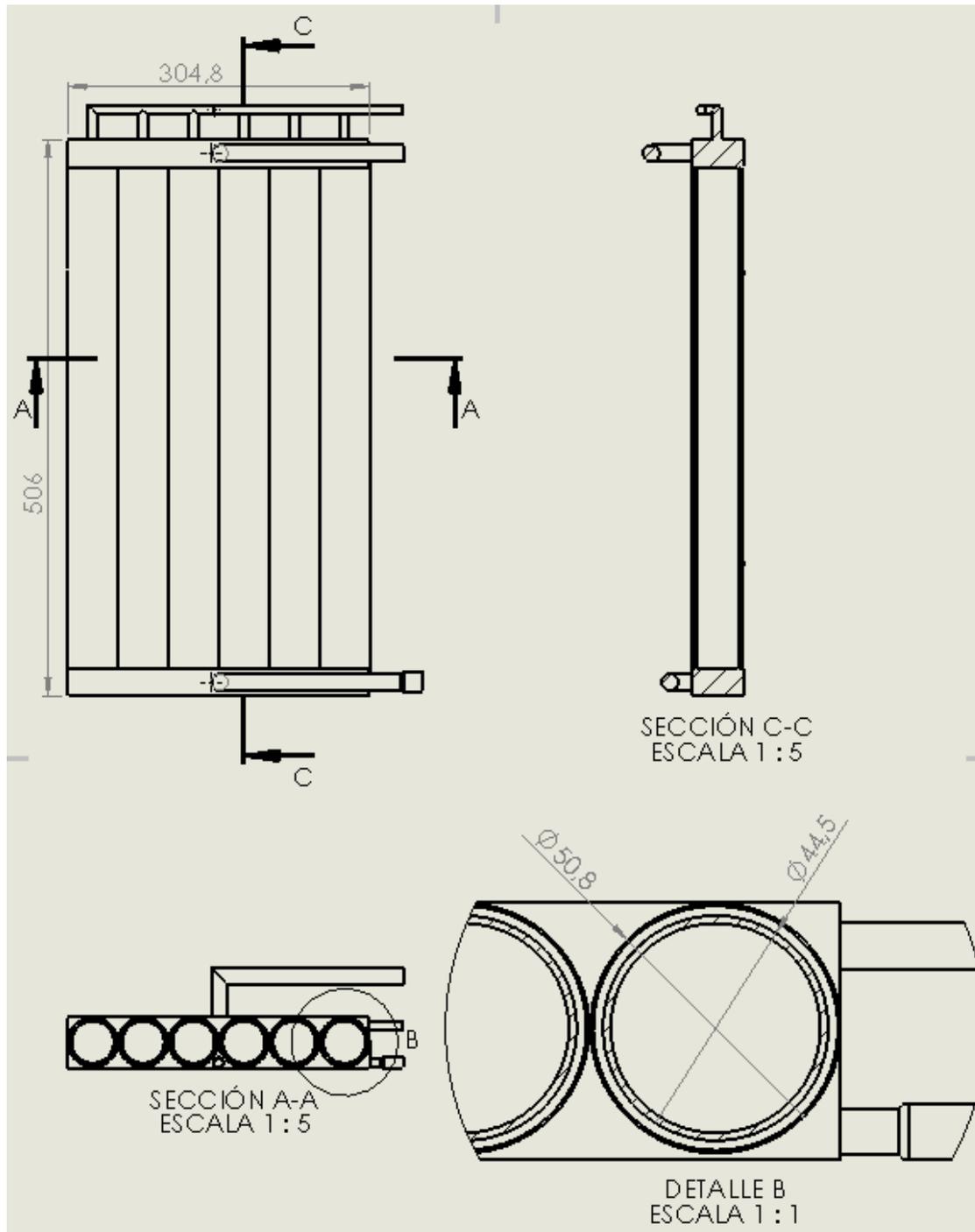


Figura 51e: Plano del Adsorbedor.

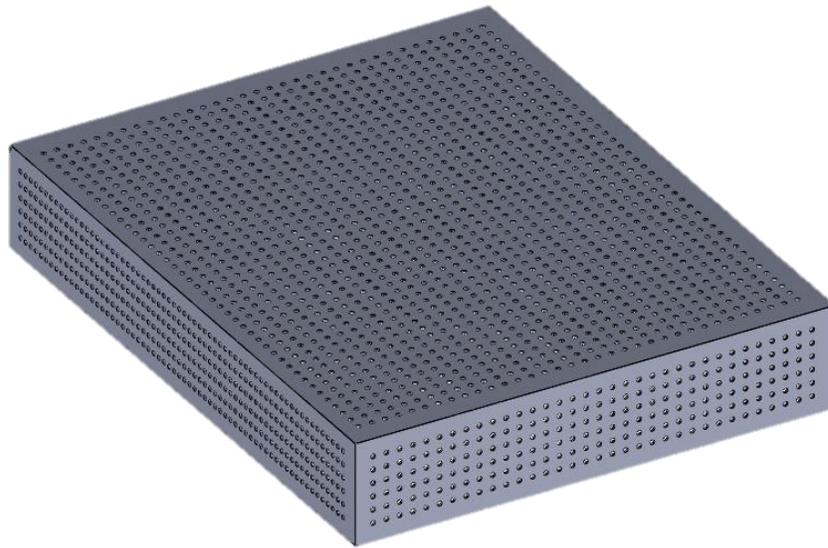


Figura 52: Cobertor para adsorbedores.



Figura 53a: Condensador.

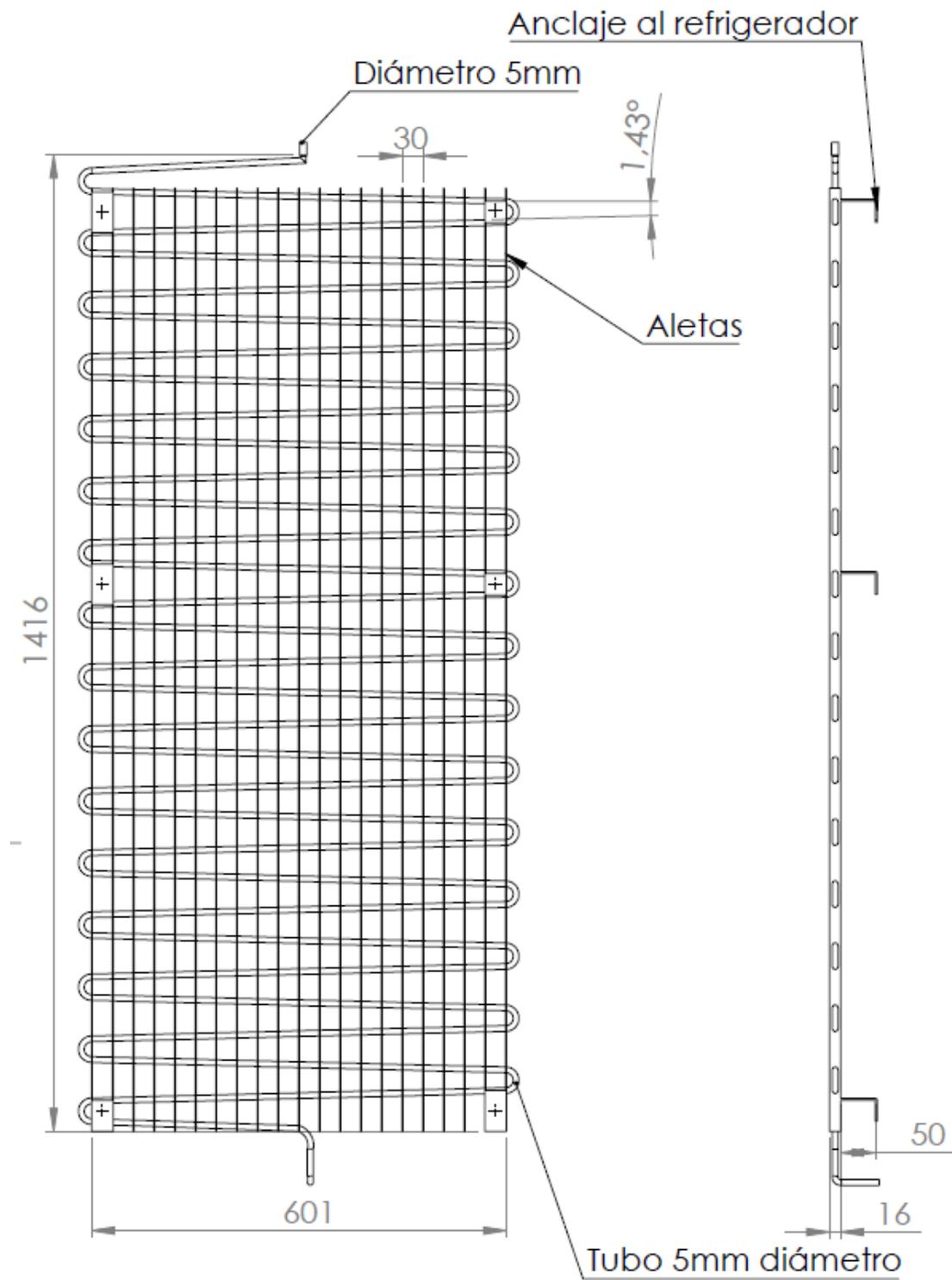


Figura 53b: Plano del condensador

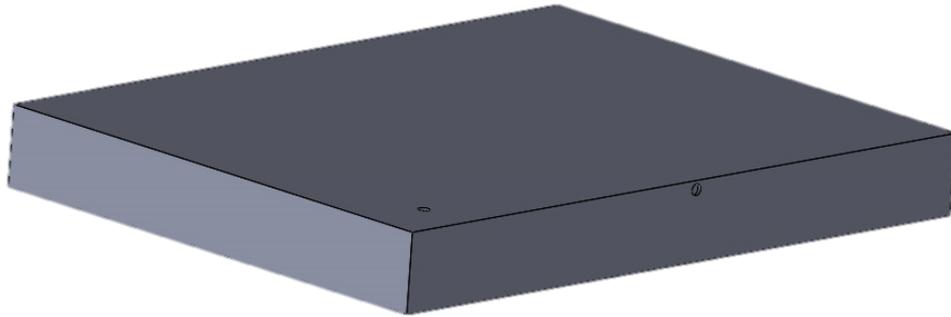


Figura 54: Depósito de líquidos.



Figura 55: Termotanque solar.

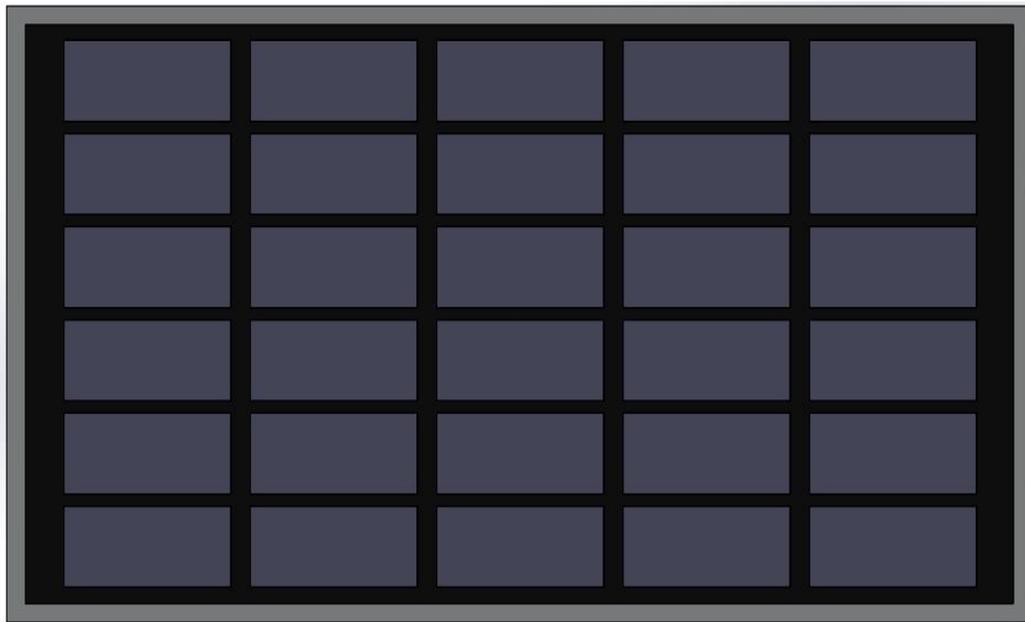


Figura 56: Panel solar fotovoltaico.

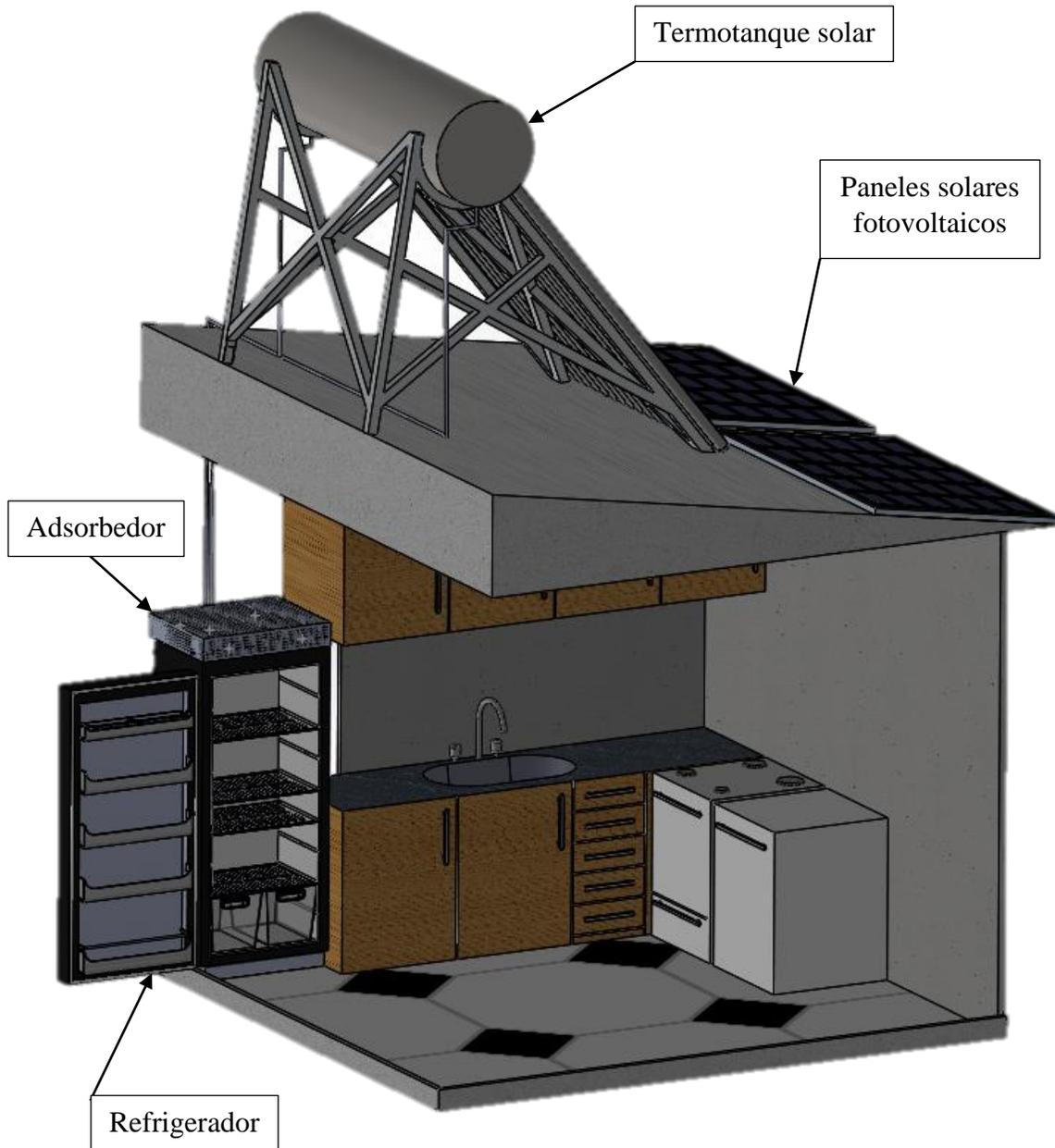


Figura 57a: Vista en perspectiva del equipo instalado en la cocina de un hogar.

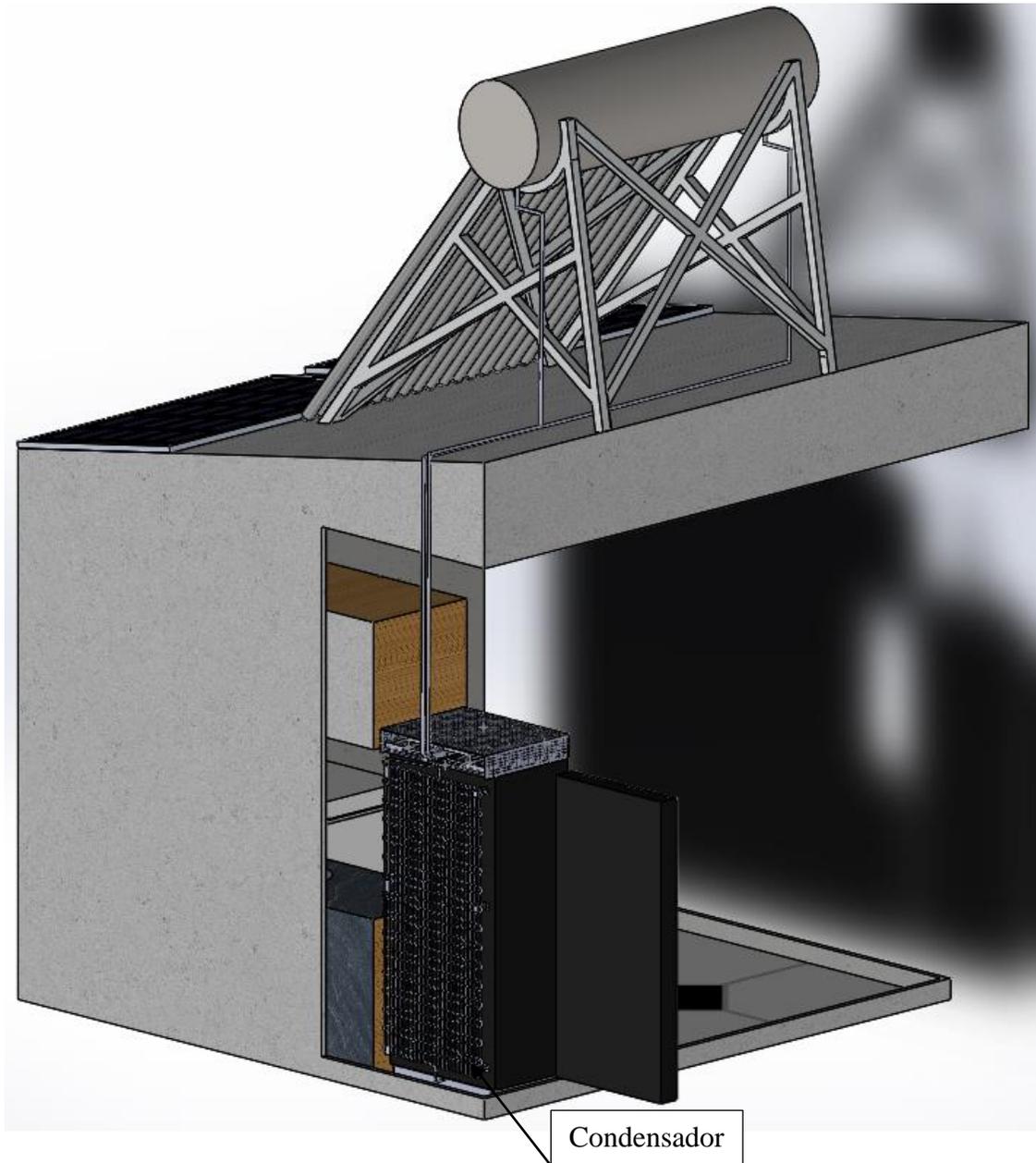


Figura 57b: Vista en perspectiva posterior del equipo instalado en la cocina de un hogar.

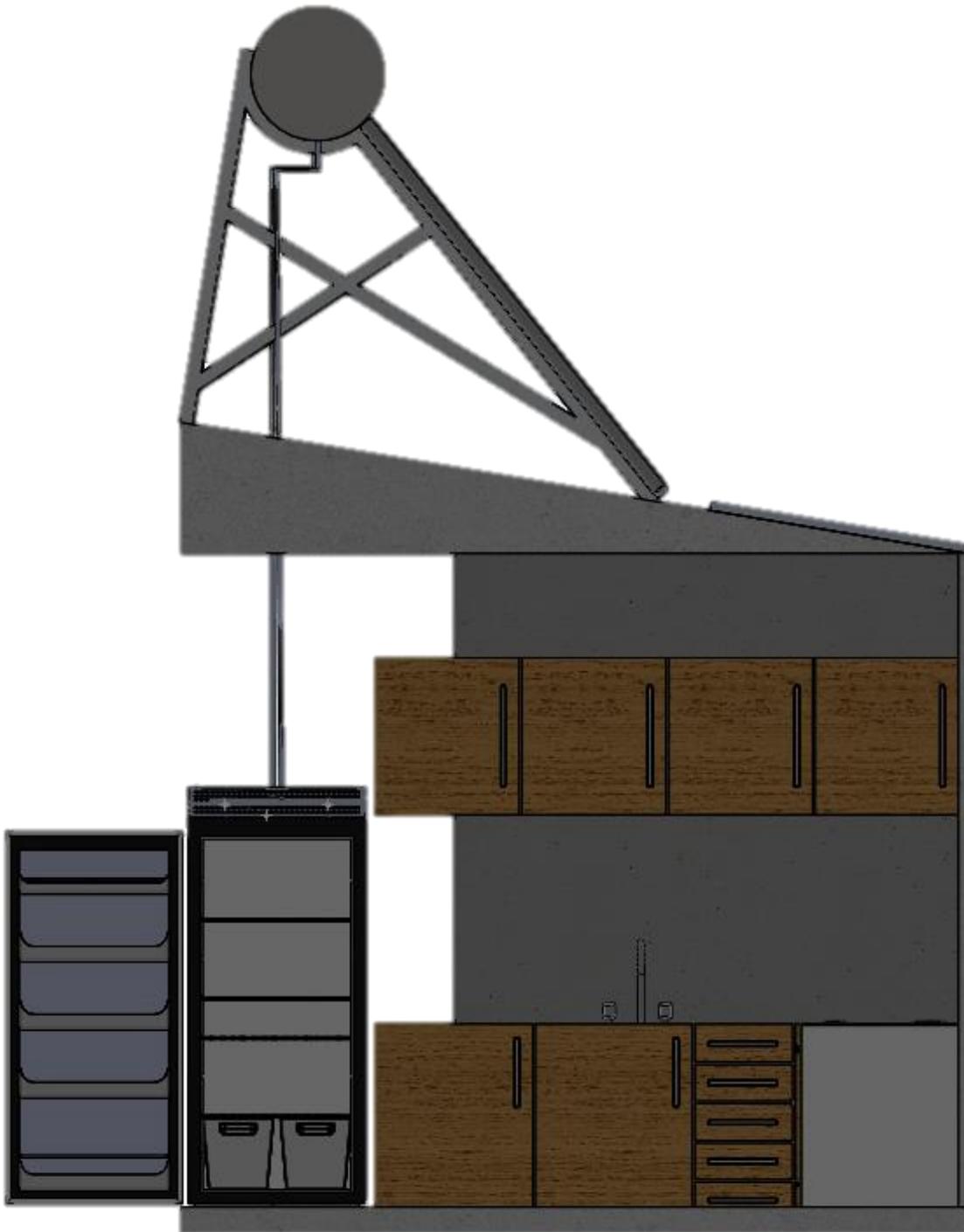


Figura 57c: Vista en perspectiva frontal del equipo instalado en la cocina de un hogar.