



**ACUMULADOR TÉRMICO CON MATERIAL DE CAMBIO DE FASE**

**Anthony Stive Cárdenas Bohórquez**

Código 20451722420

**Pedro Luis Rodríguez Ramírez**

Código 20451311601

**Universidad Antonio Nariño**

Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica.

Ingeniería Mecánica

Universidad Antonio Nariño sede: Tunja

2022

**Acumulador térmico con material de cambio de fase**

*Autores: Anthony Stive Cárdenas Bohórquez (20451722420)*

*Pedro Luis Rodríguez Ramírez (20451311601)*

Proyecto de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:

**Ingeniero Mecánico**

Director (a):

*PhD. Carlos Ramón Batista Rodríguez*

Línea de Investigación:

Diseño, materiales de ingeniería

**Universidad Antonio Nariño**

*Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica.*

*Ingeniería Mecánica*

*sede: Tunja*

2022

## NOTA DE ACEPTACIÓN

El trabajo de grado titulado  
Acumulador térmico con materia de cambio de fase,  
Cumple con los requisitos para optar  
Al título de ingeniero mecánico.

---

PhD. Carlos Ramon Batista Rodríguez – director del proyecto

---

MSC. Omar Franklin Rojas Moreno-Jurado lector del proyecto

---

MSC. William Sanabria -Jurado lector del proyecto

# Contenido

Pág.

<b>Resumen.....</b>	<b>10</b>
<b>Abstract.....</b>	<b>11</b>
<b>Introducción .....</b>	<b>12</b>
<b>1. Marco Referencial .....</b>	<b>16</b>
<b>1.1 Fuentes de Energía .....</b>	<b>16</b>
<b>1.2 Energías no Renovables .....</b>	<b>16</b>
<b>1.2.1 Combustibles Fósiles.....</b>	<b>16</b>
<b>1.3 Energías renovables.....</b>	<b>17</b>
<b>1.4 Termodinámica.....</b>	<b>21</b>
<b>1.4.1 Reseña histórica.....</b>	<b>21</b>
<b>1.5 Sistemas termodinámicos.....</b>	<b>22</b>
<b>1.6 Tipos de sistemas termodinámicos.....</b>	<b>24</b>
<b>1.6.1 Sistema abierto .....</b>	<b>24</b>
<b>1.6.2 Sistema cerrado.....</b>	<b>25</b>
<b>1.6.3 Sistema aislado .....</b>	<b>25</b>
<b>1.7 Tipos de paredes.....</b>	<b>26</b>
<b>1.7.1 Adiabáticas .....</b>	<b>26</b>
<b>1.7.2 Diatérmicas.....</b>	<b>26</b>
<b>1.7.3 Rígidas .....</b>	<b>27</b>
<b>1.8 Leyes de la termodinámica.....</b>	<b>27</b>
<b>1.8.1 Primera ley de la termodinámica.....</b>	<b>27</b>
<b>1.8.2 Segunda ley de la termodinámica.....</b>	<b>28</b>
<b>1.8.3 Tercera ley de la termodinámica .....</b>	<b>29</b>
<b>1.8.4 Ley cero de la termodinámica .....</b>	<b>30</b>
<b>1.9 Aislantes térmicos .....</b>	<b>31</b>
<b>1.10 Intercambiadores de calor .....</b>	<b>31</b>
<b>1.10.1 Intercambiadores de doble tubo.....</b>	<b>32</b>
<b>1.10.2 Intercambiadores de calor tipo evaporativo.....</b>	<b>33</b>
<b>1.10.3 Intercambiadores de placas.....</b>	<b>34</b>
<b>1.10.4 Intercambiadores de aletas.....</b>	<b>35</b>
<b>1.10.5 Intercambiadores de serpentín .....</b>	<b>36</b>
<b>1.11 Acumuladores térmicos.....</b>	<b>37</b>
<b>1.12 Materiales con cambio de fase .....</b>	<b>39</b>
<b>1.12.1 Materiales con cambio de fase orgánicos.....</b>	<b>39</b>
<b>1.12.2 Materiales con cambio de fase inorgánicos.....</b>	<b>40</b>

<b>2. Diseño De Acumulador Térmico Con Material De Cambio De Fase .....</b>	<b>42</b>
2.1 Pre-dimensionamiento estructural del acumulador térmico con material de cambio de fase.....	42
2.2 Selección material de PCM .....	43
2.3 Selección del intercambiador de Calor.....	45
2.4 Resistencia eléctrica .....	46
2.5 Transferencia de energía desde resistencia a PCM y estructura 1 del acumulador. 47	47
2.6 Tiempo necesario para que la unidad de calentamiento suministre los 1381,62 KJ de calor .....	47
2.7 Razón de transferencia de calor hacia la parafina. ....	49
2.8 Flujo de calor desde la resistencia eléctrica hacia el área transversal del acumulador y parafina. ....	49
2.9 Razón de calor por conducción .....	50
2.10 Análisis multidimensional de pérdidas por conducción del acumulador térmico	51
2.10.1 Análisis multidimensional estructura 1 (figura 8) .....	53
2.10.2 Análisis multidimensional estructura 2 (figura 10) .....	55
2.10.3 Análisis multidimensional estructura 3 (figura 12) .....	58
2.11 Resistencia térmica total de cada sección del acumulador.....	63
2.11.1 Resistencia unitaria térmica de la estructura metálica interna (figura 14) .....	63
<b>3. Construcción Y Ensayos Acumulador Térmico Con Material De Cambio De Fase .....</b>	<b>69</b>
3.1 Construcción.....	69
3.2 Construcción caja del acumulador .....	69
3.3 Construcción tapa del acumulador térmico .....	71
3.4 Ensayos.....	75
<b>4. Análisis de resultados .....</b>	<b>76</b>
<b>5. Conclusiones.....</b>	<b>84</b>
5.1 Recomendaciones.....	85
<b>6. Anexos.....</b>	<b>86</b>
<b>7. Referencias Bibliográficas .....</b>	<b>90</b>

## Lista de Figuras

<b>Figura 1.</b> Representación de un sistema termodinámico con elementos: pared y entorno (Ignacio-martínez et al., 2021).....	23
<b>Figura 2.</b> Representación de los tipos de sistemas térmicos: cerrado, abierto y aislado (Corace, 2008) .....	26
<b>Figura 3.</b> Clasificación de sustancias usadas para el almacenamiento térmico (Oliver et al., 2012, p. 3). .....	41
<b>Figura 4.</b> Estructura acumulador térmico con material de cambio de fase (autoría propia) .....	42
<b>Figura 5.</b> Dimensiones de los compartimientos de la estructura del acumulador térmico con material de cambio de fase (autoría propia) .....	43
<b>Figura 6.</b> Intercambiador de calor compacto (autoría propia).....	46
<b>Figura 7</b> Resistencia eléctrica 1200w .....	46
<b>Figura 8.</b> Estructura 1 del acumulador térmico (autoría propia) .....	53
<b>Figura 9.</b> Líneas isotérmicas para la distribución de temperatura en la estructura 1 (autoría propia) .....	55
<b>Figura 10.</b> Estructura 2 del acumulador (autoría propia).....	55
<b>Figura 11.</b> Líneas isotérmicas para la distribución de temperatura en la estructura (autoría propia) .....	58
<b>Figura 12.</b> Estructura 3 del acumulador térmico (autoría propia) .....	58
<b>Figura 13.</b> Líneas isotérmicas para la distribución de temperatura en la estructura (autoría propia) .....	62
<b>Figura 14</b> estructura metálica interna del acumulador .....	63
<b>Figura 15.</b> Paredes laterales acumulador térmico (autoría propia) .....	69
<b>Figura 16.</b> Segunda pared interna del acumulador térmico (autoría propia).....	70
<b>Figura 17.</b> Aplicación de aislante térmico (autoría propia).....	70
<b>Figura 18.</b> Aplicación de parafina, resistencia circular y posición de intercambiador de calor (autoría propia). .....	71
<b>Figura 19.</b> Tapa superior acumulador térmico (autoría propia) .....	72
<b>Figura 20.</b> Tapa acumulador térmico con fibra de vidrio (autoría propia) .....	72
<b>Figura 21.</b> Tapa acumulador térmico-sellada (autoría propia) .....	73
<b>Figura 22.</b> Niple galvanizado tapa de acumulador (autoría propia) .....	73
<b>Figura 23.</b> Niple galvanizado acumulador térmico (autoría propia) .....	74
<b>Figura 24.</b> Calentamiento de la parafina (autoría propia).....	76
<b>Figura 25.</b> Prueba perdida de temperatura de la parafina (autoría propia) .....	78
<b>Figura 26.</b> Prueba de vacío (autoría propia).....	80
<b>Figura 27.</b> Prueba de perdida de temperatura de la parafina (autoría propia).....	82

## Lista de tablas

<b>Tabla 1.</b> <i>Propiedades PCM. (autoría propia)</i> .....	43
<b>Tabla 2.</b> <i>Matriz de alternativas (autoría propia)</i> .....	44
<b>Tabla 3.</b> <i>Ganancia de temperatura con respecto al tiempo (autoría propia)</i> .....	48
<b>Tabla 4.</b> <i>Coefficientes usados en la solución aproximada de un término de la conducción (Transferencia_de_Calor_y_Masa_Yunus_Ceng, n.d., p. 231)</i> .....	52
<b>Tabla 5.</b> <i>Memoria de cálculo temperatura adimensional en el eje x,y,z para la estructura 1 (autoría propia)</i> .....	53
<b>Tabla 6.</b> <i>Memoria de cálculo de la distribución de temperatura con respecto a la distancia en la estructura 1 (autoría propia)</i> .....	54
<b>Tabla 7.</b> <i>Memoria de cálculo temperatura adimensional en el eje x,y,z para la estructura 2 (autoría propia)</i> .....	56
<b>Tabla 8.</b> <i>Memoria de cálculo de la distribución de temperatura con respecto a la distancia de la estructura 2 (autoría propia)</i> .....	57
<b>Tabla 9.</b> <i>Memoria de cálculo temperatura adimensional en el eje x,y,z para la estructura 3 (autoría propia)</i> .....	59
<b>Tabla 10.</b> <i>Memoria de cálculo de la distribución de temperatura con respecto a la distancia de la estructura 3 (autoría propia)</i> .....	60
<b>Tabla 11.</b> <i>Perdida de calor en la parafina respecto al tiempo. (autoría propia)</i> .....	78
<b>Tabla 12.</b> <i>Perdida de vacío con respecto al tiempo (autoría propia)</i> .....	80
<b>Tabla 13.</b> <i>Perdida de temperatura de la parafina (autoría propia).</i> .....	82

## Lista de gráficas

<b>Gráfica 1.</b> <i>Utilización de los combustibles fósiles (JUAN JOSÉ TRONCOSO, 2014)</i> .....	17
<b>Gráfica 2.</b> <i>Utilización de las fuentes de energías renovables en el mundo (Robles Algarin &amp; Rodríguez Álvarez, 2018)</i> .....	19
<b>Gráfica 3.</b> <i>Distribución lineal de temperatura en la estructura 1 (autoría propia)</i> .....	54
<b>Gráfica 4.</b> <i>Distribución lineal de temperatura en estructura 2 (autoría propia)</i> .....	57
<b>Gráfica 5.</b> <i>Distribución lineal de temperatura en estructura 2 (autoría propia)</i> .....	60
<b>Gráfica 6.</b> <i>línea perdida de temperatura de la parafina a temperatura (autoría propia).</i> 79	
<b>Gráfica 7.</b> <i>Perdida de vacío con respecto al tiempo (autoría propia)</i> .....	81
<b>Gráfica 8.</b> <i>Lineal de perdida de temperatura de la parafina (autoría propia)</i> .....	83

## *Dedicatoria*

*Dedicamos este proyecto a nuestras familias, quienes han estado a nuestro lado durante todo este proceso apoyándonos incansablemente, a nuestros docentes que nos han ido llevando de la mano en este camino, a nuestros compañeros de programa para motivarles a no rendirse en este bonito trasegar y en general a todos los integrantes que hacen parte de la Universidad Antonio Nariño.*

## **Agradecimientos**

Este trabajo no se habría podido realizar sin el apoyo y colaboración de un sin número de personas que dedicaron su conocimiento y sabiduría a lo que en principio fue solo un sueño pero que a lo largo se convirtió en una meta. Queremos agradecer a todos ellos por cuanto hicieron por nosotros, para que este proyecto se diera de manera exitosa.

Yo Anthony Stive Cárdenas Bohórquez quiero agradecer a mi madre Claudia Yaneth Bohórquez González por creer en mí y en mis capacidades, por estar incondicionalmente y mantener su esperanza intacta en cada uno de mis propósitos.

yo Pedro Luis Rodríguez agradezco a mis docentes y amigos que me acompañaron en este camino educativo, el cual fue importante para darme unas bases como profesional y construirme como persona, a mi familia que siempre estuvo y apoyo mis ideas y mis intereses.

De manera global agradecemos a nuestro director de proyecto, el Ing. Carlos Ramón Batista Rodríguez por aportar sus conocimientos, tiempo y disposición, a nuestra directora de Carrera Ing. Mercy Villate por edificar y sembrar en nosotros la semilla del progreso, y en general a todo el equipo de docentes y directivos que han aportado grandemente a nuestro proceso educativo.

## Resumen

El presente trabajo de grado es una investigación que trata de la realización de un prototipo de acumulador térmico, esta forma parte de las reivindicaciones de la patente NC 2017/005748 concedida a la UAN en el año 2020, el acumulador térmico contara con distintos sistemas que permiten aprovechar las diferentes fuentes de energía como un material de cambio de fase (PCM) según sea la circunstancia en la que se presente una situación. Este proyecto es realizado para buscar beneficiar a diferentes usuarios, desde el área industrial como en el residencial buscando que se implemente en cualquier tipo de calentador solar para maximizar su eficiencia. Terminando este informe con el respectivo análisis e interpretación de los resultados de la investigación realizada se ha llegado a una serie de conclusiones, a la realización y al mejoramiento de generar una alternativa rentable que permita aprovechar y potencializar cualquier tipo de calentador solar de fluidos existente, a partir de un acumulador térmico que permita conservar la energía por un mayor tiempo.

***Palabras claves:*** Acumulador térmico, material de cambio de fase, parafina.

### **Abstract**

The present work of degree, is a research that deals with the realization of a prototype of thermal accumulator, this is part of the claims of the patent NC 2017/005748 granted to the UAN in the year 2020, the thermal accumulator will count with different systems that allow to take advantage of the different sources of energy as a phase change material (PCM) according to the circumstance in which a situation arises. This project is made to seek to benefit different users, from the industrial area as in the residential looking to be implemented in any type of solar heater to maximize its efficiency. Ending this report with the respective analysis and interpretation of the results of the research carried out, a series of conclusions have been reached, the realization and improvement of generating a cost-effective alternative that allows to take advantage and potentiate any type of existing solar fluid heater, from a thermal accumulator that allows to conserve energy for a longer time.

***Keywords:*** Thermal accumulator, phase change material, kerosene.

## Introducción

El almacenamiento de energía es un área de mucho interés, ya que a través del tiempo se ha ido investigando e implementando sistemas de acumulación, existen distintas formas de almacenar energía; en este caso se trabaja con sistemas de almacenamiento térmico, estos artefactos son usados para conservar la energía en forma de calor. Este mecanismo es diseñado, ejecutado y puesto a prueba en condiciones a las que está expuesta la universidad Antonio Nariño sede de la ciudad de Tunja. Con este proyecto se busca poder beneficiar diferentes usuarios, como el área industrial y residencial, de tal manera que esté se implemente en cualquier tipo de calentador solar o artefacto que pueda ser adaptado, de esta manera se logre aumentar la eficiencia y uso de estos.

La población crece cada vez más teniendo como resultado la necesidad de crear alternativas que mejoren la calidad de vida a un bajo costo. Las energías renovables son infinitas y competitivas, a diferencia de los combustibles fósiles son abundantes y con un potencial de aprovechamiento en cualquier zona, dada su gran diversidad. No afectan al ecosistema, por el contrario, ayudan a disminuir los contaminantes que producen gases de efecto invernadero.

El objetivo general del presente proyecto es **desarrollar un acumulador térmico con material PCM (Phase Change Materials)**, y sus objetivos específicos son **Diseñar un prototipo de acumulador térmico con material de cambio de fase, Construir un acumulador térmico con material de cambio de fase que mantenga la energía térmica en un tiempo prolongado y por último realizar pruebas al prototipo para evaluar su funcionalidad.** Los acumuladores de cambio de fase son los que generan mayor interés ,

este prototipo se basa en el principio de acumulación por calor latente. En el periodo de incidencia se tiende a acumular la energía térmica producida en forma de calor latente del PCM con el fin de lograr una optimización al sistema, dando uso a un prototipo ajustable en cualquier tipo de circunstancia, buscando una mejor eficiencia térmica a un menor costo, ya sea que se encuentre en alguna de las siguientes situaciones: que no se cuente con luz eléctrica, material mineral o energía alternativa.

La energía interna asociada con la fase de un sistema se llama energía o calor latente. Para un material, la proporción de energía que puede guardar es dependiente del rango de temperaturas en el cual se puede calentar, se aprecia que el calor almacenado se encuentra ligado al rango de temperaturas del material y su masa. Materiales densos como ladrillo refractario y rocas entre otros son capaces de guardar una enorme proporción de calor. En un pequeño intervalo de temperaturas, los materiales de calor latente tienen la posibilidad de funcionar mejor que los materiales de almacenamiento por medio de calor sensible. Dichos materiales almacenan el calor latente que se crea en la transición de etapa del material, conocido como PCM. Una vez que dichos materiales son calentados hasta la temperatura de transición cambian de etapa, en un proceso donde la temperatura se encuentra constante (isotérmico) y necesita de un aumento de energía, este aumento de energía es la transición del cambio de entalpía o calor latente.

Cuando un PCM está totalmente sólido se añade energía mediante una fuente de calor, que puede ser por ejemplo un fluido de transmisión de calor circulando por unas tuberías, el calor se transmite por conducción, produciendo así las primeras capas en contacto con la fuente de calor que empiezan a derretirse. Una vez que el PCM se ha

fundido, el método de transmisión de calor cambia de conducción a la convección natural, provocando así que el PCM del líquido más caliente suba, derritiendo la parte superior más rápidamente. A partir de aquí, la convección natural hace que el resto de PCM se acabe derritiendo. Las diferencias de temperatura mayores entre la fuente de calor y el PCM provocan un almacenamiento de energía más rápido y que el PCM se derrita antes, Se busca conseguir unas relaciones de almacenamiento de energía mejores, esto también se puede conseguir aumentando el flujo del fluido de transmisión que circula por las tuberías(Sales, 2019).

Ya que hoy en día los acumuladores térmicos de PCM están generando un mayor interés dado que presentan una mayor densidad energética acumulada en comparación a los acumuladores de calor sensible y presentan mayor estabilidad en la temperatura. Un material con abundancia utilizado en acererías artesanales es la parafina, cuyas propiedades térmicas son adecuadas para aplicaciones térmicas solares de mediana temperatura, entre 53°C a 61°C, rango que corresponde a la temperatura de fusión de la parafina (Janampa Quispe et al., 2020).

Dentro de sus investigaciones dirigidas al desarrollo de tecnologías basadas en energías renovables, en 2017 la UAN radicó ante la Superintendencia de Industria y Comercio (SIC) el expediente NC 2017/0005748 de una invención denominada “Colector solar”. En 2020, mediante la Resolución 67534, la SIC otorgó la patente de invención con nombre final “calefactor tipo solar que comprende un tanque donde se ubica por encima una tubería espiral y debajo del mismo un acumulador térmico”. (C. BATISTA RODRIGUEZ,

2020) El acumulador térmico, incluido desde el propio título y que forma parte de las reivindicaciones de la patente concedida, nunca ha sido construido.

En Colombia se ha implementado un sistema de acumulación térmica con parafina como material de cambio de fase, encapsulados en tubos de cobre. Para un secador de túnel tipo Hohenheim (Escobar-Ochoa et al., 2018).

Es conocido también el desarrollo de un acumulador de bajo costo que permite almacenar energía solar térmica, para que no se interrumpa el proceso de secado de diversos productos agrícolas. La cera de parafina, similar a la utilizada en la fabricación de velas, fue la opción ideal para esta investigación, puesto que bajo  $56^{\circ}\text{C}$  se mantiene como sólido y sobre esta temperatura se transforma en líquido (Universitaria, 2015). A partir de estos antecedentes, nace el cuestionamiento de ¿cómo construir un acumulador térmico con la característica de un PCM?

Como medidas definidas, establece el alcance y las limitaciones del proyecto.

#### ALCANCE

El alcance del proyecto es diseñar, construir y probar el funcionamiento de un acumulador térmico con uso de parafina como material de cambio de fase.

#### LIMITACIONES

El proyecto se limita al desarrollo mecánico del sistema antes descrito, el grado de temperatura obtenida puede variar dependiendo de la radiación solar y/o del calor proporcionado por el material de cambio de fase, parte eléctrica.

## 1. Marco Referencial

### 1.1 Fuentes de Energía

Las fuentes de energía se definen como “los recursos existentes de los que la humanidad puede obtener energía utilizable en sus actividades (Pereira Blanco, 2015)”. Las energías eléctricas se dividen en dos grupos en energías renovables y no renovables, las energías no renovables son aquellas que se encuentran de forma limitada como lo son combustibles fósiles, por otro lado, las renovables son las que no se agotan por su uso, energía solar, eólica, entre otras.

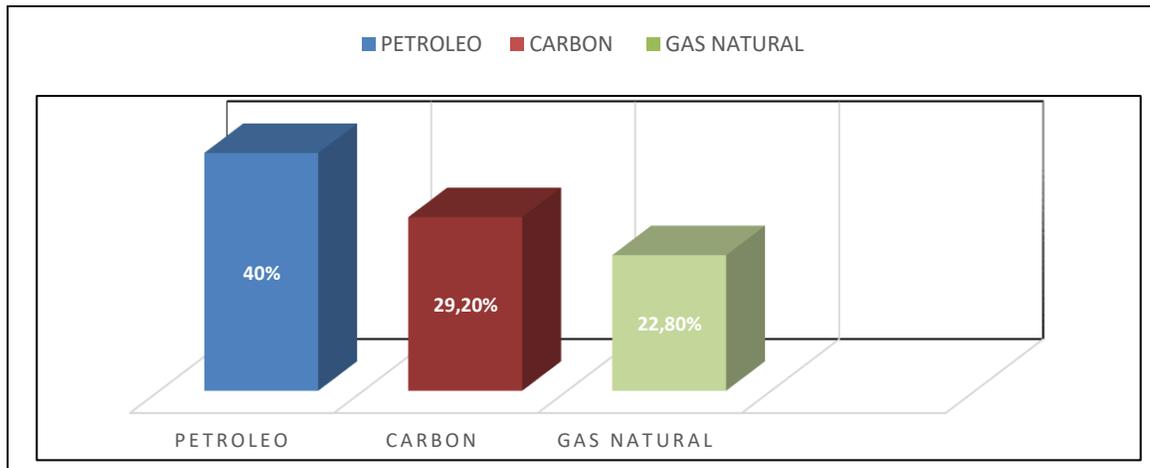
### 1.2 Energías no Renovables

De acuerdo con el instituto de valencia competencia empresarial (IVACE - Energía, 2021), se refieren aquellas fuentes de energía que se encuentran en la naturaleza en cantidades limitadas, esto quiere decir que una vez consumidas no pueden volver a sustituirse, en estas fuentes de energía se encuentra los combustibles nucleares y los combustibles fósiles.

#### 1.2.1 Combustibles Fósiles

Los combustibles más empleados en la actualidad son el carbón y el petróleo ya que estos cuentan con una gran combustión por encima de los demás materiales como por ejemplo el gas natural (*Fuentes de Energía - ROLDÁN VILORIA, JOSÉ - Google Libros, n.d.*) a continuación se muestra en la gráfica 1 la utilización de las fuentes de energía en el mundo.

**Gráfica 1.** Utilización de los combustibles fósiles (JUAN JOSÉ TRONCOSO, 2014)



El carbón siendo uno de los materiales más abundantes en el mundo, se utiliza para la generación de energía esto sucede cuando la energía se acumula y emite calor, aunque en la actualidad el petróleo es el material más utilizado, conocido para la producción de energía y el gas natural es el material más limpio que se encuentra de los combustibles ya que es el que menos daños causa al ambiente.

En el uso de estos materiales se puede realizar de forma directa, pasa por un proceso de quemado para utilizarla en forma de energía térmica o mecánica. estos combustibles al no ser renovables son altamente contaminantes afectando la atmosfera y el diario vivir en general.

### 1.3 Energías renovables

Las energías renovables son alternativas disponibles en la naturaleza que pueden ayudar a reducir la dependencia de las energías de origen fósil, una de sus características

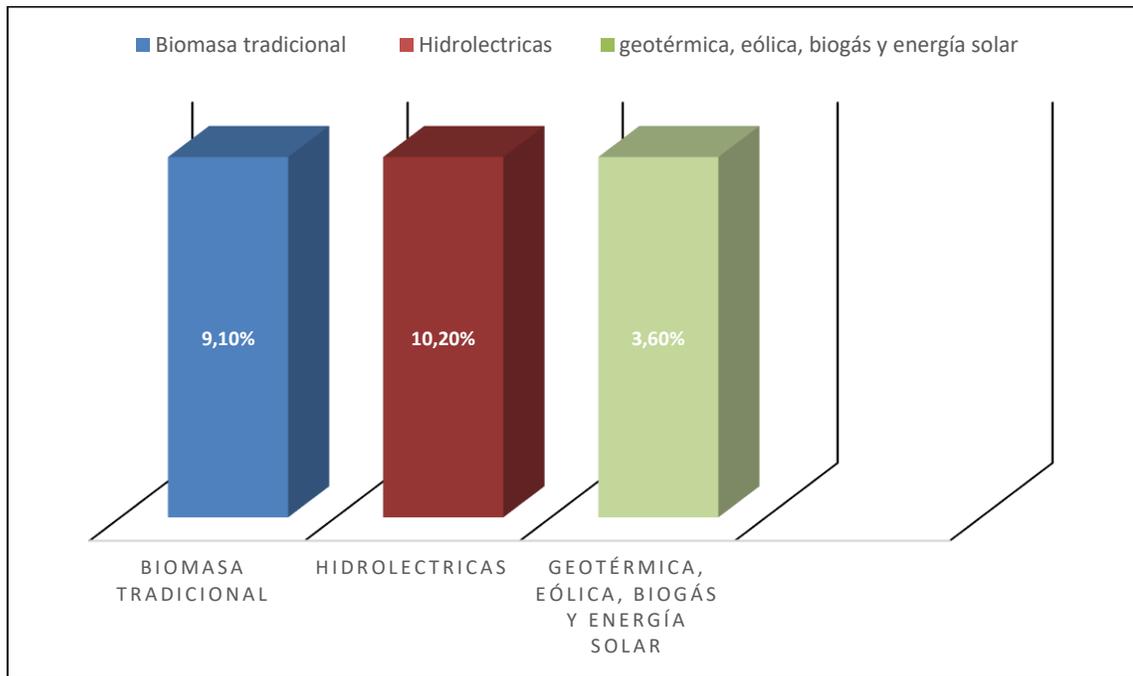
principales es que son inagotables y su aprovechamiento no causa alteraciones graves al medio ambiente (Roldán Vilorio, 2013).

“Los proyectos en energías renovables se han convertido en una prioridad para América Latina debido a los retos energéticos como: la demanda poblacional, la alta dependencia de combustibles fósiles y el cambio climático. Con el fin de solucionar esta problemática se han venido desarrollando proyectos de inversión en energías renovables en diferentes países de la región, ya que Cuenta con recursos naturales que la convierten en un lugar idóneo para realizar proyectos de inversión, especialmente los relacionados con centrales hidroeléctricas”(Londoño, 2017).

Las energías renovables son necesarias para la evolución económica de un país, ayudaría a solucionar problemas de suministros de energía en sectores aislados, un ejemplo de ello es la utilización de energía solar por medio de paneles fotovoltaicos, ayudando a evitar el uso de combustible de otras zonas.(Coviello et al., 2012).Con el potencial en recursos naturales, existentes en Colombia, estas energías son una opción para desarrollar la capacidad de generación del sistema eléctrico.

“Actualmente la empresa Celsia está construyendo la granja solar Yumbo en la ciudad de Cali; con estos proyectos en energías renovables se busca aprovechar el potencial solar de la región y se espera que genere 16GW de energía. Sin embargo, Colombia debe diversificar su matriz energética con más proyectos en los que se aproveche el potencial eólico y solar de la región; para tal fin, es necesario que la regulación impulse el desarrollo de este tipo de proyectos energéticos(Londoño, 2017)”. A continuación, se muestra en la gráfica 2 la utilización de las fuentes de energías renovables en el mundo.

**Gráfica 2.** Utilización de las fuentes de energías renovables en el mundo (Robles Algarin & Rodríguez Álvarez, 2018).



Se observa que tan solo el 19.3% es utilizada en energía renovables. De este porcentaje, se utiliza un 9.1% correspondiente a la biomasa tradicional, por otro lado, un 10.2% es aprovechado en energías renovables modernas, en donde se destacan las hidroeléctricas con el 3.6% y el porcentaje restante está distribuido entre las energías geotérmica, eólica, biogás y energía solar. (Robles Algarin & Rodríguez Álvarez, 2018).

En la actualidad el crecimiento de las energías renovables sigue siendo lento, ya que el interés por estas es relativamente nuevo, esto en comparación con las que en la actualidad se utilizan generadas por combustibles fósiles y energías nucleares.

Colombia siendo uno de los países con un alto potencial para el crecimiento de energías renovables, gracias a sus condiciones climáticas y ubicación geográfica ubicándose en un trópico y en las montañas de los andes. Se ha investigado su potencial de energía

fotovoltaico potencial por las estaciones meteorológicas que están instaladas en el instituto de estudios ambientales (IDEAM). los estudios realizados en la medición de este fueron estaciones de brillo solar y de radiación solar para cada una de las regiones de Colombia encontrando la región de la guajira con el mejor potencial en cuanto energía solar, obteniendo  $2190 \text{ kWh/m}^2$  /año (Robles Algarin & Rodríguez Álvarez, 2018).

En cuanto a energía eólica los estudios más recientes encontrados fueron realizados por la UPME y el IDEAM en el año 2006, estos datos exponen 16 lugares que cuentan con altas velocidades de vientos, en donde se destacan con un alto potencial de energía en las zonas del guajira y cercanías a barranquilla entre  $1000\text{-}1331 \text{ W/m}^2$  (Corpoema, 2010).

La energía producida por biomasa es de gran potencial ya que en Colombia se encuentra una gran cantidad de residuos utilizados en la generación de energía ,entre ellos agrícolas y forestales .según el estudio realizado por la UPME en el año 2006 se encuentra que Colombia dispone aproximadamente de una capacidad energética de  $12,00\text{MWh/año}$ , solo utilizando residuos como la palma de aceite, residuos del café .en este estudio se observó un gran enriquecimiento en el sector agrícola seguido del pecuario y por ultimo residuos orgánicos sólidos urbanos(Corpoema, 2010).

Según estudios realizados por la UPME la energía hidráulica en Colombia se encuentra situado en el cuarto lugar del mundo con una capacidad hidráulica estimada en un potencial de  $25,000\text{MW}$  (Corpoema, 2010). Esta energía es estimada en bajos costos relacionados a su construcción y mantenimiento, la energía hidráulica se cataloga como una energía eficiente que hacen de este prototipo de energías una alternativa favorable. Además, es rentable para las zonas rurales permitiendo la generación de empleos locales, es una

energía con alta competencia con respecto a la generación tradicional de combustibles fósiles (Robles Algarin & Rodríguez Álvarez, 2018).

## 1.4 Termodinámica

### 1.4.1 *Reseña histórica*

La historia de la termodinámica como disciplina científica generalmente comienza con Otto von Guericke, quien construyó y diseñó la primera bomba de vacío en 1650 y demostró el vacío usando su hemisferio de Magdeburgo. Guericke se vio obligado a crear un vacío para refutar la suposición de Aristóteles de que "la naturaleza aborrece el vacío". Poco después de Guericke, el físico y químico Robert Boyle estudió y mejoró el diseño de Guericke, en 1656 trabajó con el científico Robert Hooke para construir una bomba de gas. Usando esta bomba, Boyle y Hooke observaron una correlación entre la presión, la temperatura y el volumen. Con el tiempo, la Ley de Boyle establece que, para un gas a temperatura constante, la presión y el volumen son inversamente proporcionales, y se formulan otras leyes de los gases (Francis Weston Sears, 2002).

La termodinámica es una fase de gran importancia para la física, química y todo lo que engloba la ciencia. Tiene gran relevancia en el ámbito científico y tecnológico, la historia ha sido de manera amable en el avance de la mecánica clásica, la cuántica, magnetismo y química." Los antiguos veían el calor como algo relacionado con el fuego. Los antiguos egipcios consideraban que el calor estaba relacionado con orígenes mitológicos"(Universidad & Autónoma, n.d.) .

### 1.5 Sistemas termodinámicos

La termodinámica es una de las tantas ramas de la física, se encarga de investigar las diferentes transformaciones e interacciones que tiene la energía en forma de calor y trabajo, así como narrar los distintos tipos de estados en equilibrio a nivel microscópico (EErricch AA. MMüüll leer, 2002).

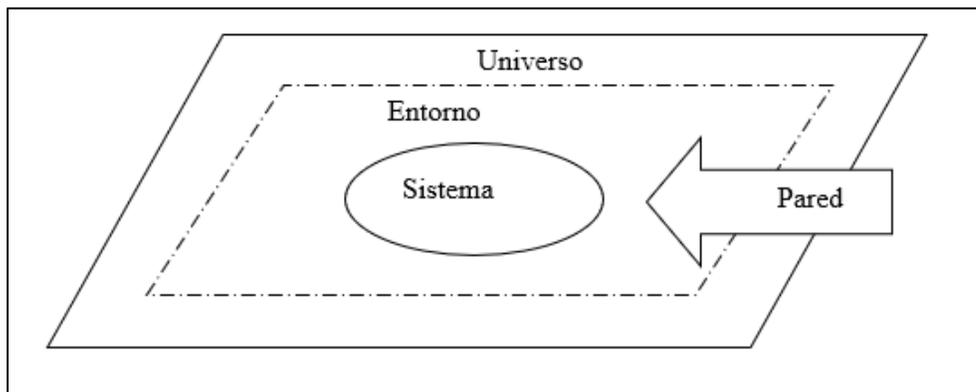
Según la definición anterior se encuentran distintos conceptos, los sistemas termodinámicos, son sistemas que conforman una porción del mundo físico, son aquellos que pueden estar dispuestos a intercambiar ya sea energía o materia en un entorno, se origina una catalogación de los distintos sistemas, en los sistemas termodinámicos, se encuentran los cerrados, abiertos y los aislados. En estos sistemas están delimitados entre fronteras o paredes donde ya bien sea reales o imaginarias evitando el intercambio de materia y energía con su entorno. Conocido esto se puede resaltar que un sistema termodinámico en un objeto de estudio es la transferencia de materia y energía. Un sistema termodinámico debería ser lo suficientemente grande y tener un entorno limitado por fronteras(Gómez-Acebo, 2006) como se representa en la figura 1.

Como ya se ha mencionado los sistemas termodinámicos se conforman por: entorno: conocido como la parte que rodea al sistema, es una región restringida, no necesariamente de volumen constante, en esta parte se realiza el estudio de transferencia y transmisión de masa y energía(Gómez-Acebo, 2006).

**Límite:** también llamados superficies de control, el límite es el espacio o borde que se encuentra entre el sistema y el entorno, dicho espacio o borde se puede tomar de forma imaginaria o real (Gómez-Acebo, 2006).

**Universo:** es el sistema que se Encuentra examinado y su entorno con el que es capaz de interaccionar en su evolución, el universo es en totalidad la suma de sistema y entorno (Gómez-Acebo, 2006).

**Figura 1.** Representación de un sistema termodinámico con elementos: pared y entorno (Ignacio-martínez et al., 2021).



**Fronteras:** En los sistemas termodinámicos estos se encuentran alejados del universo, son llamados alrededores del sistema ya bien sea por paredes imaginarias o reales. Estas paredes pueden ser adiabáticas o adiatérmicas. existen diferentes tipos de fronteras: fijas, permeables a la masa o permeables al calor (Rolle, n.d.).

### **Propiedades**

En termodinámica una característica es la de su forma no es dependiente de su entorno, si no a las condiciones en las que se encuentre el sistema, estas propiedades pueden ser extensivas o intensivas.

**Extensivas:** dependientes de la masa del sistema, entre ellas se encuentra el volumen total, masa total y cantidad de movimiento total.” Si un sistema está constituido por N

subsistemas, se llaman propiedades específicas a las propiedades extensivas por unidad de masa (Gómez-Acebo, 2006; Yunus A., Çengel, 2005). Algunos ejemplos de éstas son:

Ecuación 1

$$v = V/m \quad (1)$$

*volumen específico* (Yunus A., Çengel, 2005).

Ecuación 2

$$e = E/m \quad (2)$$

*energía total específica* (Yunus A., Çengel, 2005).

**Intensivas:** son aquellas propiedades que son autónomas de la masa en un sistema, estas tienen igual magnitud en cualquier condición de un sistema en general, ejemplo: densidad, temperatura presión (Gómez-Acebo, 2006; Yunus A., Çengel, 2005).

“comúnmente, las letras mayúsculas se usan para denotar propiedades extensivas (con la importante excepción de la masa  $m$ ) y las minúsculas para las intensivas (con las excepciones obvias de la presión  $P$  y la temperatura  $T$ )” (Yunus A., Çengel, 2005).

## 1.6 Tipos de sistemas termodinámicos

Los sistemas termodinámicos están clasificados según su transferencia de energía a través del efecto de las interacciones que ejercen sobre el sistema y sus fronteras (Gómez-Acebo, 2006). Dicho lo anterior se clasifican en tres tipos de sistemas (figura 2):

### 1.6.1 Sistema abierto

son aquellos que se encuentran en interacción con el entorno, por lo general los sistemas naturales se encuentran abiertos, hay que destacar que un sistema abierto es lo

contrario aun sistema aislado puesto que no intercambia materia, energía o tiene interacción con el medio ambiente. En un sistema en equilibrio no puede existir un sistema abierto ya que se genera un intercambio entre los sistemas de materia y energía (Julio C. Gil-Atanacio a, Luis A. Villeda-Cruz b, DanielPérez-Segovia c, 2021).En estos sistemas se encuentran distintas aplicaciones como por ejemplo en la parte industrial, se encuentra en la fabricación de turbinas y toberas, en el cuerpo humana todos los órganos se pueden interpretar como un sistema abierto.

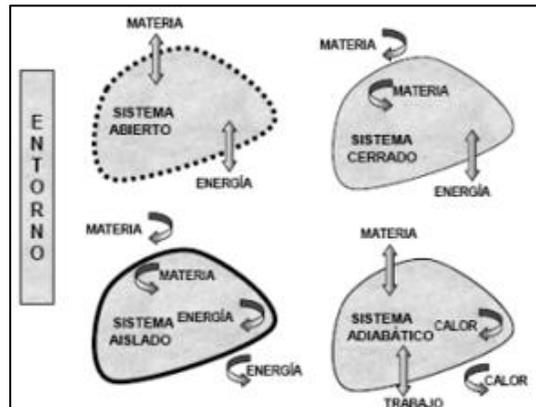
### **1.6.2** *Sistema cerrado*

En estos sistemas se denominan masa de control, la materia en este sistema puede tener un cambio de temperatura ya que es dependiente de su entorno como de su volumen, pero su peso permanece constante. Cabe resaltar que sus paredes son impermeables y sus límites solo permiten el intercambio de trabajo y calor. Estos sistemas se encuentran en distintas aplicaciones desde un teléfono móvil hasta una olla exprés en la cocina, en el planeta tierra este intercambia energía, pero no materia(Ignacio-martínez et al., 2021; Julio C. Gil-Atanacio a, Luis A. Villeda-Cruz b, DanielPérez-Segovia c, 2021).

### **1.6.3** *Sistema aislado*

Es un sistema termodinámico que se encuentra en equilibrio ya que no permite el intercambio de materia y energía con su entorno, esos sistemas se consideran cerrados al encontrarse impermeables, su frontera es adiabática. un ejemplo muy común es el de una bomba de gas puesto que el gas o su contenido se encuentra a presión, su contenido se encuentra aislado de la materia y del intercambio de energía. (Ignacio-martínez et al., 2021; Julio C. Gil-Atanacio a, Luis A. Villeda-Cruz b, DanielPérez-Segovia c, 2021).

**Figura 2.** Representación de los tipos de sistemas térmicos: cerrado, abierto y aislado  
(Corace, 2008)



### 1.7 Tipos de paredes

Un sistema termodinámico tiene una separación en su entorno con diferentes tipos de paredes, algunos de esos tipos son:

#### 1.7.1 Adiabáticas

Las paredes adiabáticas son las que no permiten que el sistema tenga cambios en su grado de calentamiento, su interacción de trabajo está dada entre el sistema y su entorno; estas paredes son vistas como aislantes térmicos, este tipo de pared se encuentra en materiales como asbesto y madera (IRA N. LEVINE, n.d.) .

#### 1.7.2 Diatérmicas

Las paredes diatérmicas son térmicamente conductoras, ya que permite el equilibrio térmico a través del sistema y el entorno, es decir, poseen las mismas temperaturas. Un ejemplo estas paredes son los metales. (Gómez-Acebo,2006)

**Móviles:** en la industria este tipo de paredes son usualmente utilizadas en pistones para un motor de combustión o en un embolo, estas paredes interactúan mecánicamente entre él y su entorno, permitiendo que exista una variación entre el volumen y el sistema (IRA N. LEVINE, n.d.; T E R M O D I N Á M I C A, n.d.).

### **1.7.3** *Rígidas*

Este tipo de pared al ser mecánicamente aislado, no permite que exista una variación del volumen en el sistema, tampoco permite que exista un flujo de energía en forma de trabajo, usualmente este tipo de pared es visto en un huevo o en un tanque de gas (Francis Weston Sears, 2002; IRA N. LEVINE, n.d.)

## **1.8** Leyes de la termodinámica

Las leyes de la termodinámica o también llamados principios son aquellos que describen el comportamiento de cantidades fundamentales como entropía, energía y temperatura. estas leyes son descritas por medio de ecuaciones matemáticas que explican el comportamiento que presentan los sistemas termodinámicos. estos principios que rigen la termodinámica son:

### **1.8.1** *Primera ley de la termodinámica*

El primer principio de la termodinámica o ley de la conservación de la energía establece que en cualquier sistema que se encuentre aislado de su entorno, la energía total que se encuentra en el sistema será de igual magnitud, ya que esta solo puede transformarse y no destruirse. En un sistema cerrado el contenido de energía de una cantidad fija de masa solo

puede cambiar por transferencia de calor y transferencia de trabajo (Yunus A., Çengel, 2005). la conservación de energía para una cantidad de masa está dada por:

$$\dot{Q} - \dot{W} = \frac{dE_{sistema}}{dt} \quad (3)$$

al igual que la ecuación 1, se llega al mismo resultado que con la siguiente ecuación.

$$\dot{Q} - \dot{W} = \frac{d}{dt} \int_{sistema} pe \, dV \quad (4)$$

La tasa neta de transferencia de calor hacia el sistema se da entre la diferencia de calor de entrada y calor de salida, mientras que el trabajo neto de salida se da en la diferencia de trabajo de salida menos el trabajo de entrada dando como resultado la salida de potencial neta. en sistemas simples compresibles la energía total consiste en tres tipos de energía, interna( $u$ ), potencial( $ep$ ) y cinética( $ec$ ), expresadas en unidad de masa (Yunus A., Çengel, 2005).

$$e = u + ec + ep = u + \frac{v^2}{2} + gz \quad (5)$$

La energía total al ser una propiedad su valor no cambia solo si su estado cambia.

### 1.8.2 Segunda ley de la termodinámica

El segundo principio o también conocido como ley de la entropía, es aquel que dicta que un proceso ocurre en una dirección específica, en estos procesos no puede ocurrir si no se satisface la primera ley de la termodinámica o ley de la conservación de la energía, en cada proceso que exista una transformación de energía existe una parte que no es utilizable esta parte no puede realizar trabajo, esa energía se transforma en calor, calor liberado por el sistema haciendo que se aumente el desorden del sistema o su entropía (Yunus A., Çengel,

2005).Esta ley dicta que la diferencia de entropía siempre es igual o mayor a la transferencia de calor .

“El trabajo se puede convertir directamente en calor, pero éste no se puede convertir en trabajo sino únicamente por medio de ciertos dispositivos llamados máquinas térmicas”(Yunus A., Çengel, 2005, p. 315).En termodinámica las maquinas recolectan una parte del calor percibido transformándolo en trabajo, la eficiencia térmica de una maquina se dada por  $W_{\text{net,salida}}$  trabajo neto de salida correspondiente a la máquina,  $Q_H$  es el calor que se le sumista a la máquina y  $Q_L$  es el calor que la maquina otorga ,se proceda a la siguiente ecuación:

$$\eta_{\text{ter}} = \frac{W_{\text{net,salida}}}{Q_H} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H} \quad (6)$$

“El enunciado de Kelvin-Planck de la segunda ley de la termodinámica establece que ninguna máquina térmica puede producir una cantidad neta de trabajo mientras intercambia calor con un solo depósito. El enunciado de Clausius de la segunda ley expresa que ningún dispositivo puede transferir calor de un cuerpo más frío a otro más caliente sin dejar un efecto sobre los alrededores”(Yunus A., Çengel, 2005, p. 316).se observa que este principio no dicta que no es posible la extracción de calor de un foco frio a uno caliente, establece que este proceso nunca será posible sin intervención.

### *1.8.3 Tercera ley de la termodinámica*

El tercer principio de la termodinámica proporciona un punto de referencia con valor absoluto para la obtención de la entropía, plantea que es llevada a cero absoluto o cero unidades de grados kelvin, esta se encuentra como una constante ya definida, en este punto los procesos físicos se detienen, dando a la entropía un valor constante.” Desde un punto de

vista microscópico (a partir de la perspectiva de la termodinámica estadística), un sistema aislado que parece estar en equilibrio puede exhibir un nivel alto de actividad debido al movimiento incesante de las moléculas. A cada estado de equilibrio macroscópico corresponde un gran número de posibles estados microscópicos o configuraciones moleculares; entonces la entropía de un sistema se relaciona con el número total de esos estados posibles de ese sistema y es llamada probabilidad termodinámica  $p$ , que se expresa por la relación de Boltzmann como”(Yunus A., Çengel, 2005, p. 347).

$$S = k \ln p \quad (7)$$

siendo  $k$  una constante de Boltzmann, la entropía aumenta de valor siempre que la incertidumbre molecular, esto se deba que la entropía es una medida de desorden molecular.

#### **1.8.4 Ley cero de la termodinámica**

Este principio es conocido como ley del equilibrio térmico, fue la última en postularse, esta ley establece que “si dos cuerpos están en equilibrio de forma independiente con un tercer cuerpo, deben estar equilibrio térmico entere si “(Yunus A., Çengel, 2005, p. 17).Es decir que si un cuerpo A es igual un cuerpo C y un cuerpo B es igual a un cuerpo C entonces un cuerpo C es igual a un cuerpo B .Según R.H flowler dice que la tercera ley de la termodinámica se puede expresar como “dos cuerpos están en equilibrio térmico si ambos tienen la misma lectura de temperatura incluso si no están en contacto”(Yunus A., Çengel, 2005, p. 17).

### 1.9 Aislantes térmicos

El aislante térmico es un material que es usualmente utilizado en la parte industrial, característico por su alta resistencia térmica, este material cumple con la función de establecer una barrera o pared que impida el paso de calor, se encuentran aislantes térmicos con diferentes proporciones en cuanto a su resistencia térmica. De estos materiales térmicos se destaca el vacío ya que es uno de los mejores aislamientos existentes en donde la transferencia de calor se da exclusivamente por la radiación, este aislante térmico es muy poco utilizado que tiene una gran dificultad al mantener las condiciones de vacío, este tipo de aislamiento usualmente se utiliza en donde se encuentra el aire con niveles bajos de humedad, al tener niveles bajo de conductividad, absorción y radiación impiden la transferencia de calor por conducción (UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA TRABAJO ESTRUCTURADO DE MANERA INDEPENDIENTE PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE: INGENIERO MECÁNICO, n.d.).

### 1.10 Intercambiadores de calor

Ya que existen diferentes tipos de procesos en donde se utilizan implementos de transferencia de calor, existen distintos tipos conocidos como intercambiadores de calor, cada uno de ellos se clasifica de acuerdo a su tipo de construcción.

### 1.10.1 Intercambiadores de doble tubo

Los intercambiadores de doble tubo son clasificados como los más sencillos, están compuestos por dos tubos concéntricos, son conocidos por su bajo costo, bajo mantenimiento, la desventaja de este intercambiador es que no puede mantener fluidos de grandes presiones, donde más se aplica este intercambiador es en sustancias corrosivas.

En general los intercambiadores de doble tubo para su cálculo siguen el mismo esquema, calculado el balance de energía térmico para cada fluido, ecuación general de calor, siendo diferentes en su flujo (Salazar Valdez, J. F., & Segura Obregón, 2001; Yunus A., 2013).

$$q = w_1 \cdot c_{p1} \cdot (T_{1inicial} - T_{final}) \quad (8)$$

Para fluidos con cambio de fase

$$q = W \cdot \Delta H_{cambio\ de\ fase} \quad (9)$$

Ecuación general de calor para la parte externa del tubo

$$q = U_0 \cdot A_0 \cdot \Delta T \log \quad (10)$$

Ecuación general de calor para la parte interna del tubo

$$q = U_i \cdot A_i \cdot \Delta T \log \quad (11)$$

El coeficiente de calor transmitido por el área externa está dado por:

Convección interna  $\frac{A_0}{A_i h_i}$

Resistencia interna  $\frac{A_0}{A_i} R_i$

Conducción a través del grosor de pared  $\frac{A_0}{k 2\pi L} \ln \frac{A_0}{A_i}$

Resistencia externa  $R_0$

Convección externa  $\frac{1}{h_0}$

$$U_0 = \frac{1}{\frac{A_0}{A_i h_i} + \frac{A_0 R_i}{A_i} + \frac{A_0}{k 2 \pi L} \ln \frac{A_0}{A_i} + R_0 + \frac{1}{h_0}} \quad (12)$$

El coeficiente de calor transmitido por el área interna está dado por:

Convección externa  $\frac{A_i}{A_0 h_0}$

Resistencia externa  $\frac{A_i}{A_0} R_0$

Conducción a través del grosor de pared  $\frac{A_i}{k 2 \pi L} \ln \frac{A_i}{A_0}$

Resistencia interna  $R_i$

Convección interna  $\frac{1}{h_i}$

$$U_i = \frac{1}{\frac{A_i}{A_0 h_0} + \frac{A_i R_0}{A_0} + \frac{A_i}{k 2 \pi L} \ln \frac{A_i}{A_0} + R_i + \frac{1}{h_i}} \quad (13)$$

Resistencias producidas en el exterior e interior del tubo está dada por la siguiente ecuación:

$$R_0 = R_i = \frac{x}{k} \quad (14)$$

### 1.10.2 Intercambiadores de calor tipo evaporativo

Este tipo de intercambiadores usualmente son utilizados en enfriadores de gases. En este tipo se utiliza como fluido el agua, en su proceso se riega el fluido sobre los tubos. el calor que se transfiere por los tubos permite que se genere la evaporación del fluido, industrialmente se encuentran en plantas de refrigeración (Salazar Valdez, J. F., & Segura Obregón, 2001; Yunus A., 2013).

### 1.10.3 Intercambiadores de placas

Estos tipos de intercambiadores se encuentran en las industrias alimenticias y farmacéuticas, actúan como repartidores y separadores de fluidos, estos intercambiadores tienen una separación de 0.102 cm a 0.203 cm, la ventaja de la utilización de estos es su flexibilidad de modificar la superficie de calor (Salazar Valdez, J. F., & Segura Obregón, 2001; Yunus A., 2013).

Los pasos a seguir para un diseño de intercambiador de placas son (Luis & Albitres, n.d.):

Calcular la carga de calor

$$Q = mCp(T_1 - T_2) \quad (15)$$

Calcular la temperatura de salida de fluido

$$T_2 = T_1 - \frac{Q}{mcp} \quad (16)$$

Fluido caliente

$$HTU = \frac{T_1 - T_2}{\Delta T_L} \quad (17)$$

Fluido frío

$$HTU = \frac{T_2 - T_1}{\Delta T_L} \quad (18)$$

Determinar el número de placas térmicas  $N_p$  y el número total de canales  $N_c$

$$N_p = \frac{A_0}{2A_p} \quad (19)$$

$$N_c = N_p + 1 \quad (20)$$

Determinar el número de canales paralelos:  $n_p$

$$n_p = V/v \quad (21)$$

Calcular el área total necesaria para la transferencia de calor  $A_0$

$$A_0 = Q/U_0 \Delta T_L F_T \quad (22)$$

#### 1.10.4 Intercambiadores de aletas

Este tipo de intercambiador es utilizado como mecanismo que acelera el enfriamiento de una superficie, por lo cual este mecanismo combina la conducción y la convección de un área. Al incluir una aleta con una pared en seguida el calor será transferido por la pared hacia la aleta. A continuación, se expresa el intercambio de calor en un sólido a un fluido por convección (Miguel Meza, 2015).

$$Q = hA\Delta T \quad (23)$$

Al no poder utilizar la condición para un borde mixto de convección y conducción, se escribe un balance de energía para un elemento  $\Delta x$  de la aleta. Se tiene  $A$  como el área de transferencia, dirigido a una dirección de sentido "x" y el perímetro de una sección rectangular como "p" escrito de la siguiente manera:

$$A = bl$$

$$p = 2(b + l)$$

En esta ecuación se describe un balance de energía para un elemento de sentido  $\Delta x$ .

$$q_x = q_x + \Delta x A + hp\Delta x(T - T_0)$$

$$q_x + \Delta x = q_x + \frac{dq}{dx} \Delta x$$

$$q = -k \frac{dT}{dx} \quad (24)$$

Realizando remplazo en las ecuaciones anteriores se encuentra la ecuación de una aleta

$$\frac{d^2}{dx^2} - m^2(T - T_0) = 0$$

$$m = \left(\frac{hp}{KA}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (25)$$

### 1.10.5 Intercambiadores de serpentín

Los intercambiadores de serpentín son usualmente usados en aplicaciones de enfriamiento para gases a grandes presiones, estos intercambiadores tienen una estructura compacta y permiten altos coeficientes de transferencia de calor (Rafael Bosh, 2015; Salazar Valdez, J. F., & Segura Obregón, 2001; Yunus A., 2013). Para conocer el caudal de calor de un intercambiador de serpentín se utiliza la siguiente ecuación:

$$Q = \Delta T_{CV} \cdot C_{pCV} \cdot m_{CV} = \Delta T_{serpentín} \cdot C_{pserpentín} \cdot m_{serpentín} \quad (26)$$

#### *Cálculo del área del intercambiador de calor tipo serpentín*

$$A_{serpentín} = \frac{Q}{U_{serpentín} \cdot DTML} \quad (27)$$

#### *Cálculo de la variación media logarítmica de la temperatura de un serpentín*

$$DTML = \frac{(T - T_{sal}) - (T - T_{ent})}{\ln((T - T_{sal}) / (T - T_{ent}))} \quad (28)$$

#### *Cálculo de la longitud de un intercambiador de calor tipo serpentín*

$$L_{serpentín} = \frac{A_{serpentín}}{\pi \cdot D_{serpentín}} \quad (29)$$

#### *Cálculo del diámetro interior de un intercambiador de calor tipo serpentín*

$$D_{serpentín} = \sqrt{\frac{A_{paso} \cdot 4}{\pi}} \quad (30)$$

### 1.11 Acumuladores térmicos

El almacenamiento de energía térmica es comúnmente utilizado para la producción de energía en donde los periodos de consumo y producción no coinciden, al momento de mantener la energía térmica se distinguen de dos maneras de acumular la energía, se genera una alta energía almacenando calor, se generan grandes cambios en la entalpia haciendo rupturas y creaciones de enlaces químicos, se da con el almacenamiento de calor latente y sensible, para la utilización de un material la cantidad de energía absorbida depende de la temperatura que pueda soportar la masa, para saber eso se da la siguiente ecuación:

$$Q = \int_{T_1}^{T_2} mc_p dT \quad (31)$$

El calor específico del material a presión constante es denotada  $c_p$ , la masa, la temperatura inicial y final ( $m, T_1, T_2$ ) correspondientemente. En esta ecuación se observa que el encuentra un alto nivel de almacenamiento de calor en materiales como las rocas o derivados de ellas, ya que son densos, los materiales PCM en rangos de temperaturas bajas absorbiendo calor latente se estima que pueden funcionar mejor los materiales con función de almacenar calor sensible. Los materiales PCM al exponerse a temperaturas hasta llegar a su punto de fusión reacciona cambiando de fase, se concluye como un proceso isotérmico que requiere la entrada de energía para poder hacer cambio de calor latente (entalpia), este proceso es reversible cuando el material se enfría se genera una devolución de energía, se consigue un almacenamiento de calor sensible cuando se añade calor para producir la elevación de temperatura a la que se necesita el material para que realice su proceso, para proceder a una acumulación de energía en el cambio de fase logrando el almacenamiento de temperatura (Yunus A., 2013).

Al iniciar se puede utilizar cualquier proceso de cambio de fase en PCMs ya bien sea solido líquido, liquido gas, entre otros, el más usado es la transición de solido-liquido, en los procesos en donde hay cambios de líquido y gas su entalpia tiene una transición de 300 j/g, obtienen una gigantesca energía produciendo cambios significativos en los tamaños del material, por lo cual genera problemas que en la actualidad aún se encuentra sin utilizar(Sales, 2019).

En el momento de seleccionar el PCM que a utilizar se debe tener en cuenta factores como la temperatura de transición, siendo esta la más importante, ya que en caso de elegir un material con una temperatura de transición fuera de nuestro rango útil de temperaturas no se llegara a producir el cambio de fase almacenando solamente calor sensible. Lo segundo a tener en cuenta es el calor latente transmitido por el material, ya que habilita el poder almacenar una mayor cantidad de energía, en el caso de tener espacio delimitado hay que tener en cuenta la expansión producida durante el cambio de fase, sin descartar la productividad térmica del material ya que se puede llevar a un excesivo tiempo de carga y descarga del material, el coste y su estabilidad, y así poder realizar diseños con una vida útil alta. Sabiendo que con el paso del tiempo no reacciona con el aire, con el moho, o que su estructura no se va a degradar a medida que se siga utilizando, y por último se debe tener en cuenta la estabilidad en los ciclos de carga y de descarga, estos dependen directamente del material, aún que la fundición o cristalización no deberían de afectar al material (Sales, 2019).

## 1.12 Materiales con cambio de fase

Son aquellos materiales o sustancias que tienen la capacidad de almacenar calor, distinguidos por el valor de fusión de calor elevada, que es apto para mantener y soltar cuantiosas cantidades de energía, cabe resaltar que estos materiales tienen distintas aplicaciones de almacenamiento de energía térmica, el proceso de estos materiales es el de la absorción de calor o liberación cuando la sustancia cambia de estar y una fase de sólido a líquido, llamado punto de fusión.” Los cambios de fase pueden ser sólido-líquido, líquido-vapor y sólido-sólido. El cambio de fase líquido-vapor casi no se utiliza debido a que el vapor genera grandes presiones y en muchos casos no resulta práctico trabajar con este tipo de sistemas debido a que este tiene que ser diseñado para soportar presiones altas y por lo tanto se hace más complicado y costoso”(Almudena, n.d., p. 27). El objetivo para el que son diseñados es evitar la pérdida de calor mediante la absorción o desprendimiento de este (María Carolina Samudio Torres, 2007). Los PCM están clasificados en orgánicos e inorgánicos, la aplicación de cada uno de estos materiales depende era del campo de ejecución y las propiedades que se necesite para el sistema a utilizar.

### *1.12.1 Materiales con cambio de fase orgánicos*

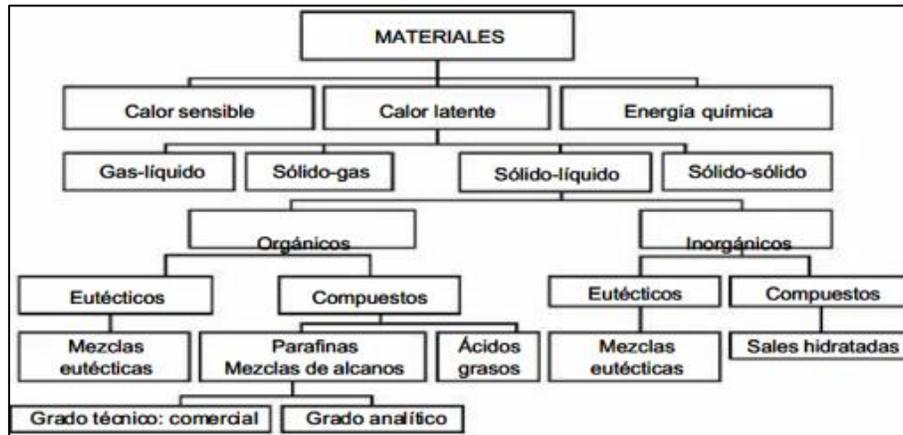
Los materiales orgánicos con aquellos derivados de las aceras y del refinado crudo de petróleo, en estos materiales las más conocida es la parafina” ofrece de cuatro a cinco veces mayor capacidad de acumulación por unidad de volumen o masa que el agua cuando se trabaja con bajos gradientes de temperatura. Las parafinas son estables hasta 250°C aproximadamente”(Almudena, n.d., p. 32) ,los orgánicos tienen la ventaja que son estables químicamente como térmica ,al tener esta ventaja no tienen el efecto de proporcionar

corrosión con los materiales que se encuentre en contacto ,las desventajas de este tipo es que son inflamables y su capacidad de almacenar energía es menor que la de un material inorgánico, se encuentran que poseen un calor específico de 2.1 kJ/kg·K y alrededor de un rango de temperaturas de fusión de entre 20°C y 80°C.Por otra parte tienen un alto calor de fusión, en rangos de 70-250 kJ/kg y gran densidad de energía acumulada, entre 54-71 kW·h/m<sup>3</sup>su viscosidad pose valores bajos en fase líquida y baja conductividad térmica(Javier Garcia Mayayo, 2012).

### *1.12.2 Materiales con cambio de fase inorgánicos*

Los materiales inorgánicos a comparaciones de los orgánicos tienen una mayor capacidad de almacenar energía y no son inflamables, pero a diferencia que los inorgánicos estos presentan inestabilidad térmica y son altamente corrosivos en contactos con otros materiales, en los inorgánicos se encuentran las sales hidratadas, pero al igual que las parafinas tienen un punto de fusión bajo,” En concreto la sal de Gauber ( $\text{Na}_2\text{SO}_4\cdot\text{H}_2\text{O}$ ) ha sido muy estudiada históricamente. Su punto de fusión se sitúa en 32.4 °C y un calor latente de 254 kJ/kg. Además, es uno de los materiales más baratos para el uso como PCM.” (Almudena, n.d., p. 13) . a continuación, se ilustra un mapa con la clasificación y selección de materiales de cambio de fase según sus características para la aplicación en los distintos sistemas de almacenamiento de energía (figura3).

**Figura 3.** Clasificación de sustancias usadas para el almacenamiento térmico (Oliver et al., 2012, p. 3).

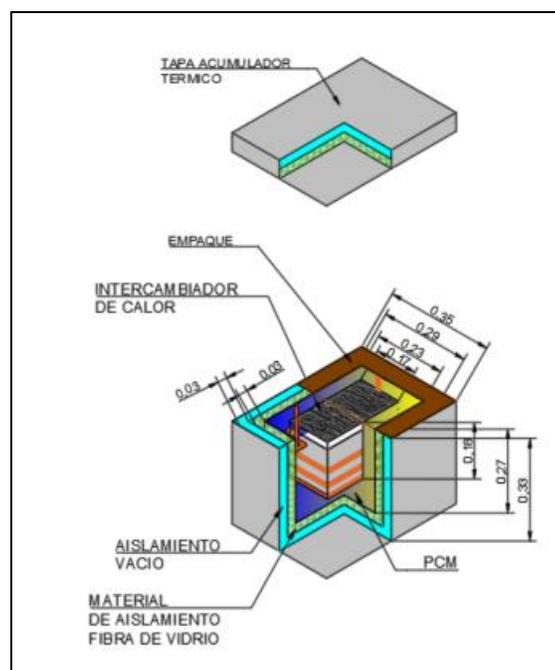


## 2. Diseño De Acumulador Térmico Con Material De Cambio De Fase

### 2.1 Pre-dimensionamiento estructural del acumulador térmico con material de cambio de fase

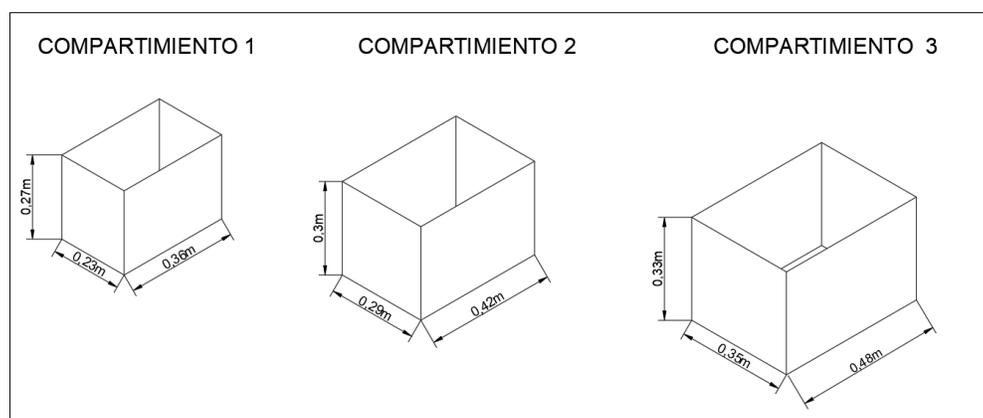
El prototipo del acumulador térmico con material de cambio de fase se conforma por una estructura metálica, se escoge este material por tener una gran resistencia a la intemperie, y reutilizable, se selecciona una estructura cuadrada ya que por cuestión de manufactura y costos es la opción más viable, siendo esta más fácil de acoplar al intercambiador térmico, se encuentra dividida con diferentes compartimientos en los cuales serán incluidos cada uno de los componentes de este acumulador como los son el intercambiador, el material PCM, la unidad eléctrica de calentamiento y materiales aislantes como se observa en la figura 4.

**Figura 4.** Estructura acumulador térmico con material de cambio de fase (autoría propia)



En la figura 5 se presentan las dimensiones de cada uno de los compartimientos que conforman la estructura del acumulador térmico con material de cambio de fase.

**Figura 5.** Dimensiones de los compartimientos de la estructura del acumulador térmico con material de cambio de fase (autoría propia)



## 2.2 Selección material de PCM

Para la selección del PCM que será utilizado en el prototipo del Acumulador, se evaluaron varias características importantes de tres PCM, parafina, sal de gauber y ácidos grasos, en la tabla 1 se presentan algunas de sus propiedades.

**Tabla 1.** Propiedades PCM. (autoría propia)

PROPIEDADES PCM				
Alt No	PCM	TEMPERATURA DE FUSIÓN	VENTAJAS	DESVENTAJAS
Alt 1	SAL DE GAUBER	32°C	-Material económico. -Temperatura de cambio de fase definida. -Alta conducción térmica.	-Corrosión con algunos materiales. -Subenfriamiento. -El uso prolongado necesita aditivos.
Alt 2	PARAFINA COMERCIAL	56°C-80°C	-Buena estabilidad térmica.	-Baja entalpia de fusión. -Baja conductividad térmica.

PROPIEDADES PCM				
Alt No	PCM	TEMPERATURA DE FUSIÓN	VENTAJAS	DESVENTAJAS
Alt 2			-No corrosivo. -Bajo impacto ambiental. -No hay subenfriamiento.	-Inflamable -Costo elevado.
Alt 3	ÁCIDOS GRASOS	56°C-80°C	-Buena estabilidad térmica. -No corrosivo. -Bajo impacto ambiental. -No hay subenfriamiento.	-Baja entalpia de fusión. -Baja conductividad térmica. -Inflamable -Costo tres veces más alto que la parafina.

Se procede a generar una matriz de alternativas donde se calificará cada una de las propiedades según el criterio propio y el que más se ajuste a las necesidades del actual proyecto, en la tabla 2 se presenta la calificación de los PCM.

**Tabla 2.** *Matriz de alternativas (autoría propia)*

MATRIZ DE ALTERNATIVAS									
Componente a considerar	Criterio de evaluación	Unidad	ponderación por criterio	Escala de comparación			Resultado		
				Alt 1	Alt 2	Alt 3	Alt 1	Alt 2	Alt 3
Componente Técnico	Costo	Escala discreta (1 menos favorable, 5 más favorable)	10%	5	4	2	0,5	0,4	0,2
	Temperatura de Fusión	Escala discreta (1 menos favorable, 5 más favorable)	25%	3	5	5	0,75	1,25	1,25

MATRIZ DE ALTERNATIVAS									
Componente a considerar	Criterio de evaluación	Unidad	ponderación por criterio	Escala de comparación			Resultado		
				Alt 1	Alt 2	Alt 3	Alt 1	Alt 2	Alt 3
	Corrosivo	Escala discreta (1 menos favorable, 5 más favorable)	10%	1	5	5	0,1	0,5	0,5
	Subenfriamiento	Escala discreta (1 menos favorable, 5 más favorable)	20%	1	5	5	0,2	1	1
	Impacto ambiental	Escala discreta (1 menos favorable, 5 más favorable)	10%	1	4	4	0,1	0,4	0,4
	Estabilidad térmica	Escala discreta (1 menos favorable, 5 más favorable)	25%	1	4	4	0,25	1	1
Total			100%				1,9	4,55	4,35

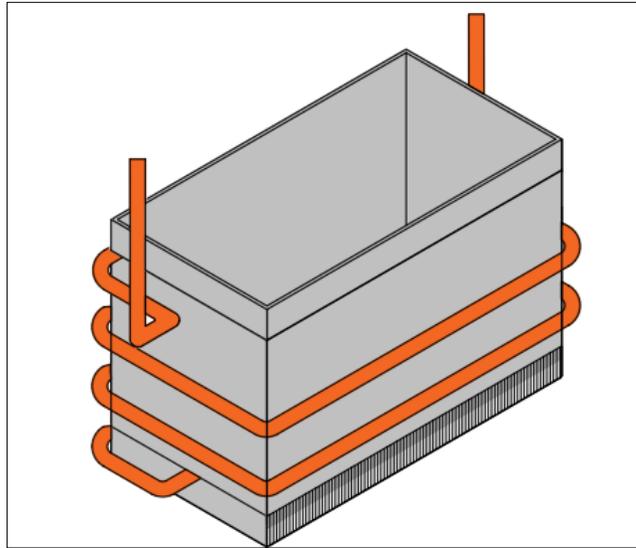
En la tabla 2 la alternativa con mayor puntuación es la numero 2, que tiene como PCM la parafina comercial y es el material seleccionado para ser utilizado en este proyecto.

### 2.3 Selección del intercambiador de Calor

Existen varias clases de intercambiadores de calor. Pero debido a la baja capacidad de transferencia de calor del PCM, se selecciona un intercambiador de tipo compacto con configuración de tubos y aletas, con el fin de elevar la eficiencia de intercambio y transferencia al aumentar la superficie.

Este se obtuvo de un calentador de paso a gas que se compone de un serpentín de cobre y aletas en hierro en la parte inferior del intercambiador. Como se muestra en la figura 6.

**Figura 6.** Intercambiador de calor compacto (autoría propia)



#### 2.4 Resistencia eléctrica

Se utilizó la resistencia eléctrica de una cocineta comercial, con una potencia eléctrica de 1200 W (1.2 kw) figura 7. Como fuente de energía para la transferencia de calor.

**Figura 7** Resistencia eléctrica 1200w



## 2.5 Transferencia de energía desde resistencia a PCM y estructura 1 del acumulador.

Para este diseño es necesario elevar la temperatura de la parafina de una temperatura ambiente de 19 °C a una temperatura de 80 °C en la estructura 1 de acumulador equipada con una resistencia eléctrica de 1200W. Se tiene que la masa de la parafina es de 6,5 Kg con un calor específico de 3,2 kJ/(kg) y la estructura tiene una masa de 4,11 kg y un calor específico de 0.45 kJ/kg.

$$E_{ent} = (mc\Delta T)_{parafina} + (mc\Delta T)_{estructura\ 1} \quad (32)$$

Donde:

$E_{ent}$ : Energía necesaria para elevar la temperatura de 19 °C a 80 °C.

m: masa

c: calor específico.

$\Delta T$ : diferencia de temperatura.

$$E_{ent} = (6,5\text{ kg}) * (3,2\text{ kJ/kg} * ^\circ\text{C}) * (80 - 19)_{parafina} + (4,11\text{ kg})(0,45\text{ kJ/kg} * ^\circ\text{C})(80 - 19)_{estructura\ 1}$$

$$E_{ent} = 1381,62\text{ KJ}$$

El total de energía necesaria para elevar la temperatura para 6.5 kg de parafina comercial es de 1381,62 KJ.

## 2.6 Tiempo necesario para que la unidad de calentamiento suministre los 1381,62 KJ de calor

$$\Delta t = \frac{E_{ent}}{\dot{E}_{transferencia}} \quad (35)$$

$\Delta t$ : tiempo necesario para suministrar el calor

$E_{ent}$ : Energía total transferida

$\dot{E}_{transferencia}$ : Velocidad de transferencia de la energía

$$\Delta t = \frac{1381.62 \text{ KJ}}{1.2 \text{ KJ/s}}$$

$$\Delta t = 1151.35 \text{ s} = 19.19 \text{ min}$$

El tiempo aproximado necesario para lograr que se suministre 1381,62 KJ es de 19,19 minutos.

Se realizó una toma de datos con el fin de hacer una comparación entre el tiempo teórico y el tiempo experimental en el que se logra alcanzar una energía de 1381,62 KJ en la parafina. Datos que se encuentran en la tabla 3.

**Tabla 3.** *Ganancia de temperatura con respecto al tiempo (autoría propia)*

Fecha	hh:mm:ss	T °C ambiente	T °C acumulador	Fecha	hh:mm:ss	T °C ambiente	T °C acumulador
23/04/2023	01:09:43	19,35	34				
23/04/2023	01:15:56	19,4	35	23/04/2023	01:29:27	19,4	58
23/04/2023	01:17:31	19,4	36	23/04/2023	01:29:51	19,4	59
23/04/2023	01:18:35	19,4	37	23/04/2023	01:30:16	19,4	60
23/04/2023	01:19:26	19,4	38	23/04/2023	01:30:40	19,4	61
23/04/2023	01:20:10	19,4	39	23/04/2023	01:31:04	19,39	62
23/04/2023	01:20:50	19,4	40	23/04/2023	01:31:28	19,4	63
23/04/2023	01:21:26	19,4	41	23/04/2023	01:31:52	19,4	64
23/04/2023	01:22:01	19,4	42	23/04/2023	01:32:17	19,4	65
23/04/2023	01:22:34	19,4	43	23/04/2023	01:32:40	19,4	66
23/04/2023	01:23:06	19,39	44	23/04/2023	01:33:04	19,41	67
23/04/2023	01:23:37	19,39	45	23/04/2023	01:33:29	19,4	68
23/04/2023	01:24:06	19,4	46	23/04/2023	01:33:54	19,4	69
23/04/2023	01:24:35	19,39	47	23/04/2023	01:34:21	19,41	70
23/04/2023	01:25:02	19,4	48	23/04/2023	01:34:49	19,41	71
23/04/2023	01:25:31	19,39	49	23/04/2023	01:35:19	19,42	72
23/04/2023	01:25:58	19,39	50	23/04/2023	01:35:53	19,42	73
23/04/2023	01:26:25	19,4	51	23/04/2023	01:36:31	19,42	74
23/04/2023	01:26:52	19,4	52	23/04/2023	01:37:14	19,43	75
23/04/2023	01:27:18	19,39	53	23/04/2023	01:38:01	19,44	76

Fecha	hh:mm:ss	T °C ambiente	T °C acumulador	Fecha	hh:mm:ss	T °C ambiente	T °C acumulador
23/04/2023	01:27:44	19,39	54	23/04/2023	01:38:58	19,45	77
23/04/2023	01:28:10	19,39	55	23/04/2023	01:40:07	19,46	78
23/04/2023	01:28:36	19,4	56	23/04/2023	01:41:41	19,48	79
23/04/2023	01:29:01	19,4	57	23/04/2023	01:44:56	19,51	80

Se logra determinar que la diferencia de tiempo entre el tiempo hallado teóricamente y el tiempo tomado experimentalmente es de aproximadamente 15 minutos.

### 2.7 Razón de transferencia de calor hacia la parafina.

$$\dot{Q}_{prom} = \frac{Q}{\Delta t} \quad (33)$$

Donde:

$\dot{Q}_{prom}$  : Razón de transferencia.

Q: Transferencia de energía en el sistema.

$\Delta t$ : Derivada con respecto al tiempo.

$$\dot{Q}_{prom} = \frac{1381.62 \text{ kJ}}{2100 \text{ s}}$$

$$\dot{Q}_{prom} = 0,658 \text{ kJ/s}$$

$$\dot{Q}_{prom} = 658 \text{ W}$$

La razón promedio de transferencia de calor hacia la parafina es de 658 W en un tiempo estimado de 35 minutos.

### 2.8 Flujo de calor desde la resistencia eléctrica hacia el área transversal del acumulador y parafina.

$$\dot{q}_{prom} = \frac{\dot{Q}_{prom}}{A} \quad (34)$$

Donde:

$\dot{q}_{prom}$ : Flujo de calor

A: Área perpendicular.

$$\dot{q}_{prom} = \frac{658 W}{0,48 m^2}$$

$$\dot{q}_{prom} = 1358,94 W/m^2$$

Dado que la tasa de flujo de calor es necesario para las pérdidas de calor en el diseño de intercambiadores el flujo de calor proporcionado por este sistema es de  $1358,94 W/m^2$ .

## 2.9 Razón de calor por conducción

$$Q_{cond} = k A_{sup} * \frac{\Delta t}{esp}$$

$$k: \text{conductividad termica} : \frac{80.2w}{m^{\circ}C}$$

$$A_{sup} = \text{area superficial}$$

$$\Delta t = \text{diferencia de temperatura}$$

$$esp = \text{espesor de la lamina} = 0.0011m$$

$$a = 0.36m$$

$$b = 0.23m$$

$$h = 0.27m$$

$$A_{sup} = 2(a * b) + (a * h) + (b * h)$$

$$A_{sup} = 2((0.36 * 0.23) + (0.36 * 0.27) + (0.23 * 0.27)) = 0.48m^2$$

$$\dot{Q}_{cond} = \left( \left( \frac{80.2w}{m^{\circ}C} \right) (0.487m^2) \frac{(80 - 19)C^{\circ}}{0,0011m} \right) = 2165.91kw$$

La conducción es un proceso de contacto directo entre dos cuerpos, donde el calor fluye desde un cuerpo con mayor temperatura a otro con una temperatura menor, se estima la razón de conducción de calor de  $2165.91 \text{ kw}$ .

## 2.10 Análisis multidimensional de pérdidas por conducción del acumulador térmico

Es necesario hacer el análisis multidimensional del acumulador térmico debido a que la temperatura varía a lo largo de tres dimensiones.

- Razón de transferencia

$$Q = kA_{sup} * \frac{\Delta t}{L}$$

$k$ : conductividad térmica =  $80.2 \text{ W/m}^\circ\text{C}$

$A_{sup}$  = área superficial

$\Delta t$  = diferencia de temperatura

$L$  = espesor de la lámina

- Coeficiente de transferencia

$$h = \frac{Q}{L(T_s - T_\infty)} \quad (36)$$

$Q_{conv}$ : Transferencia de calor por convección.

$A_s$ : Área superficial.

$T_2$ : Temperatura del fluido.

$T_1$ : Temperatura ambiente.

- Numero de Biot

$$Bi = \frac{hL}{k}$$

- Tiempo adimensional

$$\tau = \frac{\alpha t}{l^2}$$

Donde

$\alpha$  : difusividad térmica

- Temperatura adimensional pared

$$\theta_{pared} = A_1 * e^{-\lambda_1^2 * \tau}$$

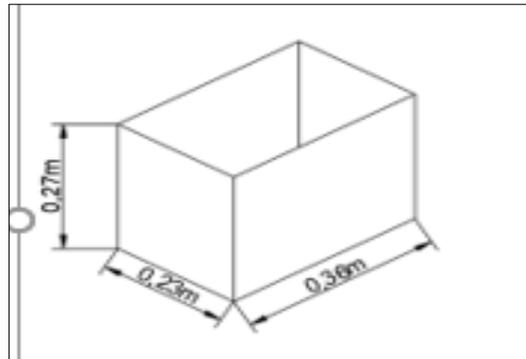
Donde los valores de  $\lambda$  y A se pueden encontrar en la tabla 4.

**Tabla 4.** Coeficientes usados en la solución aproximada de un término de la conducción (Transferencia\_de\_Calor\_y\_Masa\_Yunus\_Ceng, n.d., p. 231)

TABLA 4-2							239 CAPÍTULO 4		
Coeficientes usados en la solución aproximada de un término de la conducción de calor unidimensional en régimen transitorio en paredes planas, cilindros y esferas (Bi = hL/k para una pared plana de espesor 2L y Bi = hr <sub>c</sub> /k para un cilindro o una esfera de radio r <sub>c</sub> )							TABLA 4-3		
Bi	Pared plana		Cilindro		Esfera		η	J <sub>0</sub> (η)	J <sub>1</sub> (η)
	λ <sub>1</sub>	A <sub>1</sub>	λ <sub>1</sub>	A <sub>1</sub>	λ <sub>1</sub>	A <sub>1</sub>			
0.01	0.0998	1.0017	0.1412	1.0025	0.1730	1.0030	0.0	1.0000	0.0000
0.02	0.1410	1.0033	0.1995	1.0050	0.2445	1.0060	0.1	0.9975	0.0499
0.04	0.1987	1.0066	0.2814	1.0099	0.3450	1.0120	0.2	0.9900	0.0995
0.06	0.2425	1.0098	0.3438	1.0148	0.4217	1.0179	0.3	0.9776	0.1483
0.08	0.2791	1.0130	0.3960	1.0197	0.4860	1.0239	0.4	0.9604	0.1960
0.1	0.3111	1.0161	0.4417	1.0246	0.5423	1.0298	0.5	0.9385	0.2423
0.2	0.4328	1.0311	0.6170	1.0483	0.7593	1.0592	0.6	0.9120	0.2867
0.3	0.5218	1.0450	0.7465	1.0712	0.9208	1.0880	0.7	0.8812	0.3290
0.4	0.5932	1.0580	0.8516	1.0931	1.0528	1.1164	0.8	0.8463	0.3688
0.5	0.6533	1.0701	0.9408	1.1143	1.1656	1.1441	0.9	0.8075	0.4059
0.6	0.7051	1.0814	1.0184	1.1345	1.2644	1.1713	1.0	0.7652	0.4400
0.7	0.7506	1.0918	1.0873	1.1539	1.3525	1.1978	1.1	0.7196	0.4709
0.8	0.7910	1.1016	1.1490	1.1724	1.4320	1.2236	1.2	0.6711	0.4983
0.9	0.8274	1.1107	1.2048	1.1902	1.5044	1.2488	1.3	0.6201	0.5220
1.0	0.8603	1.1191	1.2558	1.2071	1.5708	1.2732	1.4	0.5669	0.5419
2.0	1.0769	1.1785	1.5995	1.3384	2.0288	1.4793	1.5	0.5118	0.5579
3.0	1.1925	1.2102	1.7887	1.4191	2.2889	1.6227	1.6	0.4554	0.5699
4.0	1.2646	1.2287	1.9081	1.4698	2.4556	1.7202	1.7	0.3980	0.5778
5.0	1.3138	1.2403	1.9898	1.5029	2.5704	1.7870	1.8	0.3400	0.5815
6.0	1.3496	1.2479	2.0490	1.5253	2.6537	1.8338	1.9	0.2818	0.5812
7.0	1.3766	1.2532	2.0937	1.5411	2.7165	1.8673	2.0	0.2239	0.5767
8.0	1.3978	1.2570	2.1286	1.5526	2.7654	1.8920	2.1	0.1666	0.5683
9.0	1.4149	1.2598	2.1566	1.5611	2.8044	1.9106	2.2	0.1104	0.5560
10.0	1.4289	1.2620	2.1795	1.5677	2.8363	1.9249	2.3	0.0555	0.5399
20.0	1.4961	1.2699	2.2880	1.5919	2.9857	1.9781	2.4	0.0025	0.5202
30.0	1.5202	1.2717	2.3261	1.5973	3.0372	1.9898	2.6	-0.0968	-0.4708
40.0	1.5325	1.2723	2.3455	1.5993	3.0632	1.9942	2.8	-0.1850	-0.4097
50.0	1.5400	1.2727	2.3572	1.6002	3.0788	1.9962	3.0	-0.2601	-0.3391
100.0	1.5552	1.2731	2.3809	1.6015	3.1102	1.9990	3.2	-0.3202	-0.2613
∞	1.5708	1.2732	2.4048	1.6021	3.1416	2.0000			

### 2.10.1 Análisis multidimensional estructura 1 (figura 8)

**Figura 8.** Estructura 1 del acumulador térmico (autoría propia)



A continuación, se presentan la tabla 5 resumen para el cálculo de las variables de la estructura 2 nombradas en el numeral 2.10.

**Tabla 5.** Memoria de cálculo temperatura adimensional en el eje x,y,z para la estructura 1 (autoría propia)

t	1600	s	t	1600	s	t	1600	s
$\alpha$	0.0000231	m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup>	$\alpha$	0.0000231	m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup>	$\alpha$	0.0000231	m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup>
$A_s$	0.4842	m <sup>2</sup>	$A_s$	0.4842	m <sup>2</sup>	$A_s$	0.4842	m <sup>2</sup>
X	0.23	m	X	0.23	m	X	0.23	m
Y	0.27	m	Y	0.27	m	Y	0.27	m
Z	0.36	m	Z	0.36	m	Z	0.36	m
K	80.2	w/m*K	K	80.2	w/m*K	K	80.2	w/m*K
$T_2$	80	°C	$T_2$	80	°C	$T_2$	80	°C
$T_1$	19	°C	$T_1$	19	°C	$T_1$	19	°C
L	0.115	m	L	0.135	m	L	0.18	m
Q	20598.28904	W	Q	17546.6907	W	Q	13160.018	W
h	2936.320605	w(m <sup>2</sup> *k)	h	2130.74568	w(m <sup>2</sup> *k)	h	1198.54444	w(m <sup>2</sup> *k)
Bi	4.210434783		Bi	3.58666667		Bi	2.69	
$\tau$	2.794706994		$\tau$	2.02798354		$\tau$	1.14074074	
$\lambda$	1.27444		$\lambda$	1.1566		$\lambda$	1.2343	
$A_1$	1		$A_1$	1		$A_1$	1	
$\theta_{pared}$	0.231567511	eje x	$\theta_{pared}$	0.24341707	eje y	$\theta_{pared}$	0.11797861	eje z

$$\theta_{(x,y,z)} = \theta(x, t)\theta(y, t), (z, t)$$

$$\theta_{(x,y,z)} = 0.00665017$$

$$T_{(x,y,z)} = 19,41 \text{ °C}$$

Se determina que la temperatura central de la estructura 1 es de 19,41 °C. Seguido calcula la distribución de la temperatura en la estructura 1 con respecto a la distancia como se muestra en la tabla 6 utilizando la siguiente expresión.

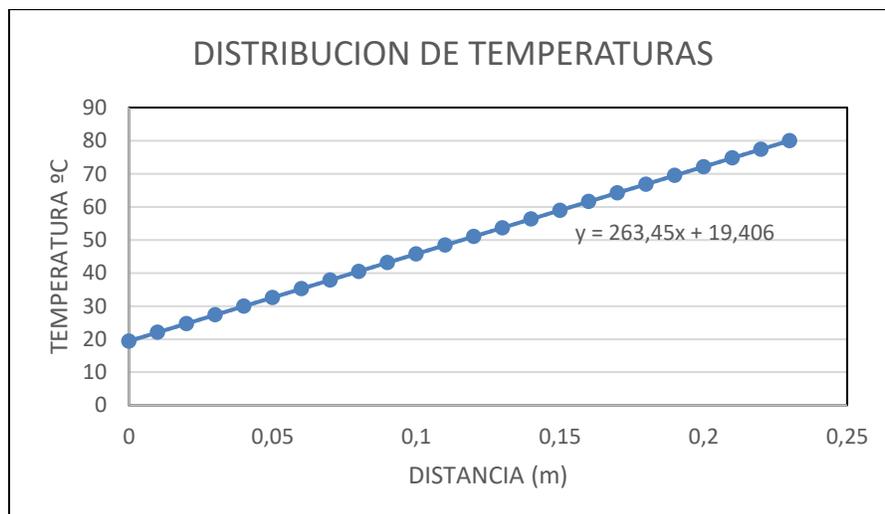
$$T_x = \left( \frac{(T_2 - T_1) x}{L} \right) + T_2$$

**Tabla 6.** Memoria de cálculo de la distribución de temperatura con respecto a la distancia en la estructura 1 (autoría propia)

$T_1$		19.41	
$T_2$		80	
L		0.23	
X	T(x)	X	T(x)
0	19.41	0.12	51.02
0.01	22.04	0.13	53.65
0.02	24.67	0.14	56.29
0.03	27.31	0.15	58.92
0.04	29.94	0.16	61.56
0.05	32.58	0.17	64.19
0.06	35.21	0.18	66.83
0.07	37.85	0.19	69.46
0.08	40.48	0.2	72.10
0.09	43.12	0.21	74.73
0.1	45.75	0.22	77.37
0.11	48.39	0.23	80.00

Con los datos hallados en tabla 6 se obtiene la gráfica lineal de distribución de temperaturas en la estructura 1 como se presenta en la gráfica 3.

**Gráfica 3.** Distribución lineal de temperatura en la estructura 1 (autoría propia)



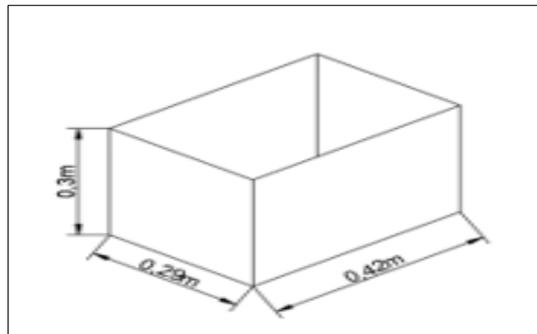
Con los resultados obtenidos en los cálculos anteriores se puede ver cómo se comportan las temperaturas en los diferentes puntos de la estructura 1 como se representa en la figura 9

**Figura 9.** Líneas isotérmicas para la distribución de temperatura en la estructura 1 (autoría propia)

DISTRIBUCION DE TEMPERATURAS RECIPIENTE 1																									
	19.4	22	24.7	27.3	29.9	32.6	35.2	37.8	40.5	43.1	45.8	48.4	51	53.7	56.3	58.9	61.6	64.2	66.8	69.5	72.1	74.7	77.4	80	
19.4	20.7	22.8	25.2	27.7	30.2	32.8	35.4	38	40.6	43.2	45.8	48.4	51	53.6	56.2	58.8	61.4	64	66.6	69.2	71.7	74.2	76.6	78.7	80
19.4	21.2	23.3	25.6	28	30.5	33	35.5	38.1	40.7	43.2	45.8	48.4	51	53.6	56.2	58.7	61.3	63.9	66.4	68.9	71.4	73.8	76.1	78.2	80
19.4	21.5	23.6	25.9	28.3	30.7	33.2	35.7	38.2	40.8	43.3	45.9	48.4	51	53.5	56.1	58.6	61.2	63.7	66.2	68.7	71.1	73.5	75.8	77.9	80
19.4	21.6	23.8	26.1	28.5	30.9	33.3	35.8	38.3	40.8	43.4	45.9	48.4	51	53.5	56	58.6	61.1	63.6	66.1	68.5	70.9	73.3	75.6	77.8	80
19.4	21.7	23.9	26.3	28.6	31	33.5	35.9	38.4	40.9	43.4	45.9	48.4	51	53.5	56	58.5	61	63.5	65.9	68.4	70.8	73.1	75.5	77.7	80
19.4	21.7	24	26.4	28.7	31.1	33.6	36	38.5	41	43.4	45.9	48.4	51	53.5	56	58.4	60.9	63.4	65.8	68.3	70.7	73	75.4	77.7	80
19.4	21.7	24.1	26.4	28.8	31.2	33.6	36.1	38.5	41	43.5	46	48.5	50.9	53.4	55.9	58.4	60.9	63.3	65.8	68.2	70.6	73	75.3	77.7	80
19.4	21.8	24.1	26.5	28.9	31.3	33.7	36.1	38.6	41	43.5	46	48.5	50.9	53.4	55.9	58.4	60.8	63.3	65.7	68.1	70.5	72.9	75.3	77.6	80
19.4	21.8	24.1	26.5	28.9	31.3	33.7	36.2	38.6	41.1	43.5	46	48.5	50.9	53.4	55.9	58.3	60.8	63.2	65.7	68.1	70.5	72.9	75.3	77.6	80
19.4	21.8	24.2	26.5	28.9	31.4	33.8	36.2	38.6	41.1	43.5	46	48.5	50.9	53.4	55.9	58.3	60.8	63.2	65.6	68	70.5	72.9	75.2	77.6	80
19.4	21.8	24.2	26.6	29	31.4	33.8	36.2	38.7	41.1	43.6	46	48.5	50.9	53.4	55.8	58.3	60.7	63.2	65.6	68	70.4	72.8	75.2	77.6	80
19.4	21.8	24.2	26.6	29	31.4	33.8	36.2	38.7	41.1	43.6	46	48.5	50.9	53.4	55.8	58.3	60.7	63.2	65.6	68	70.4	72.8	75.2	77.6	80
19.4	21.8	24.2	26.6	29	31.4	33.8	36.2	38.7	41.1	43.6	46	48.5	50.9	53.4	55.8	58.3	60.7	63.2	65.6	68	70.4	72.8	75.2	77.6	80
19.4	21.8	24.2	26.6	29	31.4	33.8	36.2	38.7	41.1	43.6	46	48.5	50.9	53.4	55.8	58.3	60.7	63.2	65.6	68	70.4	72.8	75.2	77.6	80
19.4	21.8	24.2	26.6	29	31.4	33.8	36.2	38.7	41.1	43.6	46	48.5	50.9	53.4	55.8	58.3	60.7	63.2	65.6	68	70.4	72.8	75.2	77.6	80
19.4	21.8	24.2	26.6	29	31.4	33.8	36.2	38.7	41.1	43.6	46	48.5	50.9	53.4	55.8	58.3	60.7	63.2	65.6	68	70.4	72.8	75.2	77.6	80
19.4	21.8	24.2	26.6	29	31.4	33.8	36.2	38.7	41.1	43.6	46	48.5	50.9	53.4	55.8	58.3	60.7	63.2	65.6	68	70.4	72.8	75.2	77.6	80
19.4	21.8	24.1	26.5	28.9	31.3	33.7	36.1	38.6	41.1	43.5	46	48.5	50.9	53.4	55.9	58.3	60.8	63.2	65.7	68.1	70.5	72.9	75.3	77.6	80
19.4	21.8	24.1	26.5	28.9	31.3	33.7	36.1	38.6	41	43.5	46	48.5	50.9	53.4	55.9	58.4	60.8	63.3	65.7	68.1	70.5	72.9	75.3	77.6	80
19.4	21.7	24.1	26.4	28.8	31.2	33.6	36.1	38.5	41	43.5	46	48.5	50.9	53.4	55.9	58.4	60.9	63.3	65.8	68.2	70.6	73	75.3	77.7	80
19.4	21.7	24	26.4	28.7	31.1	33.6	36	38.5	41	43.4	45.9	48.4	51	53.5	56	58.4	60.9	63.4	65.8	68.3	70.7	73	75.4	77.7	80
19.4	21.7	23.9	26.3	28.6	31	33.5	35.9	38.4	40.9	43.4	45.9	48.4	51	53.5	56	58.5	61	63.5	65.9	68.4	70.8	73.1	75.5	77.7	80
19.4	21.6	23.8	26.1	28.5	30.9	33.3	35.8	38.3	40.8	43.4	45.9	48.4	51	53.5	56	58.6	61.1	63.6	66.1	68.5	70.9	73.3	75.6	77.8	80
19.4	21.5	23.6	25.9	28.3	30.7	33.2	35.7	38.2	40.8	43.3	45.9	48.4	51	53.5	56.1	58.6	61.2	63.7	66.2	68.7	71.1	73.5	75.8	77.9	80
19.4	21.2	23.3	25.6	28	30.5	33	35.5	38.1	40.7	43.2	45.8	48.4	51	53.6	56.2	58.7	61.3	63.9	66.4	68.9	71.4	73.8	76.1	78.2	80
19.4	20.7	22.8	25.2	27.7	30.2	32.8	35.4	38	40.6	43.2	45.8	48.4	51	53.6	56.2	58.8	61.4	64	66.6	69.2	71.7	74.2	76.6	78.7	80
	19.4	22	24.7	27.3	29.9	32.6	35.2	37.8	40.5	43.1	45.8	48.4	51	53.7	56.3	58.9	61.6	64.2	66.8	69.5	72.1	74.7	77.4	80	

**2.10.2** Análisis multidimensional estructura 2 (figura 10)

**Figura 10.** Estructura 2 del acumulador (autoría propia)



A continuación, se presentan la tabla 7 resumen para el caculo de las variables de la estructura 2 nombradas en el numeral 2.10.

**Tabla 7.** Memoria de cálculo temperatura adimensional en el eje x,y,z para la estructura 2 (autoría propia)

t	1600	s	t	1600	s	t	1600	s
$\alpha$	0.0000231	m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup>	$\alpha$	0.0000231	m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup>	$\alpha$	0.0000231	m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup>
$A_s$	0.6696	m <sup>2</sup>	$A_s$	0.6696	m <sup>2</sup>	$A_s$	0.6696	m <sup>2</sup>
X	0.29	m	X	0.29	m	X	0.29	m
Y	0.3	m	Y	0.3	m	Y	0.3	m
Z	0.42	m	Z	0.42	m	Z	0.42	m
K	80.2	w/m*K	K	80.2	w/m*K	K	80.2	w/m*K
$T_2$	80	°C	$T_2$	80	°C	$T_2$	80	°C
$T_1$	19	°C	$T_1$	19	°C	$T_1$	19	°C
L	0.145	m	L	0.15	m	L	0.21	m
Q	22591.84221	W	Q	21838.7808	W	Q	15599.1291	W
h	2554.193579	w(m <sup>2</sup> *k)	h	2386.752	w(m <sup>2</sup> *k)	h	1217.73061	w(m <sup>2</sup> *k)
Bi	4.617931034		Bi	4.464		Bi	3.18857143	
$\tau$	1.757907253		$\tau$	1.64266667		$\tau$	0.83809524	
$\lambda$	1.2946		$\lambda$	1.2842		$\lambda$	1.2054	
$A_1$	1.2357		$A_1$	1.2333	1	$A_1$	1.2135	
$\theta_{pared}$	0.163092403	eje x	$\theta_{pared}$	0.15530171	eje y	$\theta_{pared}$	0.09127167	eje z

$$\theta_{(x,y,z)} = \theta(x, t)\theta(y, t), (z, t)$$

$$\theta_{(x,y,z)} = 0.002311777$$

$$T_{(x,y,z)} = 19,14 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Se determina que la temperatura central de la estructura 2 es de 19,14 °C. Seguido calcula la distribución de la temperatura en la estructura 2 con respecto a la distancia como se muestra en la tabla 8 utilizando la siguiente expresión.

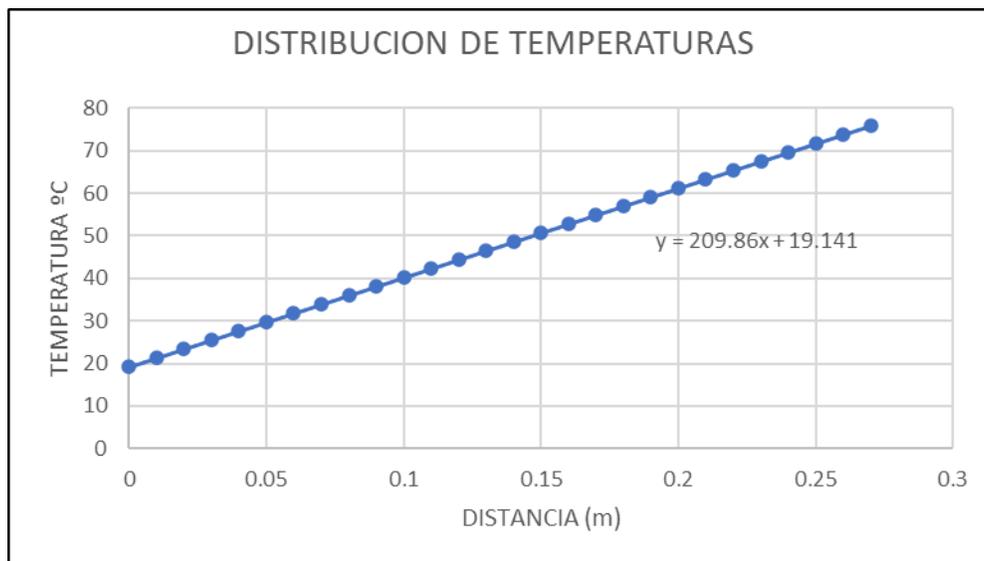
$$T_x = \left( \frac{(T_2 - T_1) x}{L} \right) + T_2$$

**Tabla 8.** Memoria de cálculo de la distribución de temperatura con respecto a la distancia de la estructura 2 (autoría propia)

$T_1$	19.14101841		
$T_2$	80		
L	0.29		
0	19.1410184	0.14	48.5212164
0.01	21.239604	0.15	50.619802
0.02	23.3381896	0.16	52.7183876
0.03	25.4367751	0.17	54.8169731
0.04	27.5353607	0.18	56.9155587
0.05	29.6339463	0.19	59.0141443
0.06	31.7325318	0.2	61.1127299
0.07	33.8311174	0.21	63.2113154
0.08	35.929703	0.22	65.309901
0.09	38.0282886	0.23	67.4084866
0.1	40.1268741	0.24	69.5070721
0.11	42.2254597	0.25	71.6056577
0.12	44.3240453	0.26	73.7042433
0.13	46.4226308	0.27	75.8028289

Con los datos hallados en tabla 8 se obtiene la gráfica lineal de distribución de temperaturas en la estructura 2 como se presenta en la gráfica 4.

**Gráfica 4.** Distribución lineal de temperatura en estructura 2 (autoría propia)



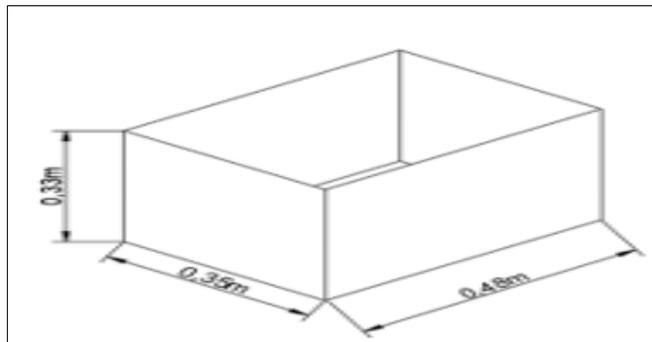
Con los resultados obtenidos en los cálculos anteriores se puede ver cómo se comportan las temperaturas en los diferentes puntos de la estructura 2 como se representa en la figura 11.

**Figura 11.** Líneas isotérmicas para la distribución de temperatura en la estructura (autoría propia)

DISTRIBUCION DE TEMPERATURAS RECIPIENTE 2																													
19.1	21.2	23.3	25.4	27.5	29.6	31.7	33.8	35.9	38	40.1	42.2	44.3	46.4	48.5	50.6	52.7	54.8	56.9	59	61.1	63.2	65.3	67.4	69.5	71.6	73.7	75.8		
19.1	20.2	21.9	23.8	25.7	27.8	29.8	31.9	34	36	38.1	40.2	42.3	44.3	46.4	48.5	50.6	52.7	54.8	56.8	58.9	61	63.1	65.1	67.2	69.2	71.2	73.1	74.8	75.8
19.1	20.6	22.3	24.1	26	28	30	32	34.1	36.1	38.2	40.2	42.3	44.4	46.4	48.5	50.6	52.6	54.7	56.8	58.8	60.9	62.9	64.9	67	68.9	70.8	72.7	74.3	75.8
19.1	20.8	22.5	24.3	26.2	28.2	30.2	32.2	34.2	36.2	38.2	40.3	42.3	44.4	46.4	48.5	50.6	52.6	54.7	56.7	58.7	60.8	62.8	64.8	66.8	68.7	70.6	72.4	74.2	75.8
19.1	20.9	22.7	24.5	26.4	28.3	30.3	32.3	34.3	36.3	38.3	40.3	42.4	44.4	46.5	48.5	50.5	52.6	54.6	56.6	58.7	60.7	62.7	64.7	66.6	68.5	70.4	72.3	74.1	75.8
19.1	20.9	22.8	24.6	26.5	28.4	30.4	32.4	34.4	36.4	38.4	40.4	42.4	44.4	46.5	48.5	50.5	52.5	54.6	56.6	58.6	60.6	62.6	64.5	66.5	68.4	70.3	72.2	74	75.8
19.1	21	22.8	24.7	26.6	28.5	30.5	32.4	34.4	36.4	38.4	40.4	42.4	44.4	46.5	48.5	50.5	52.5	54.5	56.5	58.5	60.5	62.5	64.5	66.4	68.3	70.2	72.1	74	75.8
19.1	21	22.9	24.8	26.7	28.6	30.6	32.5	34.5	36.5	38.5	40.5	42.5	44.5	46.5	48.5	50.5	52.5	54.5	56.5	58.5	60.5	62.4	64.4	66.3	68.3	70.2	72.1	73.9	75.8
19.1	21	22.9	24.8	26.7	28.7	30.6	32.6	34.5	36.5	38.5	40.5	42.5	44.5	46.5	48.5	50.5	52.5	54.5	56.5	58.4	60.4	62.4	64.3	66.3	68.2	70.1	72	73.9	75.8
19.1	21	22.9	24.9	26.8	28.7	30.7	32.6	34.6	36.5	38.5	40.5	42.5	44.5	46.5	48.5	50.5	52.5	54.4	56.4	58.4	60.4	62.3	64.3	66.2	68.2	70.1	72	73.9	75.8
19.1	21.1	23	24.9	26.8	28.7	30.7	32.6	34.6	36.6	38.5	40.5	42.5	44.5	46.5	48.5	50.5	52.4	54.4	56.4	58.4	60.3	62.3	64.3	66.2	68.1	70.1	72	73.9	75.8
19.1	21.1	23	24.9	26.8	28.8	30.7	32.7	34.6	36.6	38.6	40.5	42.5	44.5	46.5	48.5	50.4	52.4	54.4	56.4	58.4	60.3	62.3	64.2	66.2	68.1	70	72	73.9	75.8
19.1	21.1	23	24.9	26.9	28.8	30.7	32.7	34.6	36.6	38.6	40.5	42.5	44.5	46.5	48.5	50.4	52.4	54.4	56.4	58.3	60.3	62.3	64.2	66.2	68.1	70	72	73.9	75.8
19.1	21.1	23	24.9	26.9	28.8	30.7	32.7	34.7	36.6	38.6	40.6	42.5	44.5	46.5	48.5	50.4	52.4	54.4	56.4	58.3	60.3	62.2	64.2	66.1	68.1	70	71.9	73.9	75.8
19.1	21.1	23	24.9	26.9	28.8	30.8	32.7	34.7	36.6	38.6	40.6	42.5	44.5	46.5	48.5	50.4	52.4	54.4	56.4	58.3	60.3	62.2	64.2	66.1	68.1	70	71.9	73.9	75.8
19.1	21.1	23	24.9	26.9	28.8	30.8	32.7	34.7	36.6	38.6	40.6	42.5	44.5	46.5	48.5	50.4	52.4	54.4	56.4	58.3	60.3	62.2	64.2	66.1	68.1	70	71.9	73.9	75.8
19.1	21.1	23	24.9	26.9	28.8	30.7	32.7	34.7	36.6	38.6	40.6	42.5	44.5	46.5	48.5	50.4	52.4	54.4	56.4	58.3	60.3	62.2	64.2	66.1	68.1	70	71.9	73.9	75.8
19.1	21.1	23	24.9	26.9	28.8	30.7	32.7	34.6	36.6	38.6	40.5	42.5	44.5	46.5	48.5	50.4	52.4	54.4	56.4	58.3	60.3	62.3	64.2	66.2	68.1	70	72	73.9	75.8
19.1	21.1	23	24.9	26.8	28.8	30.7	32.7	34.6	36.6	38.6	40.5	42.5	44.5	46.5	48.5	50.4	52.4	54.4	56.4	58.4	60.3	62.3	64.2	66.2	68.1	70	72	73.9	75.8
19.1	21.1	23	24.9	26.8	28.7	30.7	32.6	34.6	36.6	38.5	40.5	42.5	44.5	46.5	48.5	50.5	52.4	54.4	56.4	58.4	60.3	62.3	64.3	66.2	68.1	70.1	72	73.9	75.8
19.1	21	22.9	24.9	26.8	28.7	30.7	32.6	34.6	36.5	38.5	40.5	42.5	44.5	46.5	48.5	50.5	52.5	54.4	56.4	58.4	60.4	62.3	64.3	66.2	68.2	70.1	72	73.9	75.8
19.1	21	22.9	24.8	26.7	28.6	30.6	32.5	34.5	36.5	38.5	40.5	42.5	44.5	46.5	48.5	50.5	52.5	54.5	56.5	58.5	60.5	62.4	64.4	66.3	68.3	70.2	72.1	73.9	75.8
19.1	21	22.9	24.8	26.7	28.6	30.6	32.5	34.5	36.5	38.5	40.5	42.5	44.5	46.5	48.5	50.5	52.5	54.5	56.5	58.5	60.5	62.4	64.4	66.3	68.3	70.2	72.1	74	75.8
19.1	20.9	22.8	24.6	26.5	28.4	30.4	32.4	34.4	36.4	38.4	40.4	42.4	44.4	46.5	48.5	50.5	52.5	54.6	56.6	58.6	60.6	62.6	64.5	66.5	68.4	70.3	72.2	74	75.8
19.1	20.9	22.7	24.5	26.4	28.3	30.3	32.3	34.3	36.3	38.3	40.3	42.4	44.4	46.5	48.5	50.5	52.6	54.6	56.6	58.7	60.7	62.7	64.7	66.6	68.5	70.4	72.3	74.1	75.8
19.1	20.8	22.5	24.3	26.2	28.2	30.2	32.2	34.2	36.2	38.2	40.3	42.3	44.4	46.4	48.5	50.6	52.6	54.7	56.7	58.7	60.8	62.8	64.8	66.8	68.7	70.6	72.4	74.2	75.8
19.1	20.6	22.3	24.1	26	28	30	32	34.1	36.1	38.2	40.2	42.3	44.4	46.4	48.5	50.6	52.6	54.7	56.8	58.8	60.9	62.9	64.9	67	68.9	70.8	72.7	74.3	75.8
19.1	20.2	21.9	23.8	25.7	27.8	29.8	31.9	34	36	38.1	40.2	42.3	44.3	46.4	48.5	50.6	52.7	54.8	56.8	58.9	61	63.1	65.1	67.2	69.2	71.2	73.1	74.8	75.8
19.1	21.2	23.3	25.4	27.5	29.6	31.7	33.8	35.9	38	40.1	42.2	44.3	46.4	48.5	50.6	52.7	54.8	56.9	59	61.1	63.2	65.3	67.4	69.5	71.6	73.7	75.8		

2.10.3 Análisis multidimensional estructura 3 (figura 12)

**Figura 12.** Estructura 3 del acumulador térmico (autoría propia)



A continuación, se presenta la tabla 9 resumen para el caculo de las variables de la estructura 3 nombradas en el numeral 2.10.

**Tabla 9.** Memoria de cálculo temperatura adimensional en el eje x,y,z para la estructura 3 (autoría propia)

t	1600	s	t	1600	s	t	1600	s
$\alpha$	0.0000231	m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup>	$\alpha$	0.0000231	m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup>	$\alpha$	0.0000231	m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup>
$A_S$	0.8838	m <sup>2</sup>	$A_S$	0.8838	m <sup>2</sup>	$A_S$	0.8838	m <sup>2</sup>
X	0.35	m	X	0.35	m	X	0.35	m
Y	0.33	m	Y	0.33	m	Y	0.33	m
Z	0.48	m	Z	0.48	m	Z	0.48	m
K	80.2	w/m*K	K	80.2	w/m*K	K	80.2	w/m*K
$T_2$	80	°C	$T_2$	80	°C	$T_2$	80	°C
$T_1$	19	°C	$T_1$	19	°C	$T_1$	19	°C
L	0.175	m	L	0.165	m	L	0.24	m
Q	24707.00777	W	Q	26204.4022	W	Q	18015.5265	W
h	2314.473796	w(m <sup>2</sup> *k)	h	2603.51736	w(m <sup>2</sup> *k)	h	1230.56875	w(m <sup>2</sup> *k)
Bi	5.050285714		Bi	5.35636364		Bi	3.6825	
$\tau$	1.206857143		$\tau$	1.35757576		$\tau$	0.64166667	
$\lambda$	1.3155		$\lambda$	1.3263		$\lambda$	1.2415	
$A_1$	1.2406		$A_1$	1.2429	1	$A_1$	1.2227	
$\theta_{pared}$	0.107809954	eje x	$\theta_{pared}$	0.11890243	eje y	$\theta_{pared}$	0.06550526	eje z

$$\theta_{(x,y,z)} = \theta(x, t)\theta(y, t), (z, t)$$

$$\theta_{(x,y,z)} = 0.000839703$$

$$T_{(x,y,z)} = 19,05 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Se determina que la temperatura central de la estructura es de 19,05 °C. Seguido calcula la distribución de la temperatura en la estructura 3 con respecto a la distancia como se muestra en la tabla 10 utilizando la siguiente expresión.

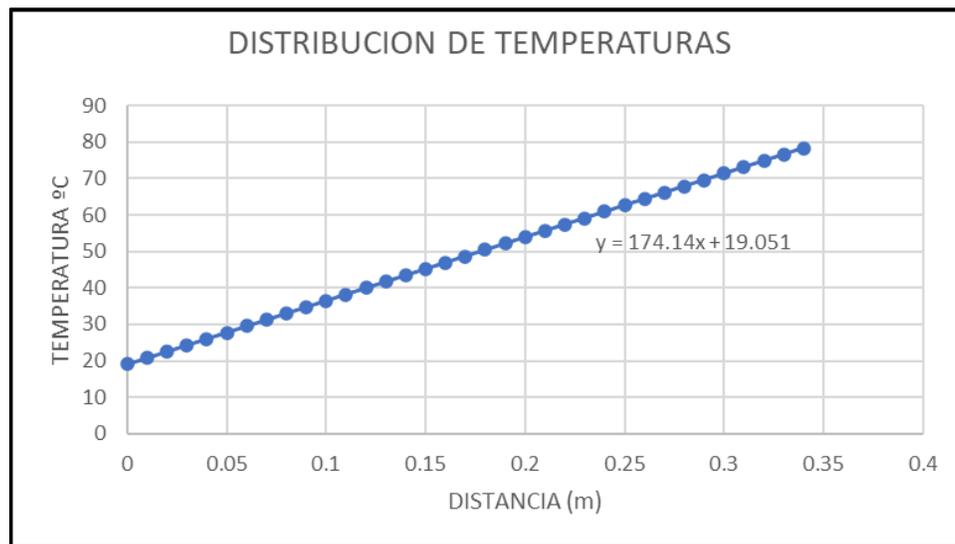
$$T_x = \left( \frac{(T_2 - T_1) x}{L} \right) + T_2$$

**Tabla 10.** Memoria de cálculo de la distribución de temperatura con respecto a la distancia de la estructura 3 (autoría propia)

$T_1$		19.05122189	
$T_2$		80	
L		0.35	
X	$T_x$	X	$T_x$
0	19.0512219	0.18	50.3963078
0.01	20.7926156	0.19	52.1377014
0.02	22.5340092	0.2	53.8790951
0.03	24.2754029	0.21	55.6204888
0.04	26.0167965	0.22	57.3618824
0.05	27.7581902	0.23	59.1032761
0.06	29.4995839	0.24	60.8446697
0.07	31.2409775	0.25	62.5860634
0.08	32.9823712	0.26	64.3274571
0.09	34.7237648	0.27	66.0688507
0.1	36.4651585	0.28	67.8102444
0.11	38.2065522	0.29	69.551638
0.12	39.9479458	0.3	71.2930317
0.13	41.6893395	0.31	73.0344254
0.14	43.4307331	0.32	74.775819
0.15	45.1721268	0.33	76.5172127
0.16	46.9135205	0.34	78.2586063
0.17	48.6549141	0.35	80

Con los datos hallados en tabla 10 se obtiene la gráfica lineal de distribución de temperaturas en la estructura 3 como se presenta en la gráfica 5.

**Gráfica 5.** Distribución lineal de temperatura en estructura 2 (autoría propia)



Con los resultados obtenidos en los cálculos anteriores se puede ver cómo se comportan las temperaturas en los diferentes puntos de la estructura 2 como se representa en la figura 13.

Las líneas isotermas son la unión entre dos puntos en los que en un momento dado se obtiene la misma temperatura, con la cual se puede analizar la distribución de temperaturas sobre superficies. En la realización de este cálculo se obtienen diferentes números de Biot, dependiendo la estructura. Entre cada una de ellas se observa que este número relaciona la transferencia de calor por conducción dentro de un cuerpo y la transferencia de convección que existe en la superficie de la estructura, encontrando que se obtienen valores altos, superando la unidad ya que el metal es un material altamente conductor.

Este cálculo fue realizado para un tiempo estimado de 1600 segundos, se observa una relación de temperaturas entre las estructuras, en la estructura 1 se observa una temperatura inicial de  $19,41\text{ }^{\circ}\text{C}$ , ya que esta estructura se encuentra de manera interna su temperatura será un poco mayor y una final de  $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ , en las dos estructuras siguientes se observa que la temperatura inicial tiene un acercamiento mayor a la temperatura ambiente, con temperaturas de  $19,14\text{ }^{\circ}\text{C}$  y  $19,05\text{ }^{\circ}\text{C}$  respectivamente y una máxima de  $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ . En la distribución de temperaturas entre las estructuras se encuentra que el aumento de temperatura es progresivo a medida que el tiempo aumenta observando la temperatura inicial en el costado izquierdo y la máxima en la derecha, se observan grandes pérdidas de calor por las paredes al ser un material con una conductividad alta.

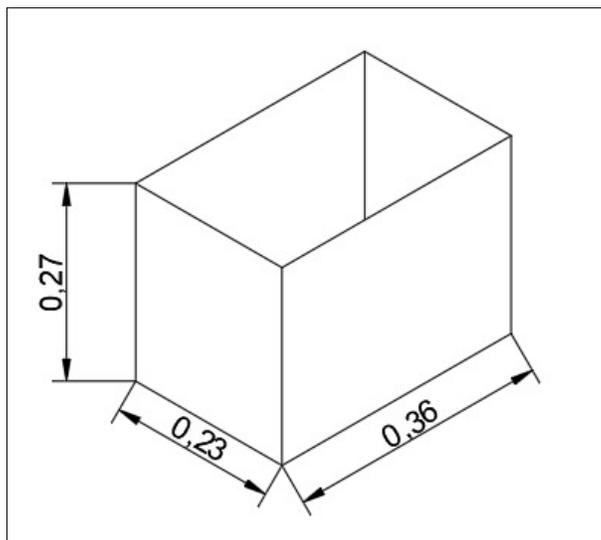
Figura 13. Líneas isotérmicas para la distribución de temperatura en la estructura (autoría propia)

DISTRIBUCION DE TEMPERATURAS RECIPIENTE 3																																												
19.1	20.8	22.5	24.3	26	27.8	27.8	29.5	31.2	33	34.7	34.7	36.5	38.2	39.9	41.7	41.7	43.4	45.2	46.9	48.7	48.6	50.4	52.1	53.9	55.6	55.6	57.3	59.1	60.8	62.6	62.6	64.3	66	67.8	69.6	69.5	71.3	73	74.7	76.5	76.5	78.2	80	
19.19.8	21.2	22.7	24.3	25.8	27.2	28.3	29.7	31.2	32.8	34.2	35.2	36.7	38.2	39.7	41.2	42.2	43.6	45.1	46.7	48.1	49.1	50.6	52.1	53.6	55.1	56.1	57.5	59	60.6	62	63	64.4	66	67.5	68.9	69.9	71.3	72.9	74.4	75.8	76.7	78	79.2	80
19.20.1	21.4	22.8	24.3	25.7	27.1	28.4	29.8	31.3	32.7	34.1	35.4	36.8	38.2	39.6	41	42.3	43.7	45.1	46.6	48	49.2	50.6	52.1	53.5	54.9	56.2	57.6	59	60.4	61.8	63.1	64.5	65.9	67.3	68.7	70	71.3	72.7	74.1	75.4	76.6	77.8	79	80
19.20.2	21.6	22.9	24.3	25.7	27.1	28.5	29.9	31.3	32.7	34	35.4	36.8	38.2	39.6	41	42.3	43.7	45.1	46.5	47.9	49.3	50.6	52.1	53.5	54.8	56.2	57.6	59	60.4	61.7	63.1	64.5	65.8	67.2	68.6	69.9	71.3	72.6	74	75.3	76.5	77.7	78.9	80
19.20.3	21.7	23	24.4	25.8	27.2	28.5	29.9	31.3	32.7	34	35.4	36.8	38.2	39.6	41	42.3	43.7	45.1	46.5	47.9	49.3	50.6	52	53.4	54.8	56.2	57.5	58.9	60.3	61.7	63	64.4	65.8	67.2	68.5	69.8	71.2	72.5	73.8	75.1	76.4	77.6	78.8	80
19.20.3	21.7	23	24.4	25.8	27.2	28.5	29.9	31.3	32.7	34	35.4	36.8	38.2	39.6	41	42.3	43.7	45.1	46.5	47.9	49.3	50.6	52	53.4	54.8	56.1	57.5	58.9	60.3	61.6	63	64.4	65.7	67.1	68.4	69.8	71.1	72.4	73.7	75	76.3	77.5	78.8	80
19.20.4	21.7	23.1	24.4	25.8	27.2	28.5	29.9	31.3	32.7	34.1	35.4	36.8	38.2	39.6	41	42.3	43.7	45.1	46.5	47.8	49.2	50.6	52	53.4	54.7	56.1	57.5	58.8	60.2	61.6	62.9	64.3	65.6	67	68.3	69.7	71	72.3	73.6	74.9	76.2	77.5	78.7	80
19.20.4	21.7	23.1	24.4	25.8	27.2	28.6	29.9	31.3	32.7	34.1	35.4	36.8	38.2	39.6	40.9	42.3	43.7	45.1	46.5	47.8	49.2	50.6	52	53.3	54.7	56.1	57.4	58.8	60.2	61.5	62.9	64.2	65.6	66.9	68.3	69.6	70.9	72.3	73.6	74.9	76.2	77.4	78.7	80
19.20.4	21.7	23.1	24.5	25.8	27.2	28.6	29.9	31.3	32.7	34.1	35.4	36.8	38.2	39.6	40.9	42.3	43.7	45.1	46.5	47.8	49.2	50.6	51.9	53.3	54.7	56.1	57.4	58.8	60.1	61.5	62.9	64.2	65.6	66.9	68.2	69.6	70.9	72.2	73.5	74.8	76.1	77.4	78.7	80
19.20.4	21.7	23.1	24.5	25.8	27.2	28.6	29.9	31.3	32.7	34.1	35.4	36.8	38.2	39.6	40.9	42.3	43.7	45.1	46.4	47.8	49.2	50.6	51.9	53.3	54.7	56	57.4	58.8	60.1	61.5	62.8	64.2	65.5	66.8	68.2	69.5	70.8	72.2	73.5	74.8	76.1	77.4	78.7	80
19.20.4	21.7	23.1	24.5	25.8	27.2	28.6	29.9	31.3	32.7	34.1	35.4	36.8	38.2	39.6	40.9	42.3	43.7	45.1	46.4	47.8	49.2	50.5	51.9	53.3	54.6	56	57.4	58.7	60.1	61.4	62.8	64.1	65.5	66.8	68.2	69.5	70.8	72.1	73.5	74.8	76.1	77.4	78.7	80
19.20.4	21.7	23.1	24.5	25.8	27.2	28.6	30	31.3	32.7	34.1	35.4	36.8	38.2	39.6	40.9	42.3	43.7	45.1	46.4	47.8	49.2	50.5	51.9	53.3	54.6	56	57.3	58.7	60.1	61.4	62.8	64.1	65.4	66.8	68.1	69.4	70.8	72.1	73.4	74.7	76.1	77.4	78.7	80
19.20.4	21.7	23.1	24.5	25.8	27.2	28.6	30	31.3	32.7	34.1	35.4	36.8	38.2	39.6	40.9	42.3	43.7	45	46.4	47.8	49.2	50.5	51.9	53.3	54.6	56	57.3	58.7	60	61.4	62.7	64.1	65.4	66.8	68.1	69.4	70.8	72.1	73.4	74.7	76	77.4	78.7	80
19.20.4	21.7	23.1	24.5	25.8	27.2	28.6	30	31.3	32.7	34.1	35.4	36.8	38.2	39.6	40.9	42.3	43.7	45	46.4	47.8	49.1	50.5	51.9	53.2	54.6	56	57.3	58.7	60	61.4	62.7	64.1	65.4	66.8	68.1	69.4	70.8	72.1	73.4	74.7	76	77.4	78.7	80
19.20.4	21.7	23.1	24.5	25.8	27.2	28.6	30	31.3	32.7	34.1	35.4	36.8	38.2	39.6	40.9	42.3	43.7	45	46.4	47.8	49.1	50.5	51.9	53.2	54.6	56	57.3	58.7	60	61.4	62.7	64.1	65.4	66.8	68.1	69.4	70.7	72.1	73.4	74.7	76	77.4	78.7	80
19.20.4	21.7	23.1	24.5	25.8	27.2	28.6	30	31.3	32.7	34.1	35.4	36.8	38.2	39.6	40.9	42.3	43.7	45	46.4	47.8	49.1	50.5	51.9	53.2	54.6	56	57.3	58.7	60	61.4	62.7	64.1	65.4	66.8	68.1	69.4	70.7	72.1	73.4	74.7	76	77.4	78.7	80
19.20.4	21.7	23.1	24.5	25.8	27.2	28.6	30	31.3	32.7	34.1	35.4	36.8	38.2	39.6	40.9	42.3	43.7	45	46.4	47.8	49.1	50.5	51.9	53.2	54.6	56	57.3	58.7	60	61.4	62.7	64.1	65.4	66.8	68.1	69.4	70.8	72.1	73.4	74.7	76	77.4	78.7	80
19.20.4	21.7	23.1	24.5	25.8	27.2	28.6	30	31.3	32.7	34.1	35.4	36.8	38.2	39.6	40.9	42.3	43.7	45	46.4	47.8	49.2	50.5	51.9	53.3	54.6	56	57.3	58.7	60.1	61.4	62.8	64.1	65.4	66.8	68.1	69.4	70.8	72.1	73.4	74.7	76.1	77.4	78.7	80
19.20.4	21.7	23.1	24.5	25.8	27.2	28.6	30	31.3	32.7	34.1	35.4	36.8	38.2	39.6	40.9	42.3	43.7	45.1	46.4	47.8	49.2	50.5	51.9	53.3	54.6	56	57.3	58.7	60.1	61.4	62.8	64.1	65.4	66.8	68.1	69.4	70.8	72.1	73.4	74.8	76.1	77.4	78.7	80
19.20.4	21.7	23.1	24.5	25.8	27.2	28.6	29.9	31.3	32.7	34.1	35.4	36.8	38.2	39.6	40.9	42.3	43.7	45.1	46.4	47.8	49.2	50.5	51.9	53.3	54.6	56	57.4	58.7	60.1	61.4	62.8	64.1	65.5	66.8	68.2	69.5	70.8	72.1	73.5	74.8	76.1	77.4	78.7	80
19.20.4	21.7	23.1	24.5	25.8	27.2	28.6	29.9	31.3	32.7	34.1	35.4	36.8	38.2	39.6	40.9	42.3	43.7	45.1	46.4	47.8	49.2	50.6	51.9	53.3	54.7	56	57.4	58.8	60.1	61.5	62.8	64.2	65.5	66.8	68.2	69.5	70.8	72.2	73.5	74.8	76.1	77.4	78.7	80
19.20.4	21.7	23.1	24.4	25.8	27.2	28.6	29.9	31.3	32.7	34.1	35.4	36.8	38.2	39.6	40.9	42.3	43.7	45.1	46.5	47.8	49.2	50.6	51.9	53.3	54.7	56.1	57.4	58.8	60.1	61.5	62.9	64.2	65.6	66.9	68.2	69.6	70.9	72.2	73.5	74.8	76.1	77.4	78.7	80
19.20.4	21.7	23.1	24.4	25.8	27.2	28.5	29.9	31.3	32.7	34.1	35.4	36.8	38.2	39.6	41	42.3	43.7	45.1	46.5	47.8	49.2	50.6	52	53.4	54.7	56.1	57.5	58.8	60.2	61.6	62.9	64.3	65.6	67	68.3	69.7	71	72.3	73.6	74.9	76.2	77.5	78.7	80
19.20.3	21.7	23	24.4	25.8	27.2	28.5	29.9	31.3	32.7	34	35.4	36.8	38.2	39.6	41	42.3	43.7	45.1	46.5	47.9	49.2	50.6	52	53.4	54.7	56.1	57.5	58.9	60.3	61.6	63	64.3	65.7	67	68.4	69.7	71	72.4	73.7	75	76.2	77.5	78.8	80
19.20.3	21.6	22.9	24.3	25.7	27.1	28.5	29.9	31.3	32.7	34	35.4	36.8	38.2	39.6	41	42.3	43.7	45.1	46.5	47.9	49.3	50.6	52	53.4	54.8	56.2	57.5	58.9	60.3	61.7	63	64.4	65.8	67.2	68.5	69.8	71.2	72.5	73.8	75.1	76.4	77.6	78.8	80
19.20.2	21.6	22.9	24.3	25.7	27.1	28.5	29.9	31.3	32.7	34	35.4	36.8	38.2	39.6	41	42.3	43.7	45.1	46.5	47.9	49.3	50.6	52.1	53.5	54.8	56.2	57.6	59	60.4	61.7	63.1	64.5	65.8	67.2	68.6	69.9	71.3	72.6	74	75.3	76.5	77.7	78.9	80
19.20.1	21.4	22.8	24.3	25.7	27.1	28.4	29.8	31.3	32.7	34.1	35.4	36.8	38.2	39.6	41	42.3	43.7	45.1	46.6	48	49.2	50.6	52.1	53.5	54.9	56.2	57.6	59	60.4	61.8	63.1	64.5	65.9	67.3	68.7	70	71.3	72.7	74.1	75.4	76.6	77.8	79	80
19.19.8	21.2	22.7	24.3	25.8	27.2	28.3	29.7	31.2	32.8	34.2	35.2	36.7	38.2	39.7	41.2	42.2	43.6	45.1	46.7	48.1	49.1	50.6	52.1	53.6	55.1	56.1	57.5	59	60.6	62	63	64.4	66	67.5	68.9	69.9	71.3	72.9	74.4	75.8	76.7	78	79.2	80
19.1	20.8	22.5	24.3	26	27.8	27.8	29.5	31.2	33	34.7	34.7	36.5	38.2	39.9	41.7	41.7	43.4	45.2	46.9	48.7	48.6	50.4	52.1	53.9	55.6	55.6	57.3	59.1	60.8	62.6	62.6	64.3	66	67.8	69.6	69.5	71.3	73	74.7	76.5	76.5	78.2	80	

## 2.11 Resistencia térmica total de cada sección del acumulador

### 2.11.1 Resistencia unitaria térmica de la estructura metálica interna (figura 14)

**Figura 14** estructura metálica interna del acumulador



Área estructura interna :  $2((a*b) +(a*h) +(b*h))$

Razón de transferencia de calor por conducción:  $\dot{Q}$

Temperatura interior:  $T_1$

Temperatura exterior:  $T_2$

Espesor de la lámina:  $L$

$$\dot{Q}_{cond} = kA_{sup} * \frac{\Delta t}{L}$$

$$\dot{Q}_{cond} = \left(\frac{80.2W}{m * K}\right) (0.48m^2) \left(\frac{(80 - 19)^{\circ}C}{0.0011m}\right)$$

$$\dot{Q}_{cond} = 2134778.18w = 2134.77kw$$

Se observa que la razón de transferencia de calor por conducción de la estructura interna es alta, con un valor de 21.82 kw. esto se debe a dos factores importantes ala alta conductividad del material y a que esta es la estructura interna acumulador.

Resistencia de térmica unitaria de la estructura interna = R

Espesor: L

Conductividad térmica: k

$$R = \frac{l}{k * A}$$

$$R = \frac{0.0011m}{\frac{80.2w}{m * k} * 0.48m^2} = 0.00002857m^2 * \frac{^{\circ}C}{w}$$

Coefficiente de transferencia: U

$$U = \frac{1}{R}$$

$$U = \frac{1}{0.00002857m^2 * \frac{^{\circ}C}{w}} = \frac{35001w}{m^2 * ^{\circ}C}$$

Perdidas de calor a través de las paredes

$$\dot{Q} = (UA)(T_1 - T_2)$$

$$\dot{Q} = \left(\frac{35001w}{m^2 * ^{\circ}C}\right)(0.48m^2)(80 - 19)^{\circ}C = 1024.82kW$$

La estructura interna del acumulador tiene una pérdida de calor de 1024.82kW

Coefficiente total de transferencia de la estructura

$$U_{Total} = (U * f_{area})_{lam\ int} + (U * f_{area})_{aisl-fiv} + (U * f_{area})_{lam\ interm} + (U * f_{area})_{aislam-vacio} + (U * f_{area})_{lam\ ext}$$

Resistencia unitaria de lámina interna:  $0.00002857m^2 * \frac{^{\circ}C}{w}$

$$\text{Coeficiente de transferencia: } \frac{35001w}{m^2 * ^{\circ}C}$$

Fracción de área de lámina interna 1.74%

Resistencia unitaria de aislamiento fibra de vidrio:

$$R = \frac{l}{k * A}$$

$$R = \frac{0.003m}{\frac{0.36w}{m * ^{\circ}C} * 0.67m^2} = 1.24m^2 * \frac{^{\circ}C}{w}$$

Coeficiente de transferencia: U

$$U = \frac{1}{R}$$

$$U = \frac{1}{1.24m^2 * \frac{^{\circ}C}{w}} = \frac{0.81w}{m^2 * ^{\circ}C}$$

Fracción de área de aislamiento fibra: 47.62%

Resistencia unitaria de lámina intermedia:

$$R = \frac{l}{k * A}$$

$$R = \frac{0.0011m}{\frac{80.2w}{m * k} * 0.67m^2} = 0.0000204m^2 * \frac{^{\circ}C}{w}$$

Coeficiente de transferencia: U

$$U = \frac{1}{R}$$

$$U = \frac{1}{0.0000204m^2 * \frac{^{\circ}C}{W}} = \frac{48849.09W}{m^2 * ^{\circ}C}$$

Resistencia unitaria de aislamiento de vacío:

$$R = \frac{l}{k * A}$$

$$R = \frac{0.03m}{\frac{0.02514W}{m * k} * 0.8838m^2} = 1.350m^2 * \frac{^{\circ}C}{W}$$

Coeficiente de transferencia: U

$$U = \frac{1}{R}$$

$$U = \frac{1}{1.350m^2 * \frac{^{\circ}C}{W}} = \frac{0.740W}{m^2 * ^{\circ}C}$$

Fracción de área de aislamiento vacío :47.62%

Resistencia unitaria de la lámina externa:

$$R = \frac{l}{k * A}$$

$$R = \frac{0.0011m}{\frac{80.2W}{m * k} * 0.8838m^2} = 0.0000155m^2 * \frac{^{\circ}C}{W}$$

Coeficiente de transferencia: U

$$U = \frac{1}{R}$$

$$U = \frac{1}{0.0000155m^2 * \frac{^{\circ}C}{w}} = \frac{64437.05w}{m^2 * ^{\circ}C}$$

Fracción de área de lámina externa 1.74%

$$U_{Total} = \left(\frac{35001w}{m^2 * ^{\circ}C} * 1.74\%\right)_{lam\ int} + \left(\frac{0.81w}{m^2 * ^{\circ}C} * 47.62\%\right)_{aisl-fiv} + \left(\frac{48849.09w}{m^2 * ^{\circ}C} * 1.74\%\right)_{lam\ interm} + \left(\frac{0.740w}{m^2 * ^{\circ}C} * 47.62\%\right)_{aislam-vacio} + \left(\frac{64437.05w}{m^2 * ^{\circ}C} * 1.74\%\right)_{lam\ ext}$$

$$U_{Total} = \frac{2.5809k\ w}{m^2 * ^{\circ}C}$$

Perdidas de calor a través de las paredes

$$\dot{Q} = (UA)(T_1 - T_2)$$

$$\dot{Q} = \left(\frac{2.5809k\ w}{m^2 * ^{\circ}C}\right)(0.8838m^2)(80 - 19)^{\circ}C = 139.14kw$$

La razón de pérdida de calor a través de la estructura del acumulador en condiciones de diseño corresponde a 139.14kw.

Perdidas por conducción entre secciones

Resistencia unitaria entre secciones de la estructura:

$$R = \frac{l}{k * A}$$

$$R = \frac{0.633m}{\frac{80.2w}{m * k} * 0.001298m^2} = 6.080m^2 * \frac{^{\circ}C}{w}$$

Coficiente de transferencia entre secciones de la estructura:

$$U = \frac{1}{R}$$

$$U = \frac{1}{6.080m^2 * \frac{^{\circ}C}{W}} = \frac{0.1644W}{m^2 * ^{\circ}C}$$

$$\dot{Q} = (UA)(T_1 - T_2)$$

$$\dot{Q} = \left(\frac{0.1644 W}{m^2 * ^{\circ}C}\right) (0.001298m^2)(80 - 19)^{\circ}C = 0.0130W$$

Perdidas de calor total del acumulador

$$\dot{Q} = Q_1 + Q_2$$

$$\dot{Q} = 0.0130W + 139.14kW$$

$$\dot{Q} = 139.140013kW$$

La razón total de pérdida de calor a través de la estructura del acumulador en condiciones de diseño corresponde a 139.140013kW.

### 3. Construcción Y Ensayos Acumulador Térmico Con Material De Cambio De Fase

#### 3.1 Construcción

La etapa de construcción del prototipo se realiza desde la manufactura de la caja del acumulador, y tapa del acumulador.

#### 3.2 Construcción caja del acumulador

Para la construcción del acumulador térmico se inicia cortando de una lámina collroll “4 x 8” calibre 18, se inicia con el corte de tres laminas una con medidas de “1,01 m x 0,48 m” y dos de “0.35 x 0,33”. En la lámina más larga se hacen dos dobleces en 0.33 m por ambos lados formando un tipo “u” .se utiliza soldadura tipo Tig para unir las láminas y formar un cuadro como se muestra en la figura 15.

**Figura 15.** Paredes laterales acumulador térmico (autoría propia)



Para la segunda parte se procede a cortar una lámina de “0,89 m x 0,45 m”, realizando dos dobleces en 0,30 para poder construir el otro cubo cortado dos laminas con

medidas de “0,30 m y 0,29 m”, seguido de ser soldadas con soldadura Tig. a continuación, se ilustra en la siguiente figura 16.

**Figura 16.** *Segunda pared interna del acumulador térmico (autoría propia)*



En el cubo interior se rellena con fibra de vidrio con un grosor aproximado de 0,03 m de espesor por cada una de sus paredes, utilizado como aislante térmico. a continuación, se ilustra en la figura 17.

**Figura 17.** *Aplicación de aislante térmico (autoría propia)*



En el siguiente paso se realiza el corte de una lámina con medidas “0,35 m x 0,27 m” en donde se realizan unas pestañas de 0,18 m tipo “u”. en este recipiente se le añade una resistencia de tipo circular unida a una de sus paredes laterales, esta resistencia está cubierta por una lámina collroll calibre 18 con medidas de “0,25 m x 0,23 m “y unas pestañas de 0,04 m, alrededor se aplicará parafina recubriendo el intercambiador de calor tipo serpentín reutilizado de un calentador convencional a gas. a continuación, se ilustra en la figura 18.

**Figura 18.** *Aplicación de parafina, resistencia circular y posición de intercambiador de calor (autoría propia).*



### 3.3 Construcción tapa del acumulador térmico

Para la construcción de la tapa del acumulador térmico se utiliza una lámina collroll calibre 18, se hace el corte de una lámina con medidas de 0,48 m x 0,35 m y unas pestañas de 0,06 m ubicada en la parte superior de la tapa. En esta tapa se añade dos tubos de 1 ¼ de pulgada con un largo de 0,06 m, traspasando esta y las siguientes dos laminas, así tener entrada y contacto con el intercambiador de calor tipo serpentín. Se cortarán dos laminas con medidas de 0,48 m x 0,35 m, una de ellas ubicada en 0,03 m. En el espacio restante se coloca fibra de vidrio para proceder con la segunda lamina y sellar la tapa del acumulador.

en esta tapa se colocará un sensor tipo “stp” (sensor de temperatura) ubicado en la parte interna de la tapa, ilustrado como se muestra en la figura 19, figura 20 y figura 21.

**Figura 19.** *Tapa superior acumulador térmico (autoría propia)*



**Figura 20.** *Tapa acumulador térmico con fibra de vidrio (autoría propia)*



**Figura 21.** *Tapa acumulador térmico-sellada (autoría propia)*



Para finalizar con el prototipo se incluyen dos Niples galvanizado h.g  $\frac{1}{4}$  “, uno de ellos ubicado en la parte lateral superior de la tapa, como se muestra en la figura 22, el segundo está ubicado en la parte lateral inferior del acumulador, como se muestra en la figura 23, con el fin de poder realizar el vacío correspondiente a cada una de sus partes.

**Figura 22.** *Niple galvanizado tapa de acumulador (autoría propia)*



**Figura 23.** *Niple galvanizado acumulador térmico (autoría propia)*



### 3.4 Ensayos

Para la realización de los ensayos de cambio de temperatura se cuenta con un sensor “stp”, data recorred, termómetro industrial y para efectuar el vacío se utiliza un vacuómetro.

Procedimiento para la realización de ensayos en un acumulador térmico

- Se procede a colocar el termómetro cerca a la parafina siendo esta calentada por una resistencia eléctrica en un tiempo prolongado de una hora a temperatura ambiente.
- Para determinar la temperatura de fusión y tiempo de la parafina se recolectan los datos necesarios exponiendo a la misma cerca de la resistencia para comprobar que ocurre durante este proceso.

En la implementación del aislamiento por vacío se utiliza un vacuómetro.

- Una vez el acumulador se encuentre sellado se procede a utilizar el vacuómetro, se conecta el dispositivo a un acople de niple galvanizado que se encuentran fijados en la tapa del acumulador y su caja.

A continuación, se implementa el uso de un “stp” en el acumulador térmico en un tiempo prolongado de 18 horas en intervalos de 180 segundos; asilado por fibra de vidrio y vacío, donde se expone a la parafina al calor por medio de una resistencia eléctrica.

- Una vez puesta la parafina cerca de la resistencia se obtiene la toma de datos necesarios para determinar la temperatura de esta al volver a su estado inicial, estando aislada por fibra de vidrio y vacío.
- La siguiente prueba es realizada para definir la duración de la parafina en transferir calor encontrándose aislada por fibra de vidrio y vacío.

#### 4. Análisis de resultados

La primera prueba realizada se efectuó calentando “3000g “de parafina en un recipiente de aluminio con una resistencia de tipo tubular, datos tomados y anexados en la tabla 3. en la figura 24 se observa la prueba de calentamiento de parafina.

**Figura 24.** *Calentamiento de la parafina (autoría propia)*



Se procede de la siguiente forma: se toma la muestra de la parafina con un peso de 3000g, se coloca en el recipiente sobre la resistencia de tipo tubular, al tener ya la parafina puesta, se procede a tomar el tiempo correspondiente en el momento en que la parafina se encuentra en su estado de fusión y así poder estimar su temperatura por medio de un termómetro industrial análogo y el tiempo en que sucede este cambio.

De esta prueba se encuentra que la parafina alcanza una temperatura de cambio de fase de 70 °C en un tiempo estimado de 780 segundos. Con este valor se procede a tomar sus valores correspondientes a la pérdida de calor de la parafina a temperatura ambiente. para conocer el calor necesario en que la parafina este en su punto de fusión se utiliza la siguiente ecuación.

$$Q_1 = mc\Delta T$$

$$Q_2 = mH_f$$

$$Q_T = Q_1 + Q_2$$

$$m = 3kg$$

$$T_i = 18^\circ C$$

$$P_{fusioncu} = 68^\circ C$$

$$H_{fusioncu} = \frac{126KJ}{Kg}$$

$$C = 2.66KJ/Kg$$

$$Q_1 = 3kg \left( \frac{2.66KJ}{kg} \right) (58^\circ C) = 462.84kj$$

$$Q_2 = 3kg \left( \frac{126kj}{kg} \right) = 378kj$$

$$Q_T = 842.84Kj$$

El calor total necesario para fundir 3kg de parafina y realice su cambio de fase de solido a liquido se de 842.84Kj.

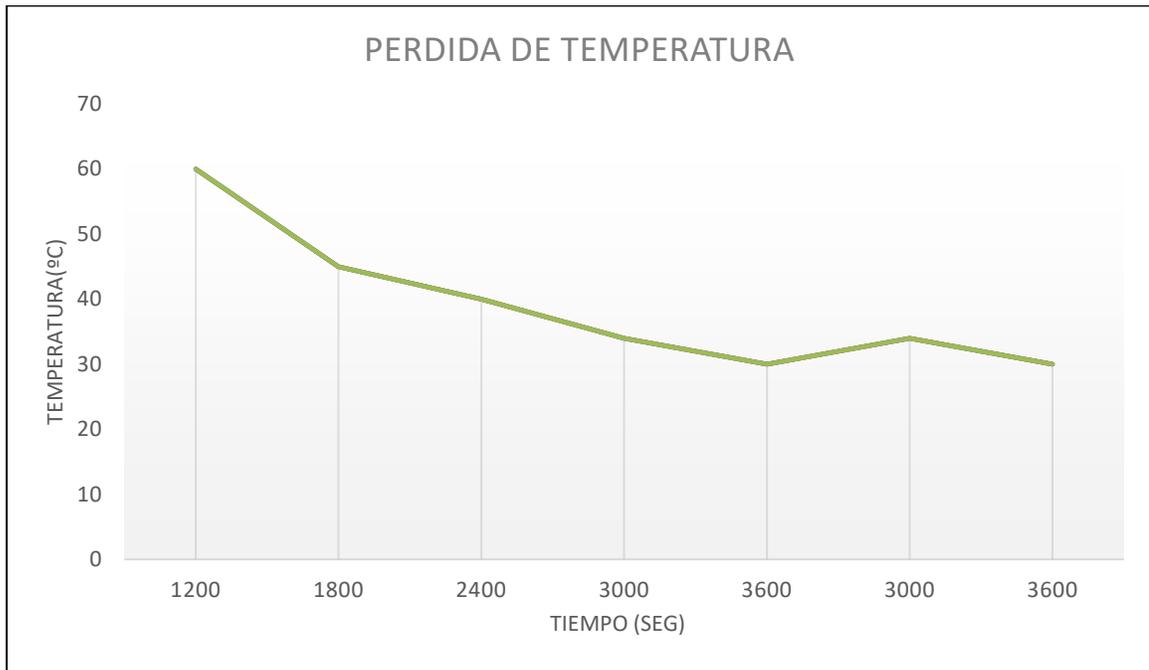
**Tabla 11.** *Perdida de calor en la parafina respecto al tiempo. (autoría propia)*

Fecha	hh:mm:ss	T °C ambiente	T °C acumulador	Fecha	hh:mm:ss	T °C ambiente	T °C acumulador
23/04/2023	01:50:07	19.54	79				
23/04/2023	01:51:26	19.55	78	23/04/2023	02:20:01	19.4	61
23/04/2023	01:53:39	19.56	77	23/04/2023	02:21:55	19.37	60
23/04/2023	01:55:32	19.56	76	23/04/2023	02:23:55	19.35	59
23/04/2023	01:57:14	19.56	75	23/04/2023	02:26:00	19.32	58
23/04/2023	01:58:51	19.55	74	23/04/2023	02:28:09	19.28	57
23/04/2023	02:00:26	19.54	73	23/04/2023	02:30:28	19.25	56
23/04/2023	02:01:59	19.53	72	23/04/2023	02:32:49	19.23	55
23/04/2023	02:03:30	19.52	71	23/04/2023	02:35:29	19.21	54
23/04/2023	02:05:03	19.52	70	23/04/2023	02:38:20	19.19	53
23/04/2023	02:06:38	19.51	69	23/04/2023	02:41:39	19.19	52
23/04/2023	02:08:10	19.5	68	23/04/2023	02:45:10	19.17	51
23/04/2023	02:09:45	19.49	67	23/04/2023	02:49:30	19.17	50
23/04/2023	02:11:20	19.47	66	23/04/2023	02:54:46	19.16	49
23/04/2023	02:12:57	19.46	65	23/04/2023	03:01:28	19.15	48
23/04/2023	02:14:39	19.45	64	23/04/2023	03:09:49	19.14	47
23/04/2023	02:16:24	19.44	63	23/04/2023	03:20:54	19.11	46
23/04/2023	02:18:10	19.42	62	23/04/2023	03:36:03	19.07	45

Prueba de perdida de temperatura de la parafina a temperatura ambiente, a continuación, en la figura 25 se visualiza la prueba pertinente de la perdida de temperatura de la parafina con su respectiva gráfica 6.

**Figura 25.** *Prueba perdida de temperatura de la parafina (autoría propia)*

**Gráfica 6.** línea perdida de temperatura de la parafina a temperatura (autoría propia)



En esta prueba se logra concluir que la parafina alcanza su punto de fusión en una temperatura aproximada de 70 °C, en donde al transcurrir el tiempo en una temperatura ambiente la parafina empieza a disminuir su temperatura hasta proporcionar un calor de 30 °C después de 3600 segundos transcurridos. En la última temperatura se observa a la parafina como en su estado inicial (sólido).

- En la prueba por vacío mostrada en la figura 26 se procede a conectar el vacuómetro en el acople de niple galvanizado situado en la superficie lateral de la tapa del acumulador y en su parte inferior lateral del cuerpo .se procede a extraer el aire existente en esta tapa por medio del vacuómetro .seguido de realizar el vacío en su punto limite se deja la llave abierta, pero aun conectada al vacuómetro en donde se toma el tiempo y la pérdida del vacío en intervalos

de 30 seg hasta que vuelva a tomar el valor inicial de una atmosfera o 1013 mbar como se muestra en la tabla 12.

**Tabla 12.** Perdida de vacío con respecto al tiempo (autoría propia).

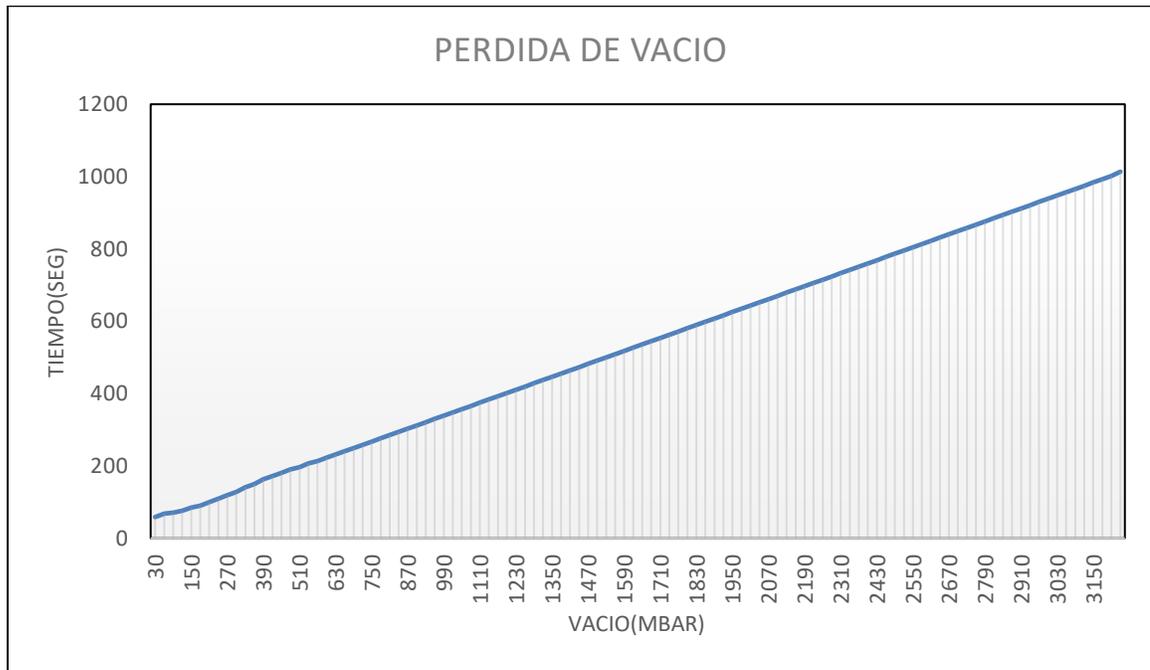
TIEMPO(seg)	VACIO(mbar)										
0	50	600	222	1200	401	1800	581	2400	760	3000	939
30	58,4	630	231	1230	410	1830	590	2430	769	3030	948
60	68,4	660	240	1260	419	1860	598	2460	778	3060	957
90	70,2	690	249	1290	428	1890	607	2490	787	3090	966
120	75,9	720	258	1320	437	1920	616	2520	795	3120	975
150	84,6	750	267	1350	446	1950	625	2550	804	3150	984
180	90,3	780	276	1380	455	1980	634	2580	813	3180	992
210	100	810	285	1410	464	2010	643	2610	822	3210	1001
240	109	840	294	1440	473	2040	652	2640	831	3240	1013
270	119	870	303	1470	482	2070	661	2670	840		
300	128	900	312	1500	491	2100	670	2700	849		
330	141	930	321	1530	500	2130	679	2730	858		
360	150	960	330	1560	509	2160	688	2760	867		
390	163	990	339	1590	518	2190	697	2790	876		
420	172	1020	348	1620	527	2220	706	2820	885		
450	181	1050	357	1650	536	2250	715	2850	894		
480	190	1080	366	1680	545	2280	724	2880	903		
510	196	1110	375	1710	554	2310	733	2910	912		
540	207	1140	384	1740	563	2340	742	2940	921		
570	213	1170	393	1770	572	2370	751	2970	930		

**Figura 26.** Prueba de vacío (autoría propia).



Con la información recogida con la prueba anterior se obtiene la gráfica 7.

**Gráfica 7.** *Perdida de vacío con respecto al tiempo (autoría propia)*



Se realiza esta prueba teniendo en cuenta que al ser una estructura soldada se cuentan con poros, se logra que el vacío realizado al tener la llave de forma abierta pierde en un tiempo estimado de 3240 seg equivalentes alrededor de 54 minutos como se ilustra en la gráfica 7, al lograr esto se puede notar que esta superficie tolera un vacío entre 50 mbar a 100 mbar con la llave cerrada, perdiendo este vacío en un largo tiempo.

- Se realiza una prueba preliminar de perdida de temperatura, para observar el comportamiento que se obtiene el acumulador al no tener aislamiento por vacío en la tapa de este artefacto. para esta prueba se toman alrededor de 9900 registrados cada segundo, en la tabla 13 se muestran los valores registrados, para reducir esta toma de datos se realiza un promedio de cada

mil datos obtenidos en un lapso de 80 minutos, a continuación, se muestran los datos tomados con sus respectivos gráficos.

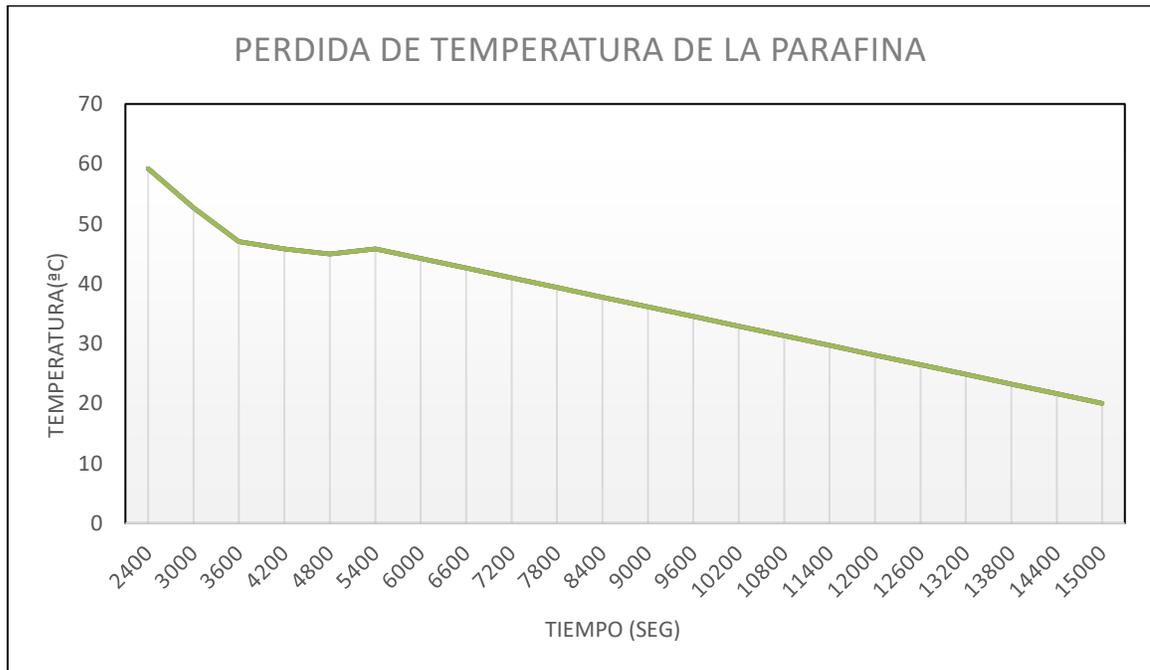
**Tabla 13.** *Perdida de temperatura de la parafina (autoría propia).*

<i>Tiempo (seg)</i>	<i>Temperatura (°C)</i>
600	38,2351552
1200	68,04299
1800	68,6281
2400	59,2268
3000	52,68288
3600	47,05439
4200	45,78954
4800	44,9612061

**Figura 27.** *Prueba de perdida de temperatura de la parafina (autoría propia).*



**Gráfica 8.** Lineal de perdida de temperatura de la parafina (autoría propia).



Como se observa en la gráfica 8 comparada con la gráfica 6 hecha en la primera prueba de perdida de temperatura de la parafina se observa que el acumulador cumple con la función de mantener el calor por un mayor tiempo ya que por sí sola y estando expuesta a la intemperie la parafina pierde su temperatura aproximadamente en una hora mientras que estando en el acumulador térmico en el transcurso de una hora se logra mantener una temperatura con 15 °C más.

## 5. Conclusiones

- Se desarrolla un acumulador térmico con material de cambio de fase el cual cuenta con una estructura metálica de forma cuadrada, se evidencia que, al ser una estructura cuadrada y metálica, se es más fácil su manufactura, pero el cual recae en que el prototipo cuenta con varios poros al tener tantas piezas unidas entre sí, por lo cual se observa que no es posible realizar vacío en esta estructura.
- En el desarrollo de este acumulador al tener una estructura metálica unida entre si se observan grandes pérdidas de calor por medio de la conducción, ya que este material es altamente conductor.
- En las pruebas realizadas a este acumulador térmico se logra evidenciar en la figura 26 que la pérdida de temperatura luego que la parafina cambie de estado tiene una durabilidad de 15000 segundos equivalentes a 4.16 horas en volver a solidificarse a una temperatura ambiente de 19°C.
- A este prototipo se realizan distintas pruebas, en las cual se evidencia la complejidad de realizar vacío en una estructura metálica, ya que esta al no estar totalmente hermética en su interior contiene bastantes perdidas, perdiendo este vacío en el transcurso de una hora. siendo nada eficiente en este prototipo.
- En la actualidad se pueden implementar aparatos de acumulación en la población, debido a que la mayoría de los avances y estudios tecnológicos necesarios para diseñar estos artefactos se encuentran disponibles con información clara para crear ideas propias e innovadoras. en la implementación de acumuladores térmicos se debe buscar la necesidad del entorno y el desarrollo de servicios, proporcionando soluciones concretas a la población que requiera de estos servicios.
- La implementación que provee un acumulador térmico es un sistema accesible a poblaciones que cuenten con pocos recursos en servicios domésticos ,este prototipo se realizó con materiales que no son de muy alto

costo ya que se buscaba la facilidad de adquisición de una población en general ,si se desea un nivel de acumulación más alto se optaría por conseguir materiales de alta calidad pero esto haría una repercusión en el gasto económico ,para esta aplicación no fue necesario la adquisición de elementos de tan alta calidad ,por lo que se trabajó con materiales económicos y accesibles para así poder generar una oportunidad de adquisición e implementación en poblaciones que tengan interés en este tipo de artefactos .

- La implementación de artefactos como los acumuladores térmicos son de alta viabilidad ya que según el trabajo realizado suple con una de las principales necesidades en la actualidad, que es aumentar la eficiencia de otros dispositivos de aprovechamiento de energías alternativas.
- Una de las características más importantes que se lograron establecer son las diferentes variables que se pueden aplicar para la fabricación de estos dispositivos, y la versatilidad que existe para su diseño.

### 5.1 Recomendaciones

- En cuestión de diseño se recomienda realizar el acumulador con una estructura cilíndrica ya que esta tendrá menos uniones, por lo cual tendrá más hermeticidad ante una rectangular.
- Se recomienda utilizar un material diferente al metálico, ya que como se enuncio anteriormente es altamente conductor y esto reduciría las pérdidas de calor.
- En cuestiones de mantenimiento en ambas partes del acumulador se debe tener acceso, deben estar con un material aislante para poder realizar inspecciones de la parafina y la del resto de componentes puestos en su interior.
- Es recomendable aislar los tubos por donde fluye el líquido, de este modo se reducen las pérdidas de calor antes del proceso de acumulación.

## 6. Anexos

## Anexo 1 Presupuesto

#	ÍTEM	D	CANTIDAD	VALOR UNITARIO	VALOR TOTAL
1	RESISTENCIA DE CERÁMICA	Un	1	\$ 3.500,00	\$ 3.500,00
2	RESISTENCIA TUBULAR	Un	1	\$ 10.000,00	\$ 10.000,00
3	RESISTENCIA REVERBERO	Un	1	\$ 17.000,00	\$ 17.000,00
4	TERMINAL ELÉCTRICA SENSOR DE TEMPERATURA	Un	1	\$ 2.000,00	\$ 2.000,00
5	SOLDADURA TERMINAL	Global	1	\$ 10.000,00	\$ 10.000,00
6	COMBUSTIBLE TRANSPORTE	gl	6	\$ 10.000,00	\$ 60.000,00
7	PARAFINA PRIMERA COMPRA	lb	7	\$ 9.500,00	\$ 66.500,00
8	PARAFINA SEGUNDA COMPRA	kg	3	\$ 15.000,00	\$ 45.000,00
9	LAMINA	Un	1	\$ 169.000,00	\$ 169.000,00
10	DOBLECES	Un	15	\$ 2.067,00	\$ 31.005,00
11	COPA SIERRA	Un	1	\$ 37.000,00	\$ 37.000,00
12	REGISTROS	Un	2	\$ 10.000,00	\$ 20.000,00
13	MIPLES GALVANIZADOS 1/4	Un	2	\$ 3.000,00	\$ 6.000,00
14	MIPLES GALVANIZADOS 1/2	Un	1	\$ 4.500,00	\$ 4.500,00
15	UNIÓN GALVANIZADA	Un	1	\$ 4.500,00	\$ 4.500,00

#	ÍTEM	D	CANTIDAD	VALOR UNITARIO	VALOR TOTAL
16	MASILLA EPÓXICA	Un	4	\$ 6.000,00	\$ 24.000,00
17	CINTA NEGRA	Un	5	\$ 1.500,00	\$ 7.500,00
18	SOLDADURA	Global	1	\$ 30.000,00	\$ 30.000,00
19	RESISTENCIA COCINETA	Un	1	\$ 85.000,00	\$ 85.000,00
20	TEFLÓN	Un	1	\$ 1.000,00	\$ 1.000,00
21	EMPAQUE DE NEOLITE	Un	1	\$ 35.000,00	\$ 35.000,00
22	TORNILLOS	Un	6	\$ 700,00	\$ 4.200,00
23	CABLE	m	2	\$ 3.500,00	\$ 7.000,00
24	TERMO ENCOGIBLE	m	1	\$ 5.000,00	\$ 5.000,00
25	REGISTROS GAS	Un	2	\$ 20.000,00	\$ 40.000,00
26	BUSHING H.G 1/2"*1/4"	Un	4	\$ 2.000,00	\$ 8.000,00
27	GASTOP	Un	1	\$ 5.000,00	\$ 5.000,00
28					
29					
30					
31					
32					
33	MANO DE OBRA	hr	120	\$ 7.000,00	\$ 840.000,00
<b>TOTAL</b>					<b>\$ 1.577.705,00</b>

*Anexo 2 Patente NC 2017/005748 concedida a la UAN en el año 2020*

## **CAPÍTULO REIVINDICATORIO MODIFICADO**

### **(Primer Examen de Fondo)**

1. Un calentador solar de fluidos que comprende:
  - un tanque (1) con una entrada (2) y una salida (3), dicho tanque (1) está configurado para contener un fluido;
  - un acumulador térmico (4) ubicado debajo del tanque (1), el acumulador térmico (4) tiene una entrada (5) y una salida (6) conectada a la entrada (2) del tanque (1), dicho acumulador térmico (4) está configurado para permitir el paso del fluido hacia al tanque (1);
  - una tubería en espiral (7) dispuesta alrededor del tanque (1) y configurada para recibir calor solar, la tubería en espiral (7) tiene un primer extremo (7a) y un segundo extremo (7b), donde el segundo extremo (7b) se conecta a la entrada (5) del acumulador térmico (4); y
  - una fuente de fluido (9) conectada al primer extremo (7a) de la tubería en espiral (7);

donde, la tubería en espiral (7) está configurada para permitir el paso de un fluido proveniente de la fuente de fluido (9), hacía el acumulador térmico (4);

donde, el acumulador térmico (4) está configurado para intercambiar calor con el fluido proveniente de la fuente de fluido (9).
  
2. El calentador de la Reivindicación 1, caracterizado porque incluye una segunda tubería (8) conectada al tanque (1) y al acumulador térmico (4), tiene un primer extremo (8a) y un segundo extremo (8b), el primer extremo (8a) se localiza entre el fondo del tanque (1) y se conecta al acumulador térmico (4), el segundo extremo (8b) se localiza en la parte superior del tanque (1) y se conecta al acumulador térmico (4).

3. El calentador solar de la Reivindicación 1, donde la tubería es espiral (7) y la segunda tubería en espiral (8) tienen un perfil que se seleccionan entre perfil elíptico, perfil cuadrado, perfil circular, perfiles con formas regulares y perfiles con formas irregulares.
  4. El calentador solar de la Reivindicación 1, caracterizado porque el acumulador térmico (4) se selecciona entre calentadores eléctricos, intercambiadores de calor de tubos y coraza; intercambiadores de placas, tubos radiantes o combinaciones de los mismos.
  5. El calentador solar de la Reivindicación 1, que comprende además una tubería de recirculación (15) dispuesta en el interior del tanque (1) y conectada al primer extremo (7a) de la tubería espiral (7).
- sH
6. El calentador solar de la Reivindicación 1, donde la tubería en espiral (7) es de un material que se seleccionan entre aluminio, bronce, cobre, aleaciones metálicas o combinaciones de los mismos.
  7. El calentador solar de la Reivindicación 1, donde por el acumulador (4) fluye un material que se selecciona entre parafina, ácidos grasos y cera de abejas.

## 7. Referencias Bibliográficas

- Almudena, M. ruano S. J. (n.d.). *UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA TÉRMICA Y DE FLUIDOS*.
- C. BATISTA RODRIGUEZ. (2020). *CALEFACTOR SOLAR* (Patent No. 67534).
- Corace, J. (2008). Sisitemas termodinàmicos. *Fisica II*, 1–17.
- Corpoema, C. E. (2010). Formulacion de un Plan de Desarrrollo para las Fuentes no Convencionales de Energía en Colombia, PDFNCE. Volumen 2: Diagnóstico. *Consortio Energético Corpoema*, 2, 367.
- Coviello, M. F., Gollán, J., & Pérez, M. (2012). Las alianzas público-privadas en energías renovables en América Latina y el Caribe. *Comisión Económica Para América Latina y El Caribe (CEPAL)*, 1–8.
- dispositivo de almacenamiento de energia termica con material de cambio de fase para secado solar miel y sales de sulfato*. (n.d.).
- EErricchh AA.. MMüüll ller. (2002). *Termodinámica Básica Edición n Er Müüll l l l e* (2nd ed.).
- Escobar-Ochoa, M., Cuervo-Andrade, S., & Rincon-Prat, S. (2018). Methodology for the design of a thermal energy storage module for asolar tunnel dryer using phase change materials (PCM). *Revista UIS Ingenierías*, 17(1), 9–20.  
<https://doi.org/10.18273/revuin.v17n1-2018001>
- Francis Weston Sears, G. L. S. (2002). *Termodinámica, teoría cinética y termodinámica estadística - Francis Weston Sears - Google Libros*.  
<https://books.google.com.uy/books?id=ZxVIO2ELnugC&printsec=copyright#v=onepage&q&f=false>
- Fuentes de energía - ROLDÁN VILORIA, JOSÉ - Google Libros*. (n.d.). Retrieved March 7, 2022, from  
[https://books.google.com.pe/books?id=1VSdl7o\\_t2kC&printsec=copyright#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.pe/books?id=1VSdl7o_t2kC&printsec=copyright#v=onepage&q&f=false)
- Gómez-Acebo, T. (2006). Termodinámica - Notas de clase. *Tecnun*, 267.
- Ignacio-martínez, M. L., Vázquez-flores, S. L., & Briseño-sánchez, A. (2021). *Sistemas Termodinámicos Thermodynamic systems*. 8(16), 37.

IRA N.LEVINE. (n.d.). *fisicoquimica\_levine\_volumen\_1\_5ta\_edicion*.

IVACE - Energía. (2021). 2017, 20.

Janampa Quispe, K., Cerón Balboa, O., Morales Morales, O., & Oré García, J. (2020). Diseño y construcción de acumulador solar térmico por cambio de fase para un secador solar familiar. *Tecnia*, 30(1), 7. <https://doi.org/10.21754/tecnica.v30i1.840>

Javier Garcia Mayayo. (2012). Materiales de Cambio de Fase. *Escuela de Ingenieria y Arquitectura Universidad Zaragoza*, 93.

JUAN JOSÉ TRONCOSO. (2014). “Evaluación De La Dependencia De Combustibles Fósiles. 105.

Julio C. Gil-Atanacio a, Luis A. Villeda-Cruz b, DanielPérez-Segovia c, J. C. (2021). Sistemas Termodinámicos. *TEPEXI Boletín Científico de La Escuela Superior Tepeji Del Río*, 8(16), 37. <https://doi.org/10.29057/estr.v8i16.7098>

Londoño, A. A. (2017). Energia Renovales en Colombia desde la economia. *Revista Ciencias Estratégicas*, 1–17.

Luis, M., & Albitres, M. (n.d.). *DISEÑO DE PLANTAS DE PROCESOS QUIMICOS*.

Miguel Meza. (2015). *aletas de transferencia de calor. 1*, 25.

Oliver, A., Neila, F. J., & García-Santos, A. (2012). Nota técnica: Clasificación y selección de materiales de cambio de fase según sus características para su aplicación en sistemas de almacenamiento de energía térmica. In *Materiales de Construcción* (Vol. 62, Issue 305, pp. 131–140). <https://doi.org/10.3989/mc.2012.58010>

Pereira Blanco, M. J. (2015). Las energías renovables: ¿Es posible hablar de un derecho energético ambiental? elementos para una discusión. *Jurídicas CUC*, 11(1), 233–254. <https://doi.org/10.17981/juridcuc.11.1.2015.10>

Rafael Bosh. (2015). *MANUAL DE CÁLCULOS. 1*, 113.

Robles Algarin, C., & Rodríguez Álvarez, O. (2018). An overview of the renewable energy in the World, Latin America and Colombia. *Espacios*, 39(34).

Roldán Viloría, J. (2013). *Energías renovables. Lo que hay que saber - ROLDÁN VILORIA, JOSÉ - Google Libros*.

Rolle, K. C. (n.d.). [www.elsolucionario.net](http://www.elsolucionario.net).

Salazar Valdez, J. F., & Segura Obregón, M. (2001). Diseño de equipos de transferencia de calor. *Doctoral Dissertation, Universidad Autónoma de Nuevo León*, 0, 192.

Sales, I. I. (2019). *Estudio de acumuladores de energía*. 85.

*TERMODINÁMICA Notas de clase Tomás Gómez-Acebo octubre de 2005*. (n.d.).

*Transferencia\_de\_Calor\_y\_Masa\_Yunus\_Ceng*. (n.d.).

Universidad, T., & Autónoma, N. (n.d.). *La historia de la termodinámica como disciplina científica generalmente comienza con*.

**UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA**  
**TRABAJO ESTRUCTURADO DE MANERA INDEPENDIENTE PREVIO A LA**  
**OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE: INGENIERO MECÁNICO**. (n.d.).

Universitaria, V. (2015). *Desarrollan acumulador de energía térmica para secado de agroproductos*. 3363.

Yunus A., Ç. (2013). Transferencia de Calor y Masa. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 1(9), 1699. <https://itscv.edu.ec/wp-content/uploads/2019/06/Transferencia-de-calor-y-masa.-Fundamentos-y-aplicaciones-Cuarta-Edición.pdf>

Yunus A., Çengel, M. A. B. (2005). Termodinámica Iv. *Monografía De Enseñanza De La Ingeniería Térmica Y De Fluídos*, 7(9), 1699.