

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



**Optimización de disipación de calor en microprocesadores a
través de un termosifón**

Trabajo de graduación presentado por Jorge Abel Pérez Ruiz para optar
al grado académico de Licenciado en Ingeniería Mecánica

Guatemala,
2024

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



**Optimización de disipación de calor en microprocesadores a
través de un termosifón**

Trabajo de graduación presentado por Jorge Abel Pérez Ruiz para optar
al grado académico de Licenciado en Ingeniería Mecánica

Guatemala,
2024

Vo.Bo.:

(f) 

Victor Hugo Ayerdi Bardales

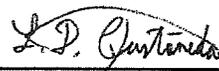
Tribunal Examinador:

(f) 

Victor Hugo Ayerdi Bardales

(f) 

Rony José Herrarte Estevez

(f) 

Luis Diego Castaneda Fernandez

Fecha de aprobación: Guatemala, 5 de Enero de 2024.

Agradecimiento

Primeramente, quiero agradecer a Dios por haberme acompañado en el transcurso de toda la carrera y por darme las fuerzas y el ánimo para nunca darme por vencido. Le quiero agradecer también a mis padres por haberme apoyado incondicionalmente en estos años académicos y por nunca haber dejado de confirmar en mí, así mismo le quiero agradecer a mis hermanos que me apoyaron en lo que estuviera en sus posibilidades y por darme palabras de ánimo para seguir adelante y le agradezco a mi novia por haberme apoyado en cada etapa de la universidad y por presionarme para dar más de mí y alcanzar mi mejor versión. Por último, quiero agradecerme a mí, por creer en mí en todo momento y por no haber dejado de luchar por lograr mis sueños calor.

Lista de figuras	VII
Lista de cuadros	X
Resumen	XI
1. Introducción	1
2. Justificación	3
3. Objetivos	5
3.1. Objetivo general	5
3.2. Objetivos específicos	5
4. Marco teórico	7
4.1. Microprocesadores	7
4.2. Estrangulamiento térmico	8
4.3. Pasta térmica	8
4.4. Métodos de refrigeración en microprocesadores	9
4.4.1. Refrigeración por aire	9
4.4.2. Refrigeración líquida	10
4.5. Termosifón	11
4.6. Termosifón como método de refrigeración	12
4.7. Termosifón para transferencia de calor	13
4.8. Termosifón bifásico	13
4.9. Termosifón y disipador de calor como métodos de refrigeración	14
5. Metodología	21
5.1. Diseño del termosifón	21
5.2. Diseño del disipador de calor de Raspberry	28
5.3. Pruebas operativas del termosifón	29
5.4. Cálculos térmicos	34

5.4.1. Proceso de cálculo de coeficiente de transferencia de calor por convección natural	35
5.4.2. Procedimiento de cálculo de flujo de calor disipado	36
5.5. Resultados	43
5.6. Discusión	45
6. Conclusiones	49
7. Recomendaciones	51
8. Bibliografía	53
9. Anexos	55
9.1. Ecuaciones utilizadas	55
9.2. Plan de fabricación del termosifón	61
9.3. Proceso para instalar los softwares	65
9.4. Cálculos preliminares de las resistencias térmicas de los diseños de termosifón	67

Lista de figuras

1.	Microprocesador	8
2.	Refrigeración por aire	10
3.	Refrigeración por aire	10
4.	Funcionamiento de termosifón	11
5.	IceGiant thermosyphon	12
6.	a) caloducto, b) termosifón común, c) termosifón de contorno y d) termosifón de contorno avanzado; incluye evaporador y condensador	13
7.	Diagrama para diseñar caloductos	14
8.	Termosifón diseñado por Chicas	15
9.	Representación de la resistencia térmica del termosifón	18
10.	Espacio disponible del Raspberry Pi 3B+	22
11.	Tabla de agua saturada	24
15.	Dimensiones de disipador de calor de Raspberry	28
16.	Geometría de aletas rectangulares rectas	29
17.	Cordón de pasta térmica	30
18.	Termosifón con cinta de aislar	31
19.	VNC Viewer pantalla principal	31
20.	Terminal Raspberry Pi	32
21.	Esquema de conexión del sensor LM35	33
22.	Código para sensor de temperatura	33
23.	Medición termográfica	34
24.	Flujo de calor del disipador de calor	35
25.	Resistencias del termosifón	38
26.	Selección de sistema operativo	65
27.	Ranura para SD card del Raspberry	66
28.	Login de PuTTY	67
29.	Sistema de termosifón analizado	67

Lista de cuadros

1.	Volumen interno de propuestas	25
2.	Flujo de calor máximo vs. Flujo de calor máximo por parámetro viscoso y sónico	27
3.	Flujo de calor máximo por parámetro viscoso y parámetro sónico del R134a vs. flujo de calor máximo por parámetro viscoso y parámetro sónico del agua	28
4.	Valores de resistencias	39
5.	Iteraciones del flujo de calor de entrada para cálculo de calor disipado del termosifón	40
6.	Resultados del cálculo del flujo de calor máximo por el parámetro sónico y por el parámetro de viscosidad, del agua a dos presiones distintas.	43
7.	Resultados del cálculo del flujo de calor máximo por el parámetro sónico y por el parámetro de viscosidad, del R134a a una presión específica.	43
8.	Resultados de las pruebas Térmicas para el prototipo de termosifón fabricado (Propuesta 3 de diseño): Temperatura del microprocesador, superficial y superficial máxima	43
9.	Valores de resistencias equivalentes del prototipo fabricado: Para caso de temperatura de la base del termosifón igual a la temperatura promedio del microprocesador.	44
10.	Valores de resistencias equivalentes del prototipo fabricado: Para caso de temperatura de la base del termosifón igual a la temperatura promedio superficial máxima medida.	44
11.	Resultados de análisis térmico: Para caso de temperatura de la base del termosifón igual a la temperatura promedio del microprocesador.	44
12.	Resultados de análisis térmico: Para caso de temperatura de la base del termosifón igual a la temperatura promedio superficial máxima medida.	44
13.	Comparativo entre el diseño original y el prototipo fabricado	45
14.	Materiales y equipo	62
15.	Posibles valores de resistencia equivalentes de propuestas de termosifón: Para caso de temperatura de la base del termosifón igual a la temperatura del microprocesador	68

16. Posibles valores de resistencia equivalentes de propuestas de termosifón: Para el caso de temperatura de la base del termosifón igual a la temperatura superficial máxima 68

17. Resultados de análisis térmico: Para caso de temperatura de la base del termosifón igual a la temperatura del microprocesador 68

18. Resultados de análisis térmico: Para el caso de temperatura de la base del termosifón igual a la temperatura superficial máxima 69

El presente estudio se inició a partir de la necesidad que existe de optimizar los elementos de refrigeración de los microprocesadores ya que estos tienen un consumo energético para su funcionamiento y parte de esa energía se convierte en calor. Debido a que estos han tenido un aumento en su potencia también se ha visto un aumento en el calor generado.

En este estudio se tenía como objetivo la optimización de disipación de calor en microprocesadores a través de un termosifón, basado en los resultados de una investigación previa realizada en la que se planteó el uso de un termosifón como elemento de refrigeración para microprocesadores. En este estudio se propusieron 4 diseños de termosifón y luego de realizar cálculos de transferencia de calor y resistencia térmica equivalente para los 4 prototipos se seleccionó el diseño que contó con la mejor disipación de calor y con la resistencia térmica equivalente más pequeña para ser fabricado. Finalmente, se realizaron pruebas, simulaciones y mediciones para conocer la temperatura operativa del microprocesador, Raspberry Pi 3B+, alcanzando una mejora del 12 % en la disipación de calor respecto al estudio previo.

En años recientes, la industria de los microprocesadores ha tenido una mejora en las capacidades de cómputo y en el consumo energético; sin embargo, parte de la energía que se usa para su funcionamiento se transforma en calor, debido al comportamiento resistivo que tienen los circuitos internos. De no ser controlado, este calor genera limitaciones de desempeño por parte del microprocesador, ya que este, como método de protección reduce su frecuencia de trabajo, en consecuencia, se ve reducido su desempeño. Con el fin de evitar que esto ocurra se utilizan distintos elementos de refrigeración para disipar el calor generado.

El disipador de calor es el elemento más utilizado para disminuir la energía térmica generada por un microprocesador; no obstante, existen distintos elementos de refrigeración que cumplen esta función. En el estudio realizado por Chicas (2020), donde se compara un termosifón y un disipador como métodos de refrigeración, en este se determinó que el termosifón es más eficaz en la disipación de calor.

En el presente estudio se analizó al termosifón, con el fin de optimizar la disipación de calor de este. Para ello como nueva propuesta de investigación se realizaron modificaciones al diseño original que plantea el trabajo de Chicas (2020). El termosifón se evaluó como una resistencia térmica y para conocer qué parámetros tienen influencia directamente sobre la disipación de calor, se analizaron las ecuaciones que describen sus resistencias. Además, se analizaron distintos materiales que cuenten con una alta conductividad térmica, fluidos de trabajo y distintas presiones de trabajo, así como diferentes temperaturas de saturación del fluido.

Después de analizar todas las alternativas, se seleccionó la propuesta que cuente con la mayor cantidad de calor disipado para su fabricación y posteriormente, se hicieron pruebas con el termosifón para recolectar la información obtenida.

Por último, se llevó a cabo el análisis de los resultados obtenidos para determinar si existe una mejora en el calor disipado por parte del nuevo diseño respecto del diseño original.

A lo largo del tiempo, los microprocesadores han evolucionado y sus transistores han mejorado su desempeño y tamaño. El funcionamiento de un microprocesador consta de manipular datos de un sistema informático.

El microprocesador trabaja en conjunto con otros elementos, con el fin de llevar a cabo funciones aritméticas y lógicas para manejar tareas que se le demanden. Estas tareas o procesos que se efectúan implican un consumo energético por parte del microprocesador. Este flujo energético provoca calor, lo cual ocasiona que la temperatura en los componentes se caliente, así como como los transistores del microprocesador. Cuando el microprocesador no cuenta con la refrigeración adecuada sufre de un fenómeno llamado estrangulamiento térmico o Thermal Strangling. “Es una última línea de defensa que tienen los procesadores cuando la temperatura llega a niveles críticos que pueden suponer realmente que se funda algún componente”, (Informática, 2020). Este sobrecalentamiento supone un problema porque puede generar daños irreversibles en los transistores (Castañeda, 2019).

Los microprocesadores son elementos que se encuentran en todo tipo de equipos, desde computadoras, celulares, televisores, unidad de control del motor (ECU, por sus siglas en inglés), equipos médicos, entre otros.

Los microprocesadores son elementos de mucha importancia, por lo que se busca que puedan trabajar en su temperatura óptima para que no sufran de estrangulamiento térmico y no se vean afectados su desempeño y vida útil. Para conseguir que la temperatura del microprocesador sea la óptima, se emplean diversos métodos de refrigeración, como refrigeración por aire (activa, pasiva), líquida (Watercooling), por metal líquido, etc. (WordPress, 2014).

Algunos métodos ocupan mucho espacio, con el que no cuentan todos los equipos, por ello algunos no se consideran al diseñar productos con espacio reducido. Este aspecto fue considerado en el trabajo de graduación titulado “Comparación de termosifón y Disipador de Calor como Métodos de Refrigeración para un Procesador”, en el cual se analizó el desempeño de ambos métodos al ponerlos en práctica. Se llegó a la conclusión de que el termosifón permitió que la temperatura operativa del procesador fuera menor (Chicas, 2020), lo que

generó interés para tomar la decisión de optimizar el funcionamiento del termosifón.

Los beneficios que se obtendrán al mejorar el diseño del termosifón son: tener una mejor temperatura promedio de trabajo en el microprocesador y conseguir un mejor desempeño y prolongación de la vida útil del equipo.

3.1. Objetivo general

Optimizar la disipación de calor en microprocesadores a través del uso de un termosifón.

3.2. Objetivos específicos

1. Diseñar prototipos con modificaciones en dimensiones de la estructura, materiales de fabricación y fluidos de trabajo que ayuden a la mejora de la dispersión de calor del termosifón.
2. Encontrar una presión interna, para que la temperatura de saturación sea más cercana a la que va a alcanzar el elemento al momento de ponerlo en funcionamiento.
3. Determinar el comportamiento térmico del termosifón, la tasa de transferencia de calor y la resistencia térmica equivalente a cada diseño, para establecer cuál es el diseño más eficiente y prototipar el mismo.
4. Identificar el diseño de termosifón que cuente con la mejor disipación del calor generado por el microprocesador, con el fin de llevar a cabo las pruebas termográficas en la Universidad del Valle de Guatemala.

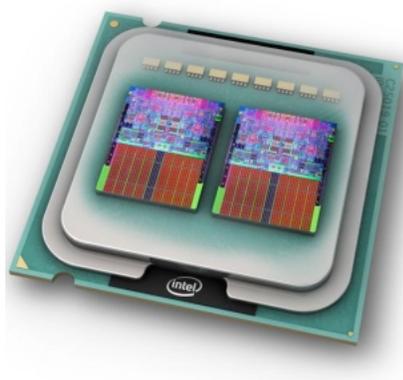
4.1. Microprocesadores

Un procesador se considera el cerebro del ordenador. Este componente es el encargado de llevar a cabo las instrucciones dadas por los programas (Rebollo, 2011).

El procesador está conformado por un conjunto de registros que guardan datos. Además, cuenta con una unidad aritmético-lógica. Gracias a estos, es capaz de realizar tareas como procesar datos, controlar el funcionamiento de todos los dispositivos y realizar operaciones matemáticas, por mencionar algunas. Otro aspecto importante es la unidad de control, que es la responsable de coordinar todos los elementos. Asimismo, cuenta con un reloj interno que se encarga de determinar la velocidad de trabajo (Rebollo, 2011).

La potencia de un procesador suele medirse según la velocidad de su reloj, aunque hay otros factores que son relevantes cuando se trata del rendimiento final del este, lo que indica que esta característica ya no es suficiente para determinar el rendimiento del procesador. En años recientes, la tecnología ha tenido un gran avance al permitir que estos integren varios núcleos de procesamiento dentro del mismo procesador. A este tipo de tecnología se le conoce como tecnología multinúcleo, porque permite ejecutar múltiples tareas al mismo tiempo. Esta tecnología da como resultado un mejor rendimiento por parte del procesador (Rebollo, 2011).

Figura 1: Microprocesador



Fuente: (Rebollo Pedruelo, 2011)

4.2. Estrangulamiento térmico

Una parte de la energía consumida por un microprocesador se disipa en forma de calor debido al comportamiento resistivo que tienen los circuitos de los microprocesadores. Por otra parte, la temperatura del chip es una medida de la cuantía de la energía térmica que almacena en él; esta es directamente proporcional a la cantidad de potencia consumida por extensión de área del chip del microprocesador. El estrangulamiento térmico es la medida preventiva por la cual el procesador limita su rendimiento como consecuencia del exceso de temperatura. El procesador realiza esta acción preventiva para evitar daños térmicos en sus componentes internos, que, en caso de dañarse, afectarían la frecuencia del reloj y habría una pérdida de potencia permanente en el procesador (Diary R., 2011).

4.3. Pasta térmica

La pasta térmica también se conoce con el nombre de silicona térmica, esta es una sustancia de color gris, espesa, que tiene la función de conducir calor entre elementos que no cuenten con una conexión directa, esto con el propósito de disipar este calor y que los componentes no se sobrecalienten (Ahumada, 2023). La pasta térmica se utiliza para mejorar la transferencia de calor entre el procesador y el disipador. Esto ayuda a evitar que el procesador se sobrecaliente (Ahumada, 2023).

Las características de la pasta térmica Manhattan son las siguientes:

- Color: gris
- Conductividad térmica: $> 0.965 \text{ W/MK}$ (Manhattan, 2023).
- Impedancia térmica: $< 0.255 \text{ }^\circ\text{C-IN}^2/\text{W}$ (Manhattan, 2023).
- Gravedad específica: > 2.3 (Manhattan, 2023).

- Evaporación: $<0.001\%$ (Manhattan, 2023).
- Sangrado: $<0.05\%$ (Manhattan, 2023).
- Constante dieléctrica A: > 5.1 (Manhattan, 2023).
- Índice tixotrópico: 380 ± 10 1/10 mm (Manhattan, 2023).
- Temperatura de funcionamiento: $-30 \text{ } 180^\circ \text{C}$ (Manhattan, 2023).
- Compuestos de silicona, 50 %
- Compuestos de carbono, 20 %
- Compuestos de óxido de metal, 30 %

4.4. Métodos de refrigeración en microprocesadores

La refrigeración de microprocesadores puede ser por aire o líquido. La refrigeración de la unidad central de proceso (CPU, por sus siglas en inglés) se basa en el principio de transferencia de calor; es decir, que el calor de la CPU se transfiere a los componentes de refrigeración o hacia el ambiente (Intel, 2023).

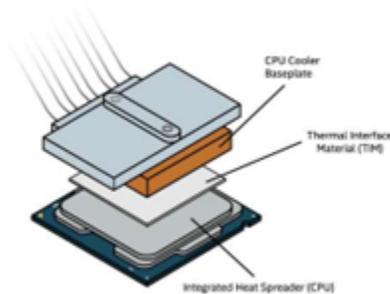
El calor que genera el microprocesador se transfiere hacia la cubierta metálica de la CPU, que se denomina disipador de calor integrado (IHS, por sus siglas en inglés). Este calor después es transferido hacia la placa base del mecanismo de refrigeración y, por último, es liberado hacia el ambiente, ya sea por medio de una tubería de calor, un disipador de calor o un ventilador (Intel, 2023).

4.4.1. Refrigeración por aire

La refrigeración por aire es un mecanismo sencillo para la disipación de calor. Puede ser altamente eficaz y sencillo de instalar. En un sistema de refrigeración por aire, el calor se transfiere del IHS de la CPU, por medio de la pasta térmica aplicada, hacia la placa base conductora que está hecha de cobre o aluminio. Desde la placa base, la energía térmica se traslada hacia las tuberías de calor unidas (Intel, 2023).

Las tuberías de calor se diseñan con el fin de movilizar el calor de una zona a otra. En el caso de las computadoras, el calor se moviliza hasta un disipador que se ubica sobre la placa base y libera un espacio dentro de esta para otros componentes. Las tuberías de calor ceden energía térmica a las láminas (aletas) de metal de dicho disipador. Estas tienen como fin maximizar la exposición al aire frío al absorber el calor del metal, así un ventilador conectado expulsa el aire caliente hacia fuera del disipador (Intel, 2023).

Figura 2: Refrigeración por aire



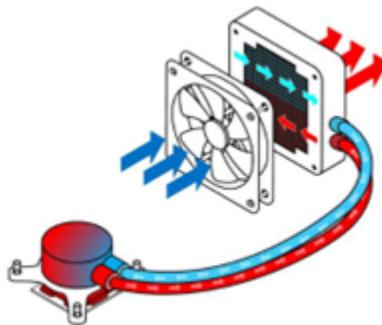
Fuente: (Intel, 2023)

Una ventaja que presenta este tipo de sistemas de refrigeración es que el mantenimiento es mucho menor al que requiere un sistema de refrigeración líquida. Como parte del mantenimiento que se le da al sistema de aire, se limpia la suciedad que se acumula en los componentes, como el ventilador y el dissipador de calor (Technology, 2022).

Por otra parte, la eficiencia de un sistema de refrigeración puede variar dependiendo del material utilizado para la fabricación del dissipador y tuberías de calor. Asimismo, la utilización de un ventilador más grande aumentará el flujo de aire y mejorará el rendimiento. No obstante, no siempre se cuenta con el espacio necesario para la integración de ventiladores grandes (Technology, 2022).

4.4.2. Refrigeración líquida

Figura 3: Refrigeración por aire



Fuente: (Intel, 2023)

La refrigeración líquida se divide en dos categorías: 1. Refrigeración *All-In-One* (AIO) y 2. Bucle de refrigeración personalizado. En la presente investigación el principal interés será el sistema AIO. En la refrigeración por aire, el circuito comienza con una placa base anexa

con el IHS de la CPU a través de la pasta térmica, esta permite una mejor transferencia de calor entre las superficies. Parte de la placa base integra el bloque líquido, el cual está diseñado para llenarse de refrigerante (Intel, 2023).

El calor generado por el procesador es transferido a la placa base y de la placa al refrigerante, este se mantiene en movimiento dentro del bloque líquido. El refrigerante se moviliza por el sistema de refrigeración a través de dos tuberías hacia el radiador y este es el que transfiere el calor hacia el ambiente; un ventilador es el encargado de expulsar la capa de aire caliente por medio de convección forzada. Por último, el refrigerante regresa nuevamente frío hacia el sistema y el ciclo se repite. (Intel, 2023).

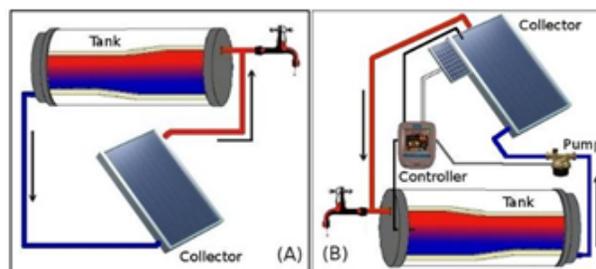
El sistema de refrigeración líquida permite obtener un mejor desempeño de parte del microprocesador, ya que tiene mayor manejo térmico; sin embargo, una desventaja es que requiere de alto mantenimiento, comparado con la refrigeración por aire, porque se debe revisar periódicamente para asegurar que no existan riesgos de fugas y limpiar los componentes (Technology, 2022).

4.5. Termosifón

Un termosifón es un equipo para gestión térmica que utiliza la convección y conducción natural como mecanismos de transferencia de calor. Este usa los mecanismos mencionados para crear un flujo cíclico que va desde las áreas con mayor energía térmica a las de menor y viceversa. El termosifón es empleado en varias industrias y una de las más comunes es la recepción de energía solar como método para calefacción de agua, sistemas automotrices y sistemas eléctricos (Arrow, 2020).

Así como un sifón estándar, los termosifones no necesitan de bombas mecánicas o eléctricas para mover el fluido por el sistema de circuito cerrado. Para la refrigeración en sistemas eléctricos se utilizan termosifones de circuito cerrado, ya que los fluidos de trabajo suelen ser agua, refrigerante o gas bajo presión subatmosférica. El funcionamiento de un termosifón se basa en presiones variables que son generadas por la diferencia de densidades a través de distintas temperaturas (Arrow, 2020).

Figura 4: Funcionamiento de termosifón



Fuente: (Arrow, 2020)

Nota: En la Figura 4 se puede observar cómo un termosifón es empleado para calentar un tanque.

Cuando se realiza una comparación entre un termosifón y tubos de calor (*Heat Pipes*), se observa que los tubos cuentan con la desventaja particular de que requieren de un material absorbente para que el condensador regrese al evaporador, donde este podrá cambiar de fase y absorber energía de la manera correcta.

En otras palabras, un fluido como el agua, dentro de la tubería de calor, debe ser capaz de evaporarse en la sección de calentamiento, condensarse en la sección de condensación y movilizarse a través de su mecha por medio de la acción capilar y cumplir con el funcionamiento completo de un sistema térmico. Debido a la demanda energética en componentes como las unidades de procesamiento gráfico (GPU, por sus siglas en inglés) y las CPU, las configuraciones comunes de disipador y tubos de calor son susceptibles a volverse ineficientes si el calor generado es muy alto, lo que ocasiona un fenómeno llamado “secado del tubo de calor”. Este proceso ocurre cuando el calor absorbido es demasiado para que la mecha pueda condensar el fluido de refrigeración (Arrow, 2020).

4.6. Termosifón como método de refrigeración

Un termosifón es una alternativa ideal para todo aquel sistema que puede aprovechar el retorno de fluido asistido por la gravedad. Los termosifones se hallan en aplicaciones de dispositivos de electrónica con una potencia en la que los usuarios suelen montar un transistor bipolar de puerta aislada (IGBT, por sus siglas en inglés) y en dispositivos de alta densidad de potencia directamente en una placa de evaporado que tiene la capacidad de ubicar de manera remota el condensador o el disipador de calor sobre los componentes.

En varias industrias se utilizan los sistemas de gestión activa de cilindros (ACT, por sus siglas en inglés), entre ellos se pueden mencionar la medicina, la energía, servicios públicos, automatización y los sistemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado (HVAC, por sus siglas en inglés) (Technologies, 2023).

Figura 5: IceGiant thermosyphon



Fuente: (ICEGIANT, 2020)

Nota: 1. El líquido se evapora dentro del aparato debido al calor de la CPU; el vapor se traslada hacia el condensador.

2. El aire frío pasa por el condensador y licua el vapor.

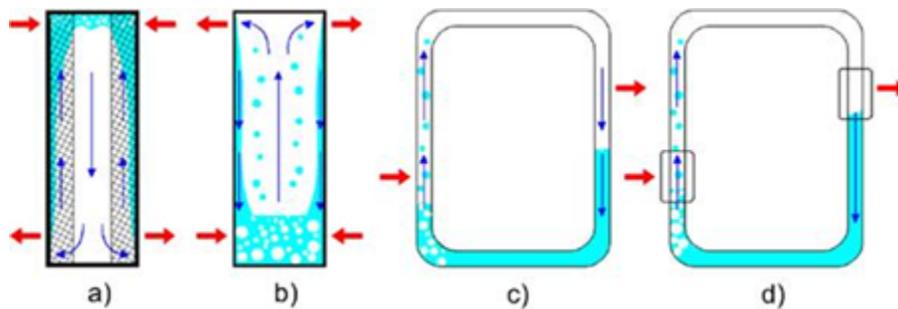
3. La gravedad hace que el líquido regrese al evaporador, y así se repite el ciclo.

4.7. Termosifón para transferencia de calor

El análisis y desarrollo de termosifones bifásicos es un tema de estudio que en los últimos tiempos ha sido de suma importancia. Entre las investigaciones relacionadas con los termosifones destaca la de termosifones de contorno, que son una variación de los termosifones comunes. Estos cuentan con la ventaja de que, durante su funcionamiento, las fases del fluido de trabajo se movilizan por separado; por lo tanto, pueden llegar a temperaturas más altas y no presentar el límite de operación por arrastre debido a que no existe flujo en contracorriente líquido-vapor (Y. F., V. I., & V. G., 2011).

El principio de funcionamiento en contraparte con los caloductos y termosifones comunes se ilustra en la Figura 6.

Figura 6: a) caloducto, b) termosifón común, c) termosifón de contorno y d) termosifón de contorno avanzado; incluye evaporador y condensador



Fuente: (Y. F., V. I., & V. G., 2011)

El principio de operación de un termosifón de contorno ocurre cuando ingresa calor al evaporador, lo que genera un aumento de temperatura en el fluido de trabajo. Como resultado, una parte del fluido comienza a evaporarse en el interior del equipo y forma burbujas que se separan de la parte líquida contenida en el evaporador y se genera un flujo de vapor que se moviliza a través de la línea de vapor hasta llegar a la sección del condensador, en el que finalmente se condensa.

El líquido condensado retorna al evaporador por medio de la línea de líquido saturado como consecuencia de la acción de la fuerza gravitacional y produce un efecto cíclico de evaporación-condensado (Y. F., V. I., & V. G., 2011).

4.8. Termosifón bifásico

Los termosifones bifásicos son elementos de refrigeración con gran eficiencia para transferencia de calor con pequeños gradientes de temperatura. El funcionamiento de este se basa en el cambio de fase del fluido de trabajo que va dentro de él. Este tipo de elementos de

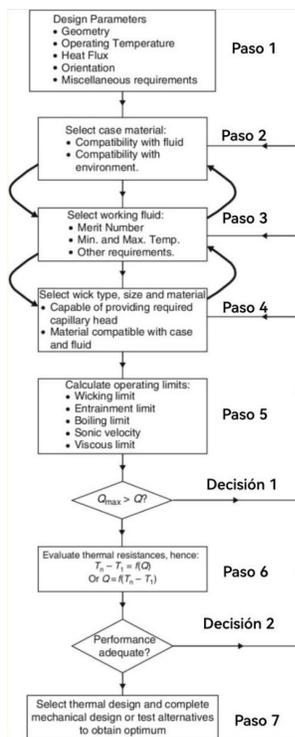
refrigeración está compuesto por tres partes esenciales: evaporador, condensador y sección adiabática.

El principio de funcionamiento se centra en que el fluido de trabajo se encuentra en estado de saturación, donde la mayor parte del flujo está en estado líquido, el cual está en la sección de evaporación. El calor ingresa en el evaporador, y en consecuencia, se genera un cambio de fase en el fluido de trabajo: “*El mecanismo principal de transferencia de calor es la ebullición nucleada en piscina*” (Supanta Lovera, 2022, P.2) El vapor sube gracias a la diferencia de presión y densidad, pasa por la sección adiabática hasta llegar a la sección del condensador, donde el calor es disipado con el ambiente y ocurre la condensación en película, el fluido condensador desciende al evaporador debido a la gravedad (Supanta Lovera, 2022, P.3).

4.9. Termosifón y disipador de calor como métodos de refrigeración

El disipador de calor y el termosifón son elementos de refrigeración utilizados en gran variedad de dispositivos, siendo uno de los más comunes los componentes eléctricos. En el estudio realizado por Chicas (2020) se comparó la capacidad de disipación de calor de ambos, para conocer cuál de los dos era mejor alternativa al momento de refrigerar un microprocesador Raspberry pi 3B.

Figura 7: Diagrama para diseñar caloductos

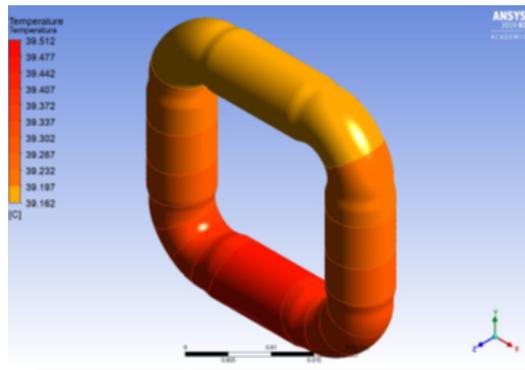


Fuente: (Kew, Reay, & McGlen, 2014), (Chicas, Comparación de Termosifón y Disipador de Calor como Métodos de Refrigeración para un Procesador, 2020)

Daniel Chicas encontró en su investigación que el proceso de diseño para un caloducto se realiza siguiendo los pasos del diagrama de flujo presentado en la Figura 7. Este mismo fue utilizado por él para realizar el diseño de un termosifón, aunque ciertas partes del diagrama no fueron tomadas en consideración por él porque el termosifón no cuenta con un forro interno. Estas partes fueron, todo el paso 4 y los límites de evaporación, arrastre y absorción del paso 5, ya que estos dependen de las propiedades del material del forro (Chicas, 2020).

Después de haber seguido el paso 1 del diagrama de flujo Chicas llegó a la geometría de termosifón presentada en la Figura 8. Al momento de realizar el proceso de diseño él tomo en consideración que el espacio disponible dentro de la Raspberry Pi 3B era de 3.95×3.95 cm (Ancho y largo).

Figura 8: Termosifón diseñado por Chicas



Fuente: (Chicas, Comparación de Termosifón y Disipador de Calor como Métodos de Refrigeración para un Procesador, 2020)

En su estudio Chicas encontró que la temperatura máxima operativa del Raspberry Pi 3B recomendada por el fabricante era de $80\text{ }^{\circ}\text{C}$, por lo que él asumió que esa sería la temperatura máxima a la que debía llegar el termosifón. Por otro lado, él estimó que la temperatura mínima operativa sería de $30\text{ }^{\circ}\text{C}$, porque la temperatura ambiente donde realizo las pruebas se encontraba entre $23.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $25.0\text{ }^{\circ}\text{C}$, por lo que asumió un aumento de $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ respecto de la temperatura establecida. Chicas calculó el flujo máximo de calor generado por el microprocesador con la magnitud del Thermal Design Power (TDP), del Raspberry Pi 3B (4 W), dividido por el área del procesador ($1.96 \times 10^{-4}\text{ m}^2$), con lo que obtuvo un flujo máximo de calor de $20,408.16\text{ W/m}^2$ ($2.04 \times 10^4\text{ W/m}^2$) (Chicas, 2020).

Adicionalmente, utilizó una presión de -20 in Hg , ya que esa era una medida exacta proporcionada por el vacuómetro acoplado a la bomba de vacío que usó (Chicas, 2020). Como resultado de la presión de vacío, la presión interna absoluta fue de 33.5722 kPa . Él encontró que la temperatura de saturación asociada a esta presión era de $71.60\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Chicas, 2020).

Chicas fabricó su prototipo de termosifón con 4 codos de $1/4$ de pulgada y calculó el vapor saturado necesario para ocupar el volumen interno disponible. El volumen interno del termosifón lo calculó en $4.89 \times 10^{-6}\text{ m}^3$ y al hacer uso de la densidad del vapor saturado a la presión de 33.5722 kPa calculó que serían necesarios $1.04 \times 10^{-6}\text{ kg}$ de vapor de agua para ocupar el volumen interno (Chicas, 2020).

Chicas utilizó la densidad de líquido saturado a la misma presión de 33.5722 kPa y estimó que sería necesario introducir 0.001 ml, como mínimo, para asegurarse de que, al evaporarse el líquido este ocuparía todo el volumen interno del termosifón. Ingresó 1 ml de agua dentro del termosifón, ya que esta era una cantidad superior al mínimo requerido y no ocuparía todo el volumen interno del elemento.

Seleccionó de manera tentativa al agua como fluido de trabajo, porque su rango abarcaba la temperatura operativa del termosifón. Después, seleccionó el cobre como material de fabricación del termosifón porque este era compatible con el recurso hídrico. Para conocer si el fluido de trabajo era apto, él calculó sus límites operativos.

Siguiendo el paso 5 del diagrama de flujo, los límites calculados por Chicas fueron, el calor máximo por límite sónico y por límite viscoso del fluido de trabajo. El límite sónico le dio un valor de $9.32 \times 10^7 \text{ W/m}^2$, que obtuvo mediante la ecuación 1 (anexo 1) y el límite viscoso le dio un valor de $4.55 \times 10^{11} \text{ W/m}^2$, que obtuvo mediante la ecuación 2 (anexo 1) (Chicas, 2020). Chicas llegó a la conclusión de que el calor disipado por el límite viscoso y sónico era superior al flujo máximo de calor generado por la Raspberry, por lo que el agua era apta como refrigerante.

Posteriormente para asegurarse de que un dato estadístico era capaz de representar a una población Chicas obtuvo un tamaño de muestra haciendo uso de la ecuación 3 (anexo 1). Él seleccionó un nivel de confianza del 99%, por lo cual, “z” tenía un valor de 2.576. Chicas estimó un diferencial de temperatura de 10 °C, por lo que el valor para la desviación estándar fue de 2.5. El error máximo aceptado fue de 2 °C (Chicas, 2020).

Debido a que el valor de desviación estándar fue estimado por él, seleccionó que llevaría 12 mediciones para cada método de refrigeración (Chicas, 2020).

Una vez completados los primeros 5 pasos del diagrama Chicas calculó el flujo de calor disipado por el disipador de calor. Comenzó calculado el coeficiente de transferencia de calor por convección. Para calcular este coeficiente primero calculó el número de Grashof (Ecuación 6, anexo 1), Prandtl (Ecuación 5, anexo 1) y Rayleigh (Ecuación 7, anexo 1). Obtuvo los siguientes resultados.

- Número de Grashoff = 239.54
- Número de Prandtl = 0.7019
- Número de Rayleigh = 168.128

Luego calculó el número de Nusselt para el caso donde el flujo de calor es constante. Utilizando la ecuación 10 del anexo 1, obtuvo que el número de Nusselt era de 2.529. Ya contando con el número de Nusselt Chicas procedió a calcular el coeficiente de transferencia de calor por convección, haciendo uso de la ecuación 4 del anexo 1. Obtuvo que el coeficiente tiene un valor de $17.3624 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \times \text{K}}$ (Chicas, 2020).

Para el diseño del disipador tomó un conjunto de aletas cuadradas para representar el disipador. Calculó la constante m (ecuación 11, anexo 1), área de aleta (ecuación 13, anexo 1), área total de aleta (ecuación 13, anexo 1), la eficiencia de la aleta (ecuación 15, anexo 1)

y la longitud equivalente (ecuación 12, anexo 1) (Chicas, 2020). Los resultados que obtuvo son los siguientes:

- Constante $m = 14.38m^{-1}$
- Longitud equivalente = $0.0044m$
- Área de aleta = $1.232 \times 10^{-4}m^2$
- Área total de aleta $8.624 \times 10^{-4}m^2$
- Eficiencia de aleta = 0.99867

A continuación procedió a calcular la resistencia térmica equivalente del disipador de calor por medio de la ecuación 17 del anexo 1 y obtuvo como resultado que la resistencia tenía una magnitud de 66.874 K/W . También calculó la resistencia de la pasta térmica haciendo uso de la ecuación 18 del anexo 1 y obtuvo un valor de 2.646 K/W .

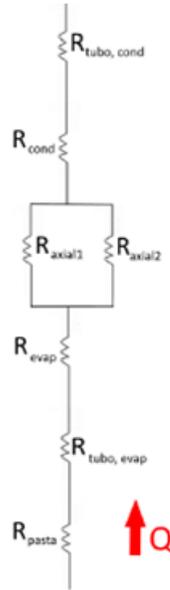
Una vez Chicas contó con las resistencias térmicas equivalentes y las temperaturas promedio calculó el calor disipado (Ecuación 19, anexo 1), calor de entrada (Ecuación 20, anexo 1) y calor de salida (Ecuación 21, anexo 1) para dos posibles casos, el primero era el caso donde la temperatura de la base del termosifón era igual a la temperatura medida por un sensor integrado dentro del microprocesador y el segundo caso era cuando la temperatura de la base del termosifón fue la máxima temperatura medida por medio de termografía. Para fines prácticos los casos se expresan como T_{cpu} (Temperatura de la base del termosifón igual a la temperatura del microprocesador) y T_{smax} (Temperatura de la base del termosifón igual a la temperatura máxima medida por la termografía).

- $\dot{Q}_{\text{disipado disipador } T_{cpu}} = 0.564W$
- $\dot{Q}_{\text{disipado disipador } T_{smax}} = 0.481W$
- $\dot{q}_{\text{in disipador } T_{cpu}} = 2,876.217W/m^2$
- $\dot{q}_{\text{in disipador } T_{smax}} = 2,452.748W/m^2$
- $\dot{q}_{\text{out disipador } T_{cpu}} = 653.69W/m^2$
- $\dot{q}_{\text{in disipador } T_{smax}} = 557.44W/m^2$

Chicas utilizo el mismo método del disipador para determinar el calor disipado por el termosifón, ya que este se puede usar para realizar el cálculo de calor disipado por aletas con geometrías diferentes (Chicas, 2020).

El cálculo y la representación de la resistencia térmica equivalente del termosifón presentada por Shanmuga y Bhaskaran, fue modificado por Chicas. La representación dada por Chicas se observa en la siguiente figura.

Figura 9: Representación de la resistencia térmica del termosifón



Fuente: (Chicas, 2020)

Una vez Chicas definió las resistencias térmicas que representan al termosifón, las calculó. Primero calculó el coeficiente de transferencia de calor del evaporador (ecuación 22, anexo 1) y del condensador (ecuación 23, anexo 1) para los casos donde la temperatura de la base fue igual a la temperatura del procesador y donde la temperatura de la base fue la máxima temperatura medida por medio de termografía.

- $h_{\text{evap } T_{\text{cpu}}} = 64,778.88 \frac{W}{m^2 \times K}$
- $h_{\text{evap } T_{\text{smax}}} = 55,859.99 \frac{W}{m^2 \times K}$
- $h_{\text{evap } T_{\text{cond}T_{\text{smax}}}} = 4,134.28 \frac{W}{m^2 \times K}$

Una vez con estos valores calculó la resistencia del evaporador (ecuación 24, anexo 1), condensador (ecuación 25, anexo 1), tubo del evaporador (ecuación 26, anexo 1), tubo del condensador (ecuación 27, anexo 1), axial (ecuación 28, anexo 1) y resistencia del termosifón (ecuación 29, anexo 1). Sustituyó datos y obtuvo lo siguiente.

- $R_{\text{evap } T_{\text{cpu}}} = 0.0212 K/W$
- $R_{\text{evap } T_{\text{smax}}} = 0.0246 K/W$
- $R_{\text{cond } T_{\text{cpu}}} = R_{\text{cond } T_{\text{smax}}} = 0.3319 K/W$
- $R_{\text{tubo, evap}} = R_{\text{tubo, cond}} = 0.00067 K/W$
- $R_{\text{axial}} = 28.99 K/W$

- $R_{\text{pasta}} = 5.861 \text{ K/W}$
- $R_{\text{termosifón } T_{cpu}} = 14.849 \text{ K/W}$
- $R_{\text{termosifón } T_{smax}} = 14.853 \text{ K/W}$

Por último, Chicas calculó la resistencia equivalente de la pasta térmica, para eso hizo uso de la ecuación 18 del anexo 1 y obtuvo un resultado de 5.861 K/W. Posteriormente procedió a calcular el calor disipado (Ecuación 19, anexo 1), calor de entrada (Ecuación 20, anexo 1) y calor de salida (Ecuación 21, anexo 1) para el caso donde la temperatura de la base fue igual a la temperatura del procesador y donde la temperatura de la base fue la máxima temperatura medida por medio de termografía.

- $\dot{Q}_{\text{disipado termosifón } T_{cpu}} = 1.445 \text{ W}$
- $\dot{Q}_{\text{disipado termosifón } T_{smax}} = 0.998 \text{ W}$
- $\dot{q}_{\text{in termosifón } T_{cpu}} = 16348.057 \text{ W/m}^2$
- $\dot{q}_{\text{in termosifón } T_{smax}} = 11288.311 \text{ W/m}^2$
- $\dot{q}_{\text{out termosifón } T_{cpu}} = 278.928 \text{ W/m}^2$
- $\dot{q}_{\text{out termosifón } T_{smax}} = 192.599 \text{ W/m}^2$

Posteriormente a obtener los resultados estos fueron analizados por Chicas y llegó a las siguientes conclusiones:

- El área del disipador de calor expuesta era menor que la del termosifón: el disipador contaba con un área de $8.6 \times 10^{-4} \text{ m}^2$, y el termosifón, con $5.18 \times 10^{-3} \text{ m}^2$, por lo que “la distribución de calor disipado por unidad de área es mayor” (Chicas, 2020).
- La temperatura operativa promedio que mantuvo el microprocesador fue de 55.03°C al usar el termosifón (Chicas, 2020).
- El flujo de calor de salida del termosifón al asumir que la temperatura de la base era la máxima medida por medio de termografía fue de 192.599 W/m^2 .

Fue tomado como diseño base/original de termosifón el planteado por Chicas (2020) y le fueron realizadas distintas modificaciones a su diseño buscando mejorar la disipación de calor. Se buscó que las modificaciones físicas fueran lo único que mejora el calor disipado por eso, se trabajó bajo condiciones similares a las que trabajo Chicas y fueron seguidas las recomendaciones dadas por él: buscar una presión interna que tenga una temperatura de saturación asociada cercana a la que alcanzará el microprocesador y realizar las mediciones en un ambiente controlado. Una vez tomando esto en consideración, el proceso de diseño realizado es el siguiente.

5.1. Diseño del termosifón

El diseño del termosifón se hizo con base en el diagrama presentado en la Figura 7. En este se presentan los pasos requeridos para diseñar un caloducto, y que a su vez puede ser utilizado para realizar un termosifón. Como fue mencionado en el marco teórico, una de las diferencias que existen entre el diseño de un caloducto y un termosifón es que el termosifón no hace uso de un forro interno, por lo que esas partes del diagrama; el paso 4 y el paso 5 (Límite de absorción, el límite de evaporación y límite de arrastre) no fueron tomados en consideración.

El primer paso fue definir la geometría que tendrían las propuestas del termosifón. En el diseño originalmente propuesto Chicas (Cuadro 1, Figura 12 en la página 25) se tenía un termosifón de tipo bifásico de contorno avanzado, como se ilustra en las figuras 6 y 8. En este caso, fue utilizado el mismo tipo de termosifón para las propuestas. Al momento de definir el tamaño que tendrían las propuestas de diseño se tomó en cuenta el espacio del microprocesador Raspberry Pi 3B + en su placa, ya que el microprocesador usado en este estudio no es idéntico al diseño original. Con un vernier, como se muestra en la figura 10, se

obtuvo que el ancho máximo que podrían tener las propuestas era de 3.95 cm.

Figura 10: Espacio disponible del Raspberry Pi 3B+



Fuente: Elaboración propia

Posteriormente, se seleccionó la temperatura operativa de las propuestas de termosifón. De esta se conocía un estimado, ya que la temperatura promedio operativa del Raspberry Pi 3B con el diseño original de termosifón era de $55.03\text{ }^{\circ}\text{C}$; sin embargo, como se mencionó anteriormente, el microprocesador usado para este estudio no fue el mismo, por lo que su potencia de diseño térmico (TDP, por sus siglas en inglés) difiere.

El microprocesador que se usó, con el diseño original de termosifón, era un Raspberry Pi 3 B, que tiene un TDP de 4 W. El microprocesador Raspberry Pi 3B+ que fue utilizado en este estudio tiene un TDP de 7 W y la temperatura operativa de este puede variar respecto a la que se obtuvo con el diseño original de termosifón; no obstante, se conocía que la temperatura máxima recomendada por el fabricante era de $80\text{ }^{\circ}\text{C}$, ya que, si esta temperatura se supera el microprocesador puede sufrir daños irreversibles. Esta fue seleccionada como la temperatura máxima operativa y para la temperatura mínima se asumió que sería la temperatura ambiental de la ubicación (D-HIVE en el CIT de la Universidad del Valle de Guatemala) donde se llevaron a cabo las pruebas. El ambiente en esta ubicación era controlado y su temperatura era de $24^{\circ}\text{C} \pm 0.5^{\circ}\text{C}$ (temperatura medida con el sensor LM35). Como el microprocesador siempre libera calor, se asumió que la temperatura mínima operativa del microprocesador sería de 30°C .

Luego, se calculó el flujo de calor. Este valor se desconocía, pero al seguir el proceso realizado por Chicas, se realizó una estimación del flujo máximo de calor. Este se obtuvo haciendo uso de la siguiente ecuación:

Ecuación 1: Flujo máximo de calor

$$\dot{q} = \frac{\text{TDP del microprocesador}(W)}{\text{Área del microprocesador}(m^2)} \quad (1)$$

Como se mencionó anteriormente, el TDP del Raspberry Pi 3B + es de 7 W. Para obtener el área de microprocesador nuevamente se hizo uso del vernier para medir el ancho y el largo de este y, se obtuvo que el área era de $(1.96 \times 10^{-4} m^2)$, se ingresaron los valores a la ecuación.

$$\dot{q} = \frac{7W}{1.96 \times 10^{-4} m^2} = 3.57 \times 10^4 \frac{W}{m^2}$$

Posteriormente, se trabajó en la orientación que tendrían los prototipos, la cual es la misma que se utilizó en el diseño original; es decir, una orientación vertical, como se aprecia en la figura 8.

Siguiendo la recomendación dada por Chicas de buscar una presión interna que tenga una temperatura de saturación asociada cercana a la temperatura que alcanzaría el microprocesador, se seleccionaron dos posibles fluidos de trabajo y las posibles presiones de trabajo. El primer posible fluido era agua y el segundo refrigerante R134a. Fueron seleccionados estos dos fluidos por su nula o baja toxicidad, por no ser inflamables y por su compatibilidad con el cobre.

El proceso de los cálculos era idéntico entre ambos fluidos, por lo cual fue seleccionado uno de ellos para la demostración matemática. Se seleccionó el agua como fluido de trabajo. Para que este líquido llegara a una temperatura de saturación menor a los 80 °C, fue necesario generar una presión de vacío, pues se conoce que la temperatura de saturación del agua a una atmósfera (101.325 kPa) es de 99.97 °C. (Cengel & Ghajar, Transferencia de calor y masa, Fundamentos y Aplicaciones, 2011).

Las dos presiones seleccionadas fueron unas que podía alcanzar la bomba de vacío. Las presiones de trabajo fueron -25 in Hg y -20 in Hg (1 in Hg = 3.38764 kPa), estos valores en kPa son -84.691 y -67.753 . Se tomó la decisión de utilizar dos presiones diferentes con el fin de determinar cuál era la presión óptima de trabajo para disipar la mayor cantidad de calor posible. Con el uso de la siguiente ecuación se obtuvo el valor de la presión interna absoluta.

Ecuación 2: Presión absoluta

$$P_{abs} = P_{atm} - P_{vacio} \quad (2)$$

$$16.634 kPa = 101.325 kPa - 84.691 kPa$$

$$33.572 kPa = 101.325 kPa - 67.753 kPa$$

Luego de contar con estos valores de presión interna, se buscó la temperatura asociada a estas presiones en la tabla de agua saturada que se muestra en la Figura 11. Como se observa, no existe un valor dado para las presiones de 33.5722 kPa y 67.7528 kPa, por lo que se interpoló para obtener el dato de la temperatura.

Figura 11: Tabla de agua saturada

Agua saturada. Tabla de presiones

Pres., P kPa	Temp. sat., T_{sat} °C	Volumen específico, m^3/kg		Energía interna, kJ/kg			Entalpía, kJ/kg			Entropía, kJ/kg · K		
		Líqu. sat., v_f	Vapor sat., v_g	Líqu. sat., u_f	Evap., u_{fg}	Vapor sat., u_g	Líqu. sat., h_f	Evap., h_{fg}	Vapor sat., h_g	Líqu. sat., s_f	Evap., s_{fg}	Vapor sat., s_g
1.0	6.97	0.001000	129.19	29.302	2355.2	2384.5	29.303	2484.4	2513.7	0.1059	8.8690	8.9749
1.5	13.02	0.001001	87.964	54.686	2338.1	2392.8	54.688	2470.1	2524.7	0.1956	8.6314	8.8270
2.0	17.50	0.001001	66.990	73.431	2325.5	2398.9	73.433	2459.5	2532.9	0.2606	8.4621	8.7227
2.5	21.08	0.001002	54.242	88.422	2315.4	2403.8	88.424	2451.0	2539.4	0.3118	8.3302	8.6421
3.0	24.08	0.001003	45.654	100.98	2306.9	2407.9	100.98	2443.9	2544.8	0.3543	8.2222	8.5765
4.0	28.96	0.001004	34.791	121.39	2293.1	2414.5	121.39	2432.3	2553.7	0.4224	8.0510	8.4734
5.0	32.87	0.001005	28.185	137.75	2282.1	2419.8	137.75	2423.0	2560.7	0.4762	7.9176	8.3938
7.5	40.29	0.001008	19.233	168.74	2261.1	2429.8	168.75	2405.3	2574.0	0.5763	7.6738	8.2501
10	45.81	0.001010	14.670	191.79	2245.4	2437.2	191.81	2392.1	2583.9	0.6492	7.4996	8.1488
15	53.97	0.001014	10.020	225.93	2222.1	2448.0	225.94	2372.3	2598.3	0.7549	7.2522	8.0071
20	60.06	0.001017	7.6481	251.40	2204.6	2456.0	251.42	2357.5	2608.9	0.8320	7.0752	7.9073
25	64.96	0.001020	6.2034	271.93	2190.4	2462.4	271.96	2345.5	2617.5	0.8932	6.9370	7.8302
30	69.09	0.001022	5.2287	289.24	2178.5	2467.7	289.27	2335.3	2624.6	0.9441	6.8234	7.7675
40	75.86	0.001026	3.9933	317.58	2158.8	2476.3	317.62	2318.4	2636.1	1.0261	6.6430	7.6691
50	81.32	0.001030	3.2403	340.49	2142.7	2483.2	340.54	2304.7	2645.2	1.0912	6.5019	7.5931
75	91.76	0.001037	2.2172	384.36	2111.8	2496.1	384.44	2278.0	2662.4	1.2132	6.2426	7.4558
100	99.61	0.001043	1.6941	417.40	2088.2	2505.6	417.51	2257.5	2675.0	1.3028	6.0562	7.3589
101.325	99.97	0.001043	1.6734	418.95	2087.0	2506.0	419.06	2256.5	2675.6	1.3069	6.0476	7.3545

Fuente: (Cengel & Boles, Termodinamica, 2019)

Nota: Los valores interpolados se encuentran resaltados con color amarillo.

Después de interpolar dio como resultado que las temperaturas de saturación eran de 71.60 °C para la presión de 33.572 kPa, y de 56.04 °C, para la presión de 16.634 kPa.

Fueron propuestos 4 posibles diseños de termosifón que tienen diferencias y similitudes que se muestran y describen en la Tabla 1 a continuación¹.

Debido a que el procedimiento de los cálculos es idéntico entre todos los prototipos, se seleccionó uno para ilustrar los cálculos realizados. La propuesta de diseño seleccionada fue la 3 (Cuadro 1 Figura 14, fabricado en cobre). Como se observa en el Cuadro 1, el volumen interno de esta tiene un valor de $4.5722 \times 10^{-6} m^3$; con este valor se buscó la cantidad de vapor saturado necesario para ocupar todo el volumen interno del termosifón, por lo que se calculó la densidad del vapor saturado para cada una de las presiones.

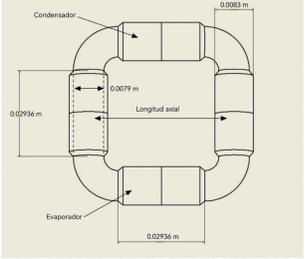
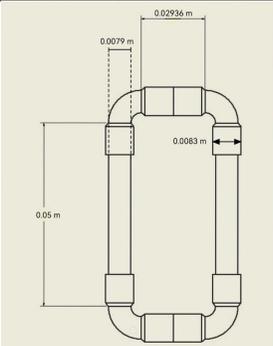
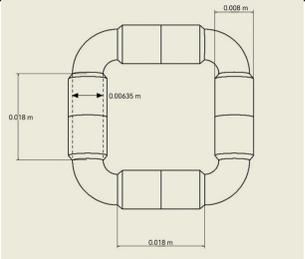
Ecuación 3: Densidad

$$\rho = \frac{m}{V} \left(\frac{kg}{m^3} \right) \quad (3)$$

Fuente: (Cengel & Boles, Termodinamica, 2019)

¹Los volúmenes fueron calculados con el Software Autodesk Inventor Profesional 2023. Las dimensiones de la propuesta 1 y 2 son idénticas y se ilustran en el Cuadro 1 Figura 13, siendo el material lo que las diferencia y las dimensiones de las propuestas 3 y 4 se encuentran en el Cuadro 1 Figura 14, al igual que las anteriores el material es lo que diferencia una de otra.

Cuadro 1: Volumen interno de propuestas

Propuesta de diseño	Volumen interno	Material	Diseño
Diseño original (Chicas)	$4.89 \times 10^{-6} m^3$	Cobre	Figura 12. 
1	$6.7187 \times 10^{-6} m^3$	Cobre	Figura 13. 
2	$6.7187 \times 10^{-6} m^3$	Aluminio	
3	$4.5722 \times 10^{-6} m^3$	Cobre	Figura 14. 
4	$4.5722 \times 10^{-6} m^3$	Aluminio	

Ecuación 4: Volumen específico

$$v = \frac{V}{m} = \frac{1}{\rho} \quad (4)$$

Fuente: (Cengel & Boles, Termodinamica, 2019)

Se puede observar que la densidad y el volumen específico son recíprocos, por lo que al despejar la ecuación para la densidad se obtuvo lo siguiente²:

$$\rho_{33.5722kPa} = \frac{1}{v} = \frac{1}{4.7477m^3/kg} = 0.212kg/m^3$$

²Los valores del volumen específico de vapor saturado se recopilaron interpolando los valores que aparecen en la Figura 11.

$$\rho_{16.634kPa} = \frac{1}{v} = \frac{1}{9.1690m^3/kg} = 0.109kg/m^3$$

Con los valores de la densidad del vapor saturado y el volumen interno del termosifón se calcularon cuántos kilogramos de vapor se requerían para llenar el volumen interno.

$$\text{Kg de vapor} = 0.212 \frac{kg}{m^3} \times 4.5722 \times 10^{-6} m^3 = 0.000000971kg$$

$$\text{Kg de vapor} = 0.109 \frac{kg}{m^3} \times 4.5722 \times 10^{-6} m^3 = 0.000000499kg$$

Se calculó el valor de la densidad de líquido saturado para ambas presiones.

$$\rho = \frac{1}{v} = \frac{1}{0.001023958m^3/kg} = 976.603kg/m^3$$

$$\rho = \frac{1}{v} = \frac{1}{0.00101709m^3/kg} = 983.197kg/m^3$$

Con el valor de las densidades de líquido saturado y los kilogramos de vapor requeridos para llenar el volumen interno de la propuesta de termosifón se calculó la cantidad de mililitros necesarios para asegurarse de que al evaporarse estos ocuparían todo el volumen interno. Esto se obtuvo con la siguiente ecuación:

$$\text{ml necesario} = \frac{\text{kg de vapor} \times 1000}{(\text{densidad de liquido saturado} / 1000)} = \frac{0.000000971kg \times 1000}{(976.603/1000)} = 0.000994ml$$

$$\text{ml necesario} = \frac{\text{kg de vapor} \times 1000}{(\text{densidad de liquido saturado} / 1000)} = \frac{0.000000499kg \times 1000}{(983.197/1000)} = 0.000507ml$$

Se requieren como mínimo 0.000994 ml y 0.000507 ml para que al evaporarse el agua ocupe todo el volumen interno del termosifón. Se seleccionó una cantidad mayor de agua para ingresar al termosifón porque dentro de este existe un flujo de contracorriente de vapor que genera un esfuerzo cortante, si este esfuerzo es mayor que las fuerzas por gravedad y tensión superficial del agua el evaporador se terminara secando, por esto se decidió utilizar 1 mililitro de agua.

Se utilizó el agua como líquido de trabajo y para comprobar si era apto como refrigerante, se calcularon sus límites operativos, que fueron los calores máximos por límite sónico (ecuación 1, anexo 1) y límite viscoso (ecuación 2, anexo 1) del fluido de trabajo.

$$\dot{q} = 0.474h_{fg}(\rho_g p_g)^{0.5}$$

Ingresando valores se obtuvo lo siguiente:

$$\dot{q}_{33.572} = 0.474 \left(2329.026 \frac{kJ}{kg} \right) \sqrt{\left(0.212 \frac{kg}{m^3} \right) (33572.2 Pa)} = 9.32 \times 10^4 \frac{kW}{m^2} = 9.32 \times 10^7 \frac{W}{m^2}$$

$$\dot{q}_{16.634} = 0.474 \left(2367.281 \frac{kJ}{kg} \right) \sqrt{\left(0.109 \frac{kg}{m^3} \right) (16634 Pa)} = 4.78 \times 10^4 \frac{kW}{m^2} = 4.78 \times 10^7 \frac{W}{m^2}$$

Para calcular el calor máximo del parámetro de viscosidad fue utilizada la ecuación 2 del anexo 1.

$$\dot{q} = \frac{r_g h_{fg} \rho_g P_g}{16 \mu_g l_{eff}}$$

Fueron ingresados los valores correspondientes y se obtuvo lo siguiente:

$$\dot{q}_{33.572} = \frac{0.5(0.008m) \left(2329.026 \frac{kJ}{kg} \right) \left(0.212 \frac{kg}{m^3} \right) (33572.2 Pa)}{16(3.22 \times 10^{-4} Pa * s)(0.018m)} = 7.16 \times 10^8 \frac{KW}{m^2} = 7.16 \times 10^{11} \frac{W}{m^2}$$

$$\dot{q}_{16.634} = \frac{0.5(0.008m) \left(2367.281 \frac{kJ}{kg} \right) \left(0.109 \frac{kg}{m^3} \right) (16634 Pa)}{16(3.22 \times 10^{-4} Pa * s)(0.018m)} = 1.20 \times 10^8 \frac{KW}{m^2} = 1.20 \times 10^{11} \frac{W}{m^2}$$

En el Cuadro 2 se compararon los resultados obtenidos del flujo de calor máximo estimado para las dos posibles presiones de trabajo.

Cuadro 2: Flujo de calor máximo vs. Flujo de calor máximo por parámetro viscoso y sónico

Flujo máximo estimado	Presión interna	Flujo de calor máximo por parámetro viscoso	Flujo de calor máximo por parámetro sónico
$3.57 \times 10^4 W/m^2$	33.572 kPa	$7.16 \times 10^{11} W/m^2$	$9.32 \times 10^7 W/m^2$
	16.634 kPa	$1.20 \times 10^{11} W/m^2$	$4.78 \times 10^7 W/m^2$

Fuente: Elaboración propia

Nota: Fueron utilizadas dos posibles presiones internas de trabajo con el fin de conocer cuál era la presión óptima de trabajo.

En el Cuadro 2, se muestra que el flujo de calor por parámetro viscoso y parámetro sónico son, por mucho, superiores al flujo máximo estimado. Por esta razón, se concluyó que el agua es apta como fluido de trabajo para el termosifón. Así mismo, se observa en el Cuadro

2 que los flujos por parámetro sónico y viscoso a la presión de 33.572 kPa son superiores que los obtenidos con la presión de 16.634 kPa.

Por último, estos valores se comparan con los obtenidos con el refrigerante R134a por medio del Cuadro 3.

Cuadro 3: Flujo de calor máximo por parámetro viscoso y parámetro sónico del R134a vs. flujo de calor máximo por parámetro viscoso y parámetro sónico del agua

Fluido de trabajo	Flujo de calor máximo por parámetro viscoso	Flujo de calor máximo por parámetro sónico
Agua	$7.16 \times 10^{11} W/m^2$	$9.32 \times 10^7 W/m^2$
R134a	$6.93 \times 10^9 W/m^2$	$8.52 \times 10^7 W/m^2$

Fuente: Elaboración propia

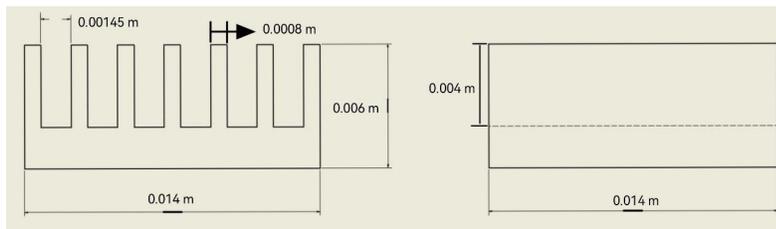
Nota: Los cálculos del flujo de calor máximo por parámetro viscoso y sónico del refrigerante R134a a la presión de 101.325 kPa fueron obtenidos siguiendo el mismo procedimiento matemático usado para el agua. Para los cálculos fueron utilizadas las propiedades del R134a a la presión de 101.325 kPa y una temperatura de 23.95°C.

El Cuadro 3 representa los flujos de calor por parámetro viscoso y sónico de ambos fluidos. En el cuadro se puede observar que el flujo de calor por parámetro viscoso y sónico del agua son superiores a los flujos del R134a. Adicionalmente, el refrigerante R134a se encuentra en estado de vapor sobrecalentado a presión atmosférica. Como se mencionó en el marco teórico, un termosifón bifásico depende de que exista un cambio de fase dentro de él para su funcionamiento, pero la convección natural no es suficiente para hacer que el refrigerante cambie de fase. Tomado esto en cuenta, se indicó que se trabajaría con agua y con una presión de 33.572 kPa.

5.2. Diseño del disipador de calor de Raspberry

Para realizar los cálculos del termosifón, fue necesario obtener el flujo de calor disipado por el disipador de calor de la Raspberry Pi 3B+. Este disipador de calor estaba unido al microprocesador, por lo que solo fue necesario medir sus dimensiones, Figura 15.

Figura 15: Dimensiones de disipador de calor de Raspberry

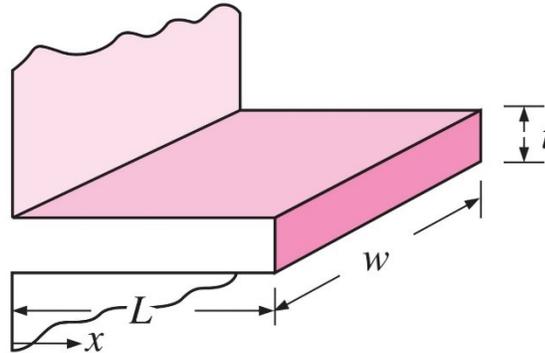


Fuente: Elaboración propia

Nota: El material de fabricación del disipador de calor es aluminio.

La geometría de la aleta rectangular recta se ve representada por medio de la siguiente figura. En esta se puede observar que las variables “L”, “w” y “t” son las dimensiones de la aleta.

Figura 16: Geometría de aletas rectangulares rectas



Fuente: (Cengel & Ghajar, Transferencia de calor y masa, Fundamentos y Aplicaciones, 2011)

5.3. Pruebas operativas del termosifón

- **Tamaño de muestra:** Como se mencionó en el marco teórico, Chicas realizó un cálculo para determinar el tamaño de muestra necesario para representar a una población. Siguiendo su recomendación se realizaron un total de 12 mediciones haciendo uso del termosifón como método de refrigeración para la Raspberry.
- **Descripción de las pruebas:** Se realizan un total de 12 pruebas de estrés haciendo uso del termosifón como método de refrigeración para la Raspberry Pi 3B+. Cada prueba de estrés tarda 10 minutos en realizarse y tienen un tiempo de inactividad de 5 minutos entre cada prueba. Simultáneamente se corre la programación del Arduino Uno para medir la temperatura ambiental, haciendo uso del sensor de temperatura LM35.
- **Protocolo de pruebas:** Lista de materiales y equipos para realizar pruebas.
Equipos:
 - Prototipo de termosifón.
 - Microprocesador Raspberry Pi 3B+.
 - Memoria SD Card.
 - Arduino Uno.
 - Sensor de temperatura LM35.
 - Cámara termográfica.
 - Cable Ethernet.
 - Computadora.
 - Protoboard.

- Cables para Protoboard de color rojo, negro y verde.
- Cable de USB B a USB A.
- Pasta térmica Manhattan.

Materiales:

- Tener instalado el software Raspberry Pi OS (anexo 3, pasos 1-10).
- Tener instalado el software PuTTY (anexo 3, pasos 11-16).
- Tener instalado el software VNC Viewer.

Procedimiento:

1. Aplicar un cordón de 0.2 gramos de pasta térmica sobre el microprocesador, tal como se ilustra en la siguiente figura.

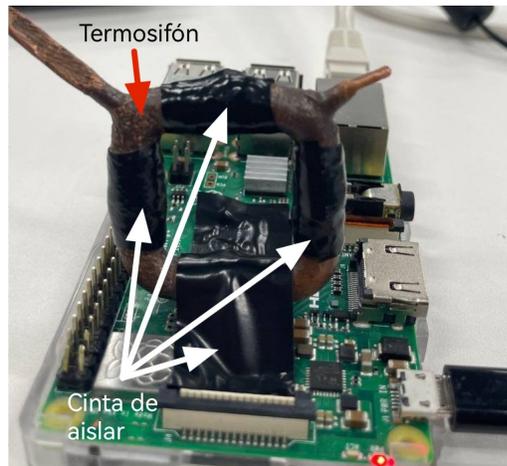
Figura 17: Cordón de pasta térmica



Fuente: Elaboración propia

2. Unir el termosifón al microprocesador usando la pasta térmica.
3. Aplicar cinta de aislar en la superficie del termosifón para que cuando se utilice la termografía se obtengan resultados más precisos.

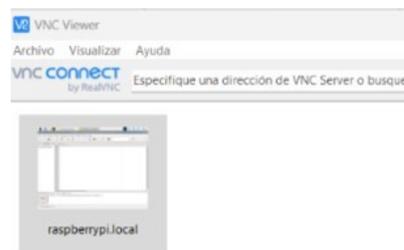
Figura 18: Termosifón con cinta de aislar



Fuente: Elaboración propia

4. Conecte el cable de ethernet a la Raspberry Pi 3B+ y a su computadora.
5. Abrir VNC Viewer. En la pantalla se verá lo que se ilustra en la figura 19.

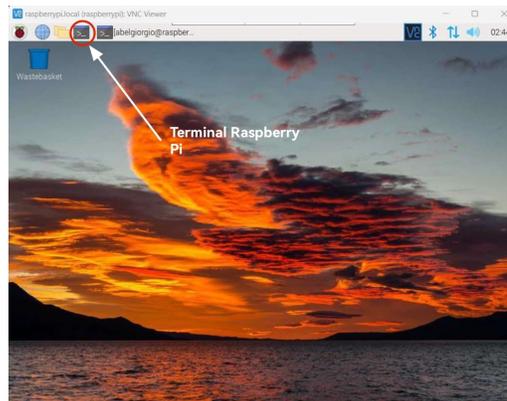
Figura 19: VNC Viewer pantalla principal



Fuente: Elaboración propia

6. Ingresar a la opción de Raspberrypi.local.
7. Abrir la terminal Raspberry Pi (figura 20).

Figura 20: Terminal Raspberry Pi



Fuente: Elaboración propia

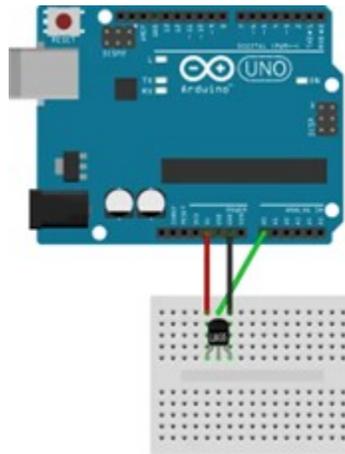
8. Actualizar su RPI al ingresar el siguiente código:
> `sudo apt update`
> `sudo apt full-upgrade`
9. Instalar Stressberry por medio del siguiente código:
> `sudo apt install stress`
> `pip3 install stressberry -user`
> `pip3 install -upgrade numpy`
10. Generar una carpeta en el directorio de inicio para recopilar en ella todos los archivos e imágenes. Para crear la carpeta se debe utilizar el siguiente código:
> `mkdir ~ /Pruebas de temperatura`
> `cd ~ /Pruebas de temperatura`
11. Cuando se hayan seguido todos los pasos anteriormente mencionados, ingresar el siguiente código para comenzar la prueba de estrés:
> `/home/pi/.local/bin/stressberry-run -n "My Testd 600 -i 300 -c 4 mytest.out`

Donde:

- (-n "My Test") es el nombre de la prueba que se usará más adelante para el *plotting*.
 - (-i 300) es el número de períodos de inactividad de 5 minutos antes y después de la prueba.
 - (-d 600) es el tiempo de estrés de 10 minutos (600 es el tiempo en segundos)
 - (-c 4) es el número de núcleos, en este caso 4.
 - (mytest.out) es el nombre del archivo de los datos recopilados.
12. Realice el circuito para conectar el sensor LM35 al Arduino Uno.
 - Inserte el sensor LM35 en el Protoboard como se muestra en la Figura 21.
 - Conecte un extremo del cable negro para Protoboard al pin GND del Arduino Uno.
 - Conecte el otro extremo del cable negro para Protoboard a la pata derecha del sensor LM35 (Figura 21).

- Conecte un extremo del cable rojo para Protoboard a la salida de 5V del Arduino Uno.
 - Conecte el otro extremo del cable rojo para Protoboard a la pata izquierda del sensor LM35 (Figura 21).
 - Conecte un extremo del cable verde para Protoboard al pin de entrada análoga A0 del Arduino Uno.
 - Conecte el otro extremo del cable verde para Protoboard a la pata de en medio del sensor LM35 (Figura 21).
13. El circuito del sensor LM35 al Arduino Uno debe ser idéntico al de la Figura 21.

Figura 21: Esquema de conexión del sensor LM35



Fuente: (Llamas, 2023)

14. Abrir la aplicación de Arduino.
15. Conectar el Arduino a su computadora.
16. Ingresar el siguiente código para medir la temperatura, Figura 22.

Figura 22: Código para sensor de temperatura

```

sketch_mar29a
#define LM35 A0
void setup()
{
  Serial.begin(9600);
}

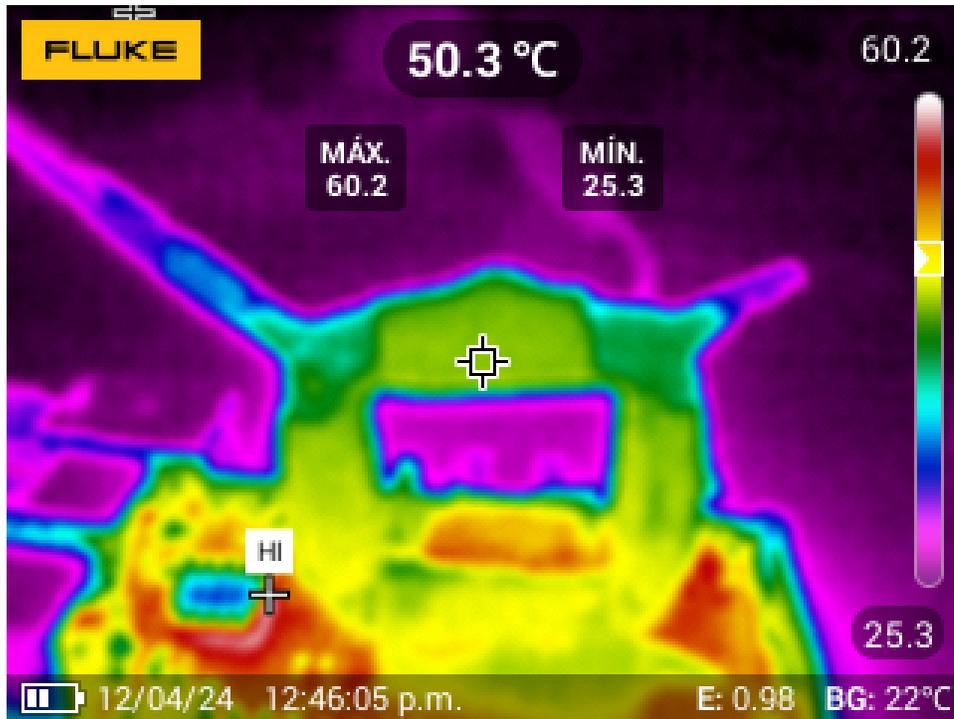
void loop()
{
  int value = analogRead(A0);
  float volts = (value * 5)/1023.0;
  float celsius = volts * 100;
  Serial.print(celsius);
  Serial.println("c");
  delay(1000);
}

```

Fuente: Elaboración propia

17. Mediar la temperatura ambiental de manera simultánea con cada prueba de stress.
18. Al terminar cada una de las pruebas de estrés, realizar una medición de temperatura con la cámara termografía sobre la superficie del termosifón como se ve en la Figura 23.

Figura 23: Medición termográfica



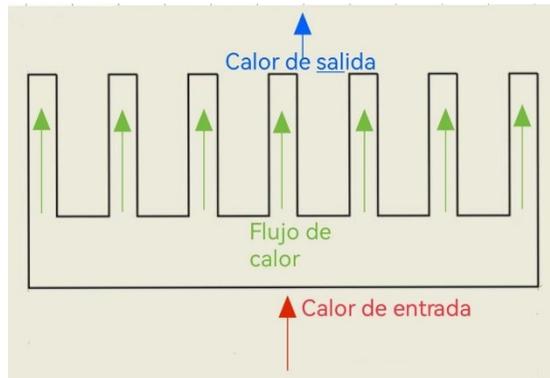
Fuente: Elaboración propia

19. Copiar en un documento de Excel los registros de temperatura máxima del procesador desplegados por el programa de estrés del Raspberry y, de igual manera, copiar los registros de temperatura ambiental dados por el código de temperatura del Arduino.
20. Repetir los pasos 11, 13, 18 y 19 hasta completar las 12 pruebas de estrés.

5.4. Cálculos térmicos

Como fue mencionado previamente en la sección de diseño del disipador de calor, este elemento no fue el principal interés de este estudio y tampoco se buscaba comparación con el termosifón; sin embargo, el calor de entrada del disipador era necesario para posteriormente realizar los cálculos de calor del termosifón.

Figura 24: Flujo de calor del disipador de calor



Fuente: Elaboración propia

5.4.1. Proceso de cálculo de coeficiente de transferencia de calor por convección natural

En los estudios relacionados con la convección es una práctica común remover las dimensiones del coeficiente de transferencia de calor h con el número de Nusselt. En este caso, se empleó una correlación empírica sencilla para definir el número promedio de Nusselt (Cengel & Ghajar, Transferencia de calor y masa, Fundamentos y Aplicaciones, 2011).

El primer paso fue calcular el número de Grashof haciendo uso de la ecuación 4 del anexo 1. Dado que en las tablas de propiedades del aire no existe un valor específico para la temperatura requerida ($23.95\text{ }^{\circ}\text{C}$), fue necesario interpolar las siguientes propiedades: “coeficiente de expansión térmica” (Engineering ToolBox, Air - Density, Specific Weight and Thermal Expansion Coefficient vs. Temperature and Pressure, 2003), “densidad” (Engineering ToolBox, Air - Density, Specific Weight and Thermal Expansion Coefficient vs. Temperature and Pressure, 2003) y “viscosidad dinámica” (Engineering ToolBox, Air - Dynamic and Kinematic Viscosity, 2003).

$$Gr = \frac{g\beta\rho^2|T_s - T_{\infty}|L_c^3}{\mu^2}$$

$$Gr = \frac{(9.81\text{m/s}^2)(0.003391\text{K}^{-1})(1.12338\text{kg/m}^3)^2|58.72^{\circ}\text{C} - 23.95^{\circ}\text{C}|(0.004\text{m})^3}{(1.908 \times 10^{-5}\text{N} \times \text{s/m}^2)^2} = 256.666$$

Nota: El número de Grashof es adimensional.

Posteriormente, se calculó el número de Prandtl (ecuación 5, anexo 1) y fue necesario interpolar el valor de las tablas de propiedades. Los valores que fueron interpolados son los siguientes: calor específico (Engineering ToolBox, Air - Specific Heat vs. Temperature at Constant Pressure, 2004) y conductividad térmica (Engineering ToolBox, Air - Thermal Conductivity vs. Temperature and Pressure, 2009).

$$Pr = \frac{\mu c_p}{k} = \frac{(1.908 \times 10^{-5} N \times S/m^2) (1006.6628 J/kg \times K)}{0.0273613 W/m \times K} = 0.7019$$

Luego se realizó el cálculo del número de Rayleigh (ecuación 7, del anexo 1).

$$Ra = Gr Pr = (256.666)(0.7019) = 180.07$$

Cuando se contó con el número de Rayleigh y Prandtl, se calculó el número de Nusselt por medio de la ecuación 10 del anexo 1.

$$Nu = \left(0.825 + \frac{0.387 \times (180.07)^{1/6}}{\left(1 + \left(\frac{0.437}{0.7019} \right)^{9/16} \right)^{8/27}} \right)^2 = 2.566$$

Por último, se calculó el coeficiente de transferencia de calor por convección natural con el ambiente al que fue expuesto el disipador de calor.

$$h = \frac{k Nu}{L_c} = \frac{(0.02736 W/m \times K) (2.566)}{(0.004 m)} = 17.556 \frac{W}{m^2 \times K}$$

5.4.2. Procedimiento de cálculo de flujo de calor disipado

Disipador de calor

Como fue mencionado en la sección del diseño del disipador de calor, se usó un diseño de aleta rectangular con un total de siete aletas. Por ello, se efectúa el cálculo de la longitud característica (ecuación 12, del anexo 1), el área de la aleta (ecuación 13, del anexo 1), constante “m” (ecuación 11, del anexo 1), su eficiencia (ecuación 15, del anexo 1) y el área total de las aletas (ecuación 14, del anexo 1). Para ello fue necesario conocer la constante de conductividad térmica del aluminio, la cual tenía un valor de $210 W/m \times K$ (MatWeb, 2009). Asimismo, se requerían las dimensiones de la aleta, que tenían los siguientes valores:

- $Grosor(t) = 0.0008m$
- $Ancho(w) = 0.014m$
- $Longitud(L) = 0.004m$

Con estos datos se procedió a calcular:

$$m = \sqrt{2 \frac{h}{kt}} = \sqrt{2 \frac{(17.556 W/m^2 \times K)}{(210 W/m \times K)(0.0008 m)}} = 14.46 m^{-1}$$

$$L_c = L + \frac{t}{2} = (0.004m) + \frac{(0.0008m)}{2} = 0.0044m$$

$$A_{aleta} = 2wL_c = 2(0.014m)(0.0044m) = 1.232 \times 10^{-4}m^2$$

$$A_{totalaleta} = 7 \times A_{aleta} = 7(1.232 \times 10^{-4}m^2) = 8.624 \times 10^{-4}m^2$$

$$\eta = \frac{\tanh(mL_c)}{mL_c} = \frac{\tanh(14.46m^{-1} \times 0.0044m)}{(14.46m^{-1} \times 0.0044m)} = 0.99865$$

Con el área total, la eficiencia de la aleta y el coeficiente de transferencia de calor fue calculada la resistencia térmica equivalente del disipador de calor (ecuación 17, anexo 1):

$$R_{disipador} = \frac{1}{hA_{totalaleta}\eta_{aleta}} = \frac{1}{(17.556 W/m^2 \times K)(8.624 \times 10^{-4}m^2)(0.99865)} = 66.1391 \frac{K}{W}$$

Posteriormente, fue calculada la resistencia térmica equivalente para la pasta térmica (ecuación 18, anexo 1):

$$R_{pasta} = \frac{L_{pasta}}{k_{pasta}A_{base}} = \frac{0.005m}{(0.965 W/m \times K)(1.96 \times 10^{-4}m^2)} = 2.644 \frac{K}{W}$$

Nota: la constante $k(0.965W/(m \times K))$ de la pasta térmica está dada por el fabricante Manhattan.

Al tomar la información de la resistencia térmica de la pasta y del disipador (resistencias en serie), además de la temperatura promedio, se calculó el calor disipado. Se analizaron dos escenarios para la temperatura base; uno donde la temperatura base era la temperatura medida de la CPU, y otro, donde la temperatura era la máxima medida con la cámara termográfica:

$$\dot{Q}_{disipado} = \frac{T_{base} - T_{\infty}}{R_{disipador} + R_{pasta}}$$

$$\dot{Q}_{disipadoT_{cpu}} = \frac{(68.9 - 23.95)^{\circ}C}{(66.1391 + 2.644)K/W} = 0.654W$$

$$\dot{Q}_{disipadoT_{smax}} = \frac{(63.5 - 23.95)^{\circ}C}{(66.1391 + 2.644)K/W} = 0.575W$$

Puesto que el elemento se encontraba en equilibrio térmico, se usó el calor disipado para obtener el flujo de calor de entrada y de salida.

$$\dot{q}_{\text{indisipador}T_{\text{cpu}}} = \frac{\dot{Q}_{\text{disipado}T_{\text{cpu}}}}{A_{\text{base}}} = \frac{0.654W}{(0.014m)^2} = 3334.223 \frac{W}{m^2}$$

$$\dot{q}_{\text{indisipador}T_{\text{smax}}} = \frac{\dot{Q}_{\text{disipado}T_{\text{smax}}}}{A_{\text{base}}} = \frac{0.575W}{(0.014m)^2} = 2933.672 \frac{W}{m^2}$$

$$\dot{q}_{\text{outdisipador}T_{\text{cpu}}} = \frac{\dot{Q}_{\text{disipado}T_{\text{cpu}}}}{A_{\text{totAleta}}} = \frac{0.654W}{8.624 \times 10^{-4}m^2} = 757.778 \frac{W}{m^2}$$

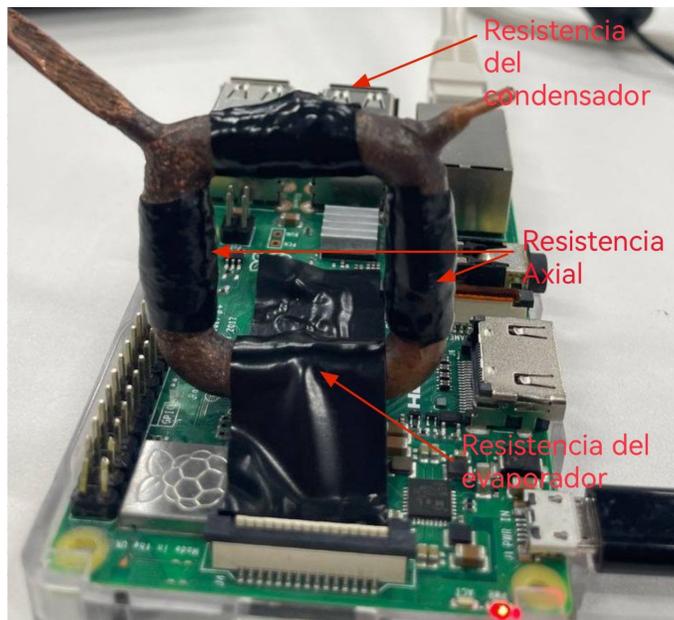
$$\dot{q}_{\text{outdisipador}T_{\text{smax}}} = \frac{\dot{Q}_{\text{disipado}T_{\text{smax}}}}{A_{\text{totAleta}}} = \frac{0.575W}{8.624 \times 10^{-4}m^2} = 666.744 \frac{W}{m^2}$$

La intención de realizar los cálculos térmicos del disipador era el obtener el flujo de calor disipado para posteriormente utilizarlos para los cálculos del termosifón, porque no se conoce el flujo inicial de calor.

Termosifón

En el marco teórico se indica que el termosifón puede ser representado mediante una resistencia térmica (Figura 9). Esta está compuesta por una serie de resistencias: resistencia del evaporador, condensador, del tubo de evaporador y tubo condensador, resistencia axial y resistencia de la pasta térmica.

Figura 25: Resistencias del termosifón



Fuente: Elaboración propia

La siguiente ecuación describe la resistencia térmica del termosifón.

$$R_{\text{termosifón}} = R_{\text{pasta}} + R_{\text{tubo, evap}} + R_{\text{evap}} + R_{\text{tubo, cond}} + R_{\text{cond}} + \frac{1}{2/R_{\text{axial}}}$$

Una resistencia es un elemento que se opone o dificulta el flujo energético; en este caso, las resistencias se oponen al flujo de calor, por lo que se llevó a cabo una serie de cálculos preliminares para definir qué resistencia era la que tenía la mayor oposición al flujo³.

El Cuadro 4 muestra que la resistencia de mayor tamaño y con mayor influencia es la axial y para conocer qué variable era la de mayor influencia en el crecimiento de valor de está, se analizó la ecuación característica (ecuación 28, anexo 1).

Cuadro 4: Valores de resistencias

Variable	Valor
R. evaporador	0.0281 K/W
R. condensador	0.2857 K/W
R. tubo evaporador	0.0031 K/W
R. tubo condensador	0.0031 K/W
R. axial	76.065 K/W
R. pasta térmica	5.861 K/W

Fuente: Elaboración propia

$$R_{\text{axial}} = \frac{0.5L_{\text{evap}} + L_{\text{axial}} + 0.5L_{\text{cond}}}{K_{\text{tubo}} \left(\frac{\pi}{4} \times (D_{\text{ext}}^2 - D_{\text{int}}^2) \right)}$$

Al efectuar un análisis matemático se observó que la variable de los diámetros es la que influye mayormente en la resistencia térmica, esto se debe a que son una ecuación de segundo grado; es decir, esta variable se encuentra elevada al cuadrado.

Una vez analizado este apartado, se procedió a ejecutar las modificaciones a las propuestas 3 y 4. Las propuestas 1 y 2, que fueron las originales, se quedaron tal y como estaban, esto con la intención de ilustrar la manera en que influye la resistencia en el calor disipado por el elemento.

De igual forma se llevaron a cabo una serie de cálculos preliminares para conocer el tamaño aproximado de las resistencias térmicas de cada una de las propuestas de diseño de termosifón. El objetivo era conocer qué propuesta contaba con la resistencia térmica más pequeña y cuál disipaba una mayor cantidad de calor. Para seleccionar esta para su fabricación y posteriormente realizar pruebas con ella.

Entre los resultados (anexo 4) se obtuvo que la propuesta 3 de diseño es la que obtuvo el mejor porcentaje de calor disipado, así como la resistencia térmica equivalente más pequeña. Por lo que se tomó la decisión de fabricar esta propuesta. El proceso de los cálculos es idéntico al que se muestra a continuación.

³Los cálculos preliminares realizados siguen el mismo procedimiento presentado más adelante, en esta parte solamente se presentan los resultados obtenidos de los cálculos efectuados.

Para el cálculo de la resistencia térmica del evaporador del termosifón se asumió que el flujo de calor de entrada era igual al del disipador de calor. Cabe mencionar que fue utilizado el flujo de calor de entrada de los dos escenarios (temperatura de la CPU y temperatura máxima superficial). En el Cuadro 5 se ilustran las iteraciones realizadas hasta obtener un porcentaje 0.5 de diferencia entre los flujos de calor de entrada. Fueron utilizadas las propiedades del agua.

Cuadro 5: Iteraciones del flujo de calor de entrada para cálculo de calor disipado del termosifón

No. de iteración	1			2			3		
Temp. Base	$\dot{q}_{in\,inicial}(W/m^2)$	$\dot{q}_{in\,final}(W/m^2)$	Cambio(%)	$\dot{q}_{in\,inicial}(W/m^2)$	$\dot{q}_{in\,final}(W/m^2)$	Cambio(%)	$\dot{q}_{in\,inicial}(W/m^2)$	$\dot{q}_{in\,final}(W/m^2)$	Cambio(%)
Tcpu	3334.223	39564.02	1086.60	39564.02	39780.56	0.55	39780.56	39780.84	0.000
Tsmax	2933.672	34129.46	1063.37	34129.46	34325.11	0.57	34325.11	34325.38	0.000

Fuente: Elaboración propia

A continuación, se ilustran los cálculos realizados para la tercera iteración. El primero fue el del coeficiente de transferencia de calor del evaporador (ecuación 22, anexo 1) y el condensador del termosifón (ecuación 23, anexo 1), para posteriormente calcular sus respectivas resistencias.

$$h_{evap} = 0.32 \dot{q}_{in}^{0.4} \times \left\{ \frac{\rho_l^{0.65} K_l^{0.3} C_{pl}^{0.7} g^{0.2}}{\rho_g^{0.25} h_{fg}^{0.4} \mu_l^{0.1}} \right\} \times \left(\frac{P_{sat}}{P_{amb}} \right)$$

$$h_{evapT_{cpu}} = 0.32 \left(39780.55846 \frac{W}{m^2} \right)^{0.4} \times \left\{ \frac{(976.601 kg/m^3)^{0.65} (0.63086)^{0.3} (4179.96 J/kg \times K)^{0.7} (9.81 m/s^2)^{0.2}}{(0.21245 kg/m^3)^{0.25} (2329.03 kJ/kg)^{0.4} (0.00063 N \times s/m^2)^{0.1}} \right\} \times \left(\frac{33.5722 kPa}{95.912 kPa} \right)^{0.3} = 93458.33609 \frac{W}{m^2 * K}$$

$$h_{evapT_{smax}} = 0.32 \left(34325.1055 \frac{W}{m^2} \right)^{0.4} \times \left\{ \frac{(976.601 kg/m^3)^{0.65} (0.63086)^{0.3} (4179.96 J/kg \times K)^{0.7} (9.81 m/s^2)^{0.2}}{(0.21245 kg/m^3)^{0.25} (2329.03 kJ/kg)^{0.4} (0.00063 N \times s/m^2)^{0.1}} \right\} \times \left(\frac{33.5722 kPa}{95.912 kPa} \right)^{0.3} = 88103.76072 \frac{W}{m^2 * K}$$

$$h_{condT_{cpu}} = h_{condT_{smax}} = 0.943 \left\{ \frac{\rho_l g K_l^3 (\rho_l - \rho_v) [h_{fg} + 0.68 C_{pl} (T_{sat} - T_w)]}{\mu_l L_{cond} (T_{sat} - T_w)} \right\}^{0.25}$$

$$\begin{aligned}
h_{cond} &= 0.943 \left(\left(\left(976.601 \frac{kg}{m^3} \right) \left(9.81 \frac{m}{s} \right) \left(0.63086 \frac{W}{m \times K} \right)^3 \left(976.601 - 0.21245 \right) \frac{kg}{m^3} \right) \right. \\
&\quad \times \left[\left(2329.03 \frac{kJ}{kg} \right) + 0.68 \left(4179.96 \frac{J}{kg \times K} \right) ((71.6026 - 46.3)^\circ C) \right] \\
&\quad \div \left(\left(0.00063 \frac{N \times s}{m^2} \right) (0.0018 m) (71.6026 - 46.3) \right)^{0.25} \\
&= 4802.9131 \frac{W}{m^2 \times K}
\end{aligned}$$

Con los valores de los coeficientes se calcularon las resistencias térmicas equivalentes con el uso de las ecuaciones 24 y 25.

$$R_{evap \ Tcpu} = \frac{1}{\left(93458.33609 \frac{W}{m^2 \times K} \right) \times \pi (0.00635 \ m) (0.018 \ m)} = 0.0298 \frac{K}{W}$$

$$R_{evap \ Tsmax} = \frac{1}{\left(88103.76072 \frac{W}{m^2 \times K} \right) \times \pi (0.00635 \ m) (0.018 \ m)} = 0.0316 \frac{K}{W}$$

$$R_{cond \ Tcpu} = R_{cond \ Tsmax} = \frac{1}{\left(4802.9131 \frac{W}{m^2 \times K} \right) \times \pi (0.00635 \ m) (0.018 \ m)} = 0.5798 \frac{K}{W}$$

Posteriormente, fueron calculadas las siguientes resistencias: resistencia térmica del tubo de evaporador (ecuación 28) y del condensador (ecuación 29), así como resistencia axial (ecuación 30). La resistencia del tubo de evaporado y del condensador es idéntica, justo en este caso en particular, ya que tienen la misma longitud y los mismos diámetros.

$$R_{tubo,cond} = R_{tubo,evap} = \frac{\ln \left(\frac{0.5(0.00800 \ m)}{0.5(0.00635 \ m)} \right)}{2\pi \left(398 \frac{W}{m \times K} \right) (0.018 \ m)} = 0.00513 \frac{K}{W}$$

$$R_{axial} = \frac{0.5(0.018 \ m) + (0.018 \ m) + 0.5(0.018 \ m)}{\left(398 \frac{W}{m \times K} \right) \frac{\pi}{4} \times \left((0.008 \ m)^2 - (0.00635 \ m)^2 \right)} = 4.864 \frac{K}{W}$$

Con todas las resistencias térmicas se calculó la equivalente a la del termosifón.

$$R_{termosifon \ Tcpu} = 0.00513 \frac{K}{W} + 0.0298 \frac{K}{W} + 0.00513 \frac{K}{W} + 0.5798 \frac{K}{W} + \frac{1}{\frac{2}{4.864 \frac{K}{W}}} = 3.052 \frac{K}{W}$$

$$R_{\text{termosifon } T_{\text{smax}}} = 0.00513 \frac{K}{W} + 0.0316 \frac{K}{W} + 0.00513 \frac{K}{W} + 0.5798 \frac{K}{W} + \frac{1}{\frac{2}{4.864 \frac{K}{W}}} = 3.054 \frac{K}{W}$$

La última resistencia calculada fue la resistencia de la pasta térmica (ecuación 18), en la que el espesor de la capa aplicada es de $0.0005m$ (L). La conductividad térmica de la pasta es de $0.965 \frac{W}{m \times K}$ (K) y el área de contacto de la pasta térmica es 8.40×10^{-5} (A_{base}).

$$R_{\text{pasta}} = \frac{0.0005 \text{ m}}{\left(0.965 \frac{W}{m \times K}\right) \left((1.4 \times 10^{-2}m) (6 \times 10^{-3}m)\right)} = 6.168 \frac{K}{W}$$

Con todas las resistencias, se calcula el calor disipado del termosifón con el ambiente.

$$\dot{Q}_{\text{disipado termosifon } T_{\text{cpu}}} = \frac{54.76^\circ\text{C} - 23.95^\circ\text{C}}{(3.052 + 6.168) \frac{K}{W}} = 3.342W$$

$$\dot{Q}_{\text{disipado termosifon } T_{\text{smax}}} = \frac{50.54^\circ\text{C} - 23.95^\circ\text{C}}{(3.054 + 6.168) \frac{K}{W}} = 2.883W$$

Por último, se calculó el flujo de calor de entrada y salida del termosifón. El área total del termosifón fue calculada mediante el Software inventor y tenía un valor de 0.004723754 m^2 .

$$\dot{q}_{\text{in termosifon } T_{\text{cpu}}} = \frac{\dot{Q}_{\text{disipado termosifon } T_{\text{cpu}}}}{A_{\text{base}}} = \frac{3.342 \text{ W}}{8.4 \times 10^{-5}m} = 39780.83945 \frac{W}{m^2}$$

$$\dot{q}_{\text{in termosifon } T_{\text{smax}}} = \frac{\dot{Q}_{\text{disipado termosifon } T_{\text{smax}}}}{A_{\text{base}}} = \frac{2.883 \text{ W}}{8.4 \times 10^{-5}m} = 34325.37481 \frac{W}{m^2}$$

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{\text{out termosifon } T_{\text{cpu}}} &= \frac{\dot{Q}_{\text{disipado termosifon } T_{\text{cpu}}}}{A_{\text{tot aleta}}} = \frac{3.342 \text{ W}}{(4.72 \times 10^{-3}m^2) - (8.40 \times 10^{-5}m^2)} \\ &= 720.209 \frac{W}{m^2} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{\text{out termosifon } T_{\text{cpu}}} &= \frac{\dot{Q}_{\text{disipado termosifon } T_{\text{cpu}}}}{A_{\text{tot aleta}}} = \frac{2.883 \text{ W}}{(4.72 \times 10^{-3}m^2) - (8.40 \times 10^{-5}m^2)} \\ &= 621.441 \frac{W}{m^2} \end{aligned}$$

5.5. Resultados

Cuadro 6: Resultados del cálculo del flujo de calor máximo por el parámetro sónico y por el parámetro de viscosidad, del agua a dos presiones distintas.

Flujo de calor	Agua	
Límite de flujo de calor por parámetro sónico W/m^2	4.78×10^7 a 16.634 kPa	9.32×10^7 a 33.572 kPa
Límite de flujo de calor por parámetro de viscosidad W/m^2	1.20×10^{11} a 16.634 kPa	7.16×10^{11} a 33.572 kPa

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 7: Resultados del cálculo del flujo de calor máximo por el parámetro sónico y por el parámetro de viscosidad, del R134a a una presión específica.

Fluido	Refrigerante R134a
Límite de flujo de calor por parámetro sónico	8.52×10^7 a 101.325 kPa
Límite de flujo de calor por parámetro de viscosidad	6.93×10^9 a 101.325 kPa

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 8: Resultados de las pruebas Térmicas para el prototipo de termosifón fabricado (Propuesta 3 de diseño): Temperatura del microprocesador, superficial y superficial máxima

Número de prueba	Temperatura del ambiente °C	Temperatura superficial del termosifón °C	Temperatura superficial máxima del termosifón °C	Temperatura del microprocesador
1	23.95	45.1	50.7	53.74
2	23.95	45.2	50.1	54.16
3	23.95	45.5	50.0	55.27
4	23.95	44.8	50.2	55.02
5	23.95	45.1	50.8	53.74
6	23.95	45.3	50	55.33
7	23.95	45.1	50.4	54.93
8	23.95	45.3	50.2	54.22
9	23.95	45.2	50.3	55.33
10	23.95	46.3	51.6	55.48
11	23.95	45.9	51.1	55.02
12	23.95	46.3	51.1	54.92
Promedio	23.95	45.43	50.54	54.76

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 9: Valores de resistencias equivalentes del prototipo fabricado: Para caso de temperatura de la base del termosifón igual a la temperatura promedio del microprocesador.

Nombre de la Resistencia	Prototipo fabricado
Resistencia del evaporador K/W	0.0298
Resistencia del condensador K/W	0.5798
Resistencia del tubo del evaporador K/W	0.00513
Resistencia del tubo del condensador K/W	0.00513
Resistencia axial K/W	4.864
Resistencia de pasta térmica K/W	6.168
Resistencia térmica equivalente del termosifón K/W	3.052

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 10: Valores de resistencias equivalentes del prototipo fabricado: Para caso de temperatura de la base del termosifón igual a la temperatura promedio superficial máxima medida.

Nombre de la resistencia	Prototipo fabricado
Resistencia del evaporador K/W	0.0316
Resistencia del condensador K/W	0.5798
Resistencia del tubo del evaporador K/W	0.00513
Resistencia del tubo del condensador K/W	0.00513
Resistencia axial K/W	4.864
Resistencia de pasta térmica K/W	6.168
Resistencia térmica equivalente del termosifón K/W	3.054

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 11: Resultados de análisis térmico: Para caso de temperatura de la base del termosifón igual a la temperatura promedio del microprocesador.

Prototipo fabricado	Propuesta 3
Calor disipado en Watts	3.342
Flujo de calor de entrada W/m^2	39780.839
Flujo de calor de salida W/m^2	720.209
Porcentaje de calor disipado del TDP (7W)	48 %

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 12: Resultados de análisis térmico: Para caso de temperatura de la base del termosifón igual a la temperatura promedio superficial máxima medida.

Prototipo fabricado	Propuesta 3
Calor disipado en Watts	2.883
Flujo de calor de entrada W/m^2	34325.375
Flujo de calor de salida W/m^2	621.441
Porcentaje de calor disipado del TDP (7W)	41 %

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 13: Comparativo entre el diseño original y el prototipo fabricado

Diseño	Original (Chicas)	Prototipo fabricado
Potencia de diseño térmico por sus siglas en inglés Thermal Design Power (TDP) en Watts.	4	7
Calor disipado por el termosifón cuando la temperatura base del termosifón es igual a la del microprocesador (Tcpu) en Watts.	1.445	3.342
Calor disipado por el termosifón cuando la temperatura base es la máxima superficial medida (Tsmáx) en Watts.	0.998	2.883
Porcentaje de calor disipado cuando la temperatura base del termosifón es igual a la del microprocesador (Tcpu).	36 %*	48 %
Porcentaje de calor disipado cuando la temperatura base es la máxima superficial medida (Tsmáx).	25 %	41 %
Temperatura del microprocesador promedio.	55.03°C	54.76°C

Fuente: Elaboración propia

*Nota: Los porcentajes de calor disipado se obtienen de dividir el calor disipado por el termosifón en Watts por el TDP y luego se multiplica por 100 para obtener el porcentaje. Ejemplo: el 36 % se obtiene de la siguiente manera $\frac{1.445W}{4W} = 0.36 * 100 = 36 \%$.

5.6. Discusión

Al realizar los cálculos de los flujos de calor máximo por parámetro viscoso y sónico se observó que el agua a la presión de 33.572 kPa obtuvo el mayor flujo con valores de $7.16 \times 10^{11} W/m^2$ y $9.32 \times 10^7 W/m^2$ respectivamente, siendo estos mayores que los flujos de calor máximo generados por el agua a una presión de 16.634 kPa. Esto se debe a que la entalpía de vaporización del agua a la presión de 33.572 kPa es menor que a la presión de 16.634 kPa, esto lo que indica es que se requiere una menor cantidad de energía para que una unidad de masa de agua pase por completo de estado líquido a estado gaseoso. Por otro lado, el refrigerante R134a fue descartado como fluido de trabajo porque sus flujos de calor máximo por parámetro viscoso y sónico fueron inferiores a los del agua a la misma presión de 33.572 kPa. Así mismo los flujos de calor máximos del agua a 33.572 kPa eran por mucho mayores que el flujo máximo de calor de la Raspberry, que es de $3.57 \times 10^4 W/m^2$. Era indispensable que los flujos de calor máximo por parámetro viscoso y sónico del fluido de trabajo fueran superiores al flujo máximo de calor de la Raspberry, para asegurar que este fluido fuera capaz de transferir al ambiente el calor generado por la microprocesador. Por este motivo se seleccionó el agua a una presión de 33.572 kPa como fluido de trabajo para el termosifón.

Las pruebas realizadas con el prototipo de termosifón fabricado mostraron que la temperatura promedio que alcanzó el microprocesador fue de 54.76°C y la temperatura promedio superficial máxima del termosifón fue de 50.54°C . Ambas temperaturas se encuentran dentro del rango operativo esperado de 30°C a 80°C . La temperatura ambiental se mantuvo constante a 23.95°C , lo que permitió que las pruebas se realizaran bajo las mismas condiciones y no se vieran afectadas por variaciones ambientales.

Los cálculos de resistencia térmica equivalente del termosifón para el caso de temperatura de base del termosifón igual a la temperatura promedio del microprocesador muestran que el prototipo fabricado, propuesta de diseño 3, tuvo una resistencia de 3.052 K/W . Esto se debe a que su elemento axial era el de menor tamaño, con un largo de 0.018 m y un diámetro de 0.00635 m . Por el contrario, el diseño de termosifón de Chicas tenía una resistencia más grande con un valor de 14.849 K/W . Esto se debe a que su elemento axial era más grande, con un largo de 0.02936 m y un diámetro de 0.0083 m . El diámetro del elemento axial es la variable de mayor relevancia en el cálculo de su resistencia. Al reducir el tamaño del elemento axial, se reduce la resistencia térmica del termosifón, lo que permite un mayor flujo de calor de entrada y salida.

En el caso donde la temperatura de la base es igual a la temperatura superficial máxima medida del termosifón, se obtuvo el valor de 3.054 K/W para la resistencia del prototipo de termosifón realizado. A diferencia del estudio realizado por Chicas que obtuvo un valor de 14.853 K/W , se observó que existe una diferencia del tamaño de la resistencia del termosifón entre ambos casos, siendo de 0.002 K/W para el prototipo realizado y de 0.004 K/W en el estudio de Chicas. Esta diferencia de tamaños se debe a que la resistencia del evaporador depende del calor de entrada que ingresa por la base del termosifón.

Se observó que la temperatura operativa promedio de la Raspberry Pi 3B del estudio de Chicas fue de 55.03°C y la temperatura promedio de la Raspberry Pi 3B+ usada en este estudio fue de 54.76°C . La temperatura operativa de ambos microprocesadores fue similar a pesar de que el microprocesador utilizado en este estudio contaba con una potencia de diseño térmico superior (7W) al usado por Chicas en su estudio (4W), lo que se traduce en que el microprocesador del presente estudio generaba más calor por lo cual se necesitaba un termosifón con una mayor disipación de calor. También se calculó el porcentaje de calor disipado de cada microprocesador para el caso donde la temperatura de la base del termosifón es igual a la temperatura del microprocesador. Se obtuvo que el termosifón de Chicas disipó el 36% de la potencia de diseño térmico y el prototipo de termosifón del presente estudio disipó el 48% de la potencia de diseño térmico. Para el caso donde la temperatura de la base del termosifón es igual a la temperatura máxima superficial medida se obtuvo que el termosifón de Chicas disipó el 25% del TDP y el prototipo de termosifón realizado disipó el 41% . Esto se debe a que el tamaño de la resistencia del termosifón del estudio de Chicas era de 14.849 K/W y 14.853 K/W y las resistencias térmicas del prototipo realizado eran de 3.052 K/W y de 3.054 K/W . Esta disminución en el tamaño de las resistencias térmicas permitió una mayor cantidad de calor disipado, mejorando así el diseño original en un 12% de calor disipado para el caso donde la temperatura de la base del termosifón era igual a la temperatura del microprocesador y 16% donde la temperatura de la base del termosifón es

igual a la temperatura máxima superficial medida.

- El agua a una presión de 33.572 kPa es un fluido de trabajo más eficiente para el termosifón que el agua a una presión de 16.634 kPa. Esto se debe a que el agua a la presión de 33.572 kPa tiene una entalpía de vaporización más baja que el agua a la presión de 16.634 kPa. Esto, a su vez, se traduce en flujos de calor máximo por parámetro viscoso y sónico más altos para el agua a 33.572 kPa.
- El valor de la resistencia térmica equivalente del termosifón fabricado fue de 3.052 K/W cuando la temperatura de la base del termosifón es igual a la temperatura del microprocesador y la resistencia térmica del termosifón fue de 3.054 K/W cuando la temperatura de la base del termosifón es igual a la temperatura superficial máxima medida. Por el contrario, el diseño de Chicas contaba una resistencia más grande cuando la temperatura de la base del termosifón es igual a la temperatura del microprocesador con valor de 14.849 K/W y 14.853 K/W cuando la temperatura de la base del termosifón es igual a la temperatura máxima medida. Esto se debe a que su elemento axial era de mayor tamaño.
- Los resultados de las pruebas con el prototipo de termosifón fabricado fueron satisfactorios. La temperatura promedio del microprocesador fue de 54.76°C, encontrándose así dentro del rango operativo esperado de 30°C a 80°C. Lo que indica que el diseño de termosifón fabricado disipa de manera eficiente el calor generado por el microprocesador, permitiendo que este no sufriera de sobrecalentamiento.
- El prototipo de termosifón fabricado obtuvo una mejora del 12 % de calor disipado respecto al diseño original de Chicas, esto para el caso donde la temperatura de la base del termosifón es igual a la temperatura del microprocesador y el prototipo fabricado obtuvo un 16 % de mejora respecto al diseño termosifón de Chicas, esto para el caso donde la temperatura de la base del termosifón es igual a la temperatura máxima superficial medida. Esta mejora se debe a la disminución en el tamaño de la resistencia térmica del termosifón.

Recomendaciones

- Realizar las pruebas en un ambiente controlado para tener igualdad de condiciones en todas, con el fin de evitar que el ambiente influya en las mediciones de transferencias de calor.
- Respetar los tiempos de inactividad del procesador entre pruebas para que no sufra sobrecalentamiento y dar igualdad de condiciones entre cada una.
- Aplicar cinta de aislar en los elementos de refrigeración para obtener resultados más precisos con la cámara termográfica al momento de las mediciones de cada prueba.
- No aplicar pasta térmica en exceso porque generaría un aumento en la resistencia térmica y afectaría negativamente la disipación de calor.
- Gestionar con tiempo la fabricación del elemento de refrigeración, ya que en la universidad no cuenta con disponibilidad inmediata de todos los materiales.
- Utilizar varillas de plata al 0 por ciento de cobre para soldar todas las piezas del termosifón.
- Disminuir el tamaño de la resistencia térmica representativa del termosifón para que se libere un porcentaje mayor de calor.

Ahumada, S. (4 de Enero de 2023). ¿QUÉ ES Y PARA QUÉ SE UTILIZA LA PASTA TÉRMICA? Obtenido de ACE: <https://www.acerstore.cl/news/notebook-gamer-que-es-y-para-que-se-utiliza-la-pasta-termica>

Anderson, D., Williams, T. A., & Sweeney, D. (2012). *Estadística para negocios y economía*. México D.F: Cengage Learning.

ASHRAE. (2017). *ASHRAE Handbook - Fundamentals*. Atlanta: American Society of Heating Refrigerating and Air Conditioning Engineers.

Castañeda, L. (2019). *Arquitectura de computadoras*. Lima, Perú: Universidad Nacional de educación.

Cengel, Y., & Boles, M. (2019). *Termodinámica*. Mexico : McGraw Hill.

Cengel, Y., & Ghajar, A. (2011). *Transferencia de calor y masa, Fundamentos y Aplicaciones*. México, D.F.: McGraw Hill.

Chicas Martínez, D. A. (2020). *Comparación de Termosifón y Disipador de Calor como Métodos de Refrigeración para un Procesador*. Guatemala: Universidad del Valle de Guatemala.

Engineering ToolBox. (2003). Air - Density, Specific Weight and Thermal Expansion Coefficient vs. Temperature and Pressure. Obtenido de The Engineering ToolBox: https://www.engineeringtoolbox.com/air-density-specific-weight-d_600.html

Engineering ToolBox. (2003). Air - Dynamic and Kinematic Viscosity. Obtenido de The Engineering ToolBox: https://www.engineeringtoolbox.com/air-absolute-kinematic-viscosity-d_601.html

Engineering ToolBox. (2004). Air - Specific Heat vs. Temperature at Constant Pressure. Obtenido de The Engineering ToolBox: https://www.engineeringtoolbox.com/air-specific-heat-capacity-d_705.html

Engineering ToolBox. (2009). Air - Thermal Conductivity vs. Temperature and Pressure. Obtenido de The Engineering ToolBox: https://www.engineeringtoolbox.com/air-properties-viscosity-conductivity-heat-capacity-d_1509.html

Graham. (3 de Noviembre de 2022). How to Stress Test Temperature on Raspberry Pi (Stressberry). Obtenido de Core Electronics: <https://core-electronics.com.au/guides/how-to-stress-test-temperature-on-raspberry-pi/>

informática, i. a. (2020). ¿Por que es el estrangulamiento térmico? Obtenido de in4: <https://www.in4.es/asistencia-informatica-granada/macbook-pro-apple-en-problemas-por-el-estrangulamiento-termico#:~:text=El%20estrangulamiento%20t%C3%A9rmico%20o%20Thermal,que%20las%20temperaturas%20bajen%20sea>

Intel. (2019). How to Apply Thermal Paste and How It Works. Obtenido de Intel: <https://www.intel.com/content/www/us/en/gaming/resources/how-to-apply-thermal-paste.html>

Kew, P., Reay, D., & McGlen, R. (2014). *Heat Pipes: Theory, Design and Applications*. Oxford: Butterworth Heinemann.

Llamas, L. (22 de enero de 2023). Medir temperatura con Arduino y sensor LM35. Obtenido de Luis Llamas Ingeniería, informática y diseño: <https://www.luisllamas.es/medir-temperatura-con-arduino-y-sensor-lm35/>

Manhattan. (2023). CPU Thermal Grease. Obtenido de Manhattan: <https://manhattanproducts.us/products/manhattan-en-cpu-thermal-grease-701662?variant=34735914942614>

MatWeb. (2009). Aluminum, AI. Obtenido de MatWeb Material Property Data: <https://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=0cd1edf33ac145ee93a0aa6fc666c0e0&ckck=1>

Ramezanizadeh, M., Nazari, M., Ahmadi, M., & Chau, K. (2019). *Experimental and numerical analysis of a nanofluidic thermosyphon heat exchanger*. En *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics* (págs. 13, 40-47).

Sundaram, S., & Bhaskaran, A. (2011). *Thermal Modeling of Thermosyphon Integrated Heat Sink for CPU Cooling*. *Scientific Research*, 7.

ToolBox, E. (2004). Water - Dynamic (Absolute) and Kinematic Viscosity vs. Temperature and Pressure. Obtenido de Engineering ToolBox: https://www.engineeringtoolbox.com/water-dynamic-kinematic-viscosity-d_596.html

Wordpress. (29 de septiembre de 2014). Microprocesadores, métodos de refrigeración. Obtenido de Wordpress: <https://daulis.wordpress.com/2014/09/29/metodos-refrigeracion-de-los-microprocesadores/>

9.1. Ecuaciones utilizadas

Ecuación 1. Calor máximo por parámetro sónico

$$\dot{q} = 0.474h_{fg} (\rho_g p_g)^{0.5} \quad (5)$$

Fuente: (Cengel & Boles, Termodinamica, 2019)

Para calcular el calor máximo para el parámetro de viscosidad fue utilizada la siguiente ecuación.

Ecuación 2. Calor máximo por el parámetro de viscosidad

$$\dot{q} = \frac{r_g h_{fg} \rho_g P_g}{16 \mu_g l_{eff}} \quad (6)$$

Fuente: (Kew, Reay, & McGlen, 2014)

Donde:

- h_{fg} es la entalpia de evaporación para la presión del termosifón (Cengel & Boles, Termodinamica, 2019).
- ρ_g es la densidad de vapor saturado a la presión interna del termosifón (Cengel & Boles, Termodinamica, 2019).
- P_g es la presión de vapor presión interna del termosifón.
- r_g es el radio del evaporador

- μ_g es la viscosidad dinámica de vapor a temperatura y presión de saturación (ToolBox, 2004).
- l_{eff} es la longitud efectiva del evaporador.

Ecuación 3. Tamaño de muestra

$$n = \frac{z_{\alpha}^2 \sigma^2}{E^2} \quad (7)$$

Fuente: (Anderson, Williams, & Sweeney, 2012)

Donde:

- n es el tamaño de muestra
- z es el nivel de confianza que se requiere para el muestreo
- E es el margen de error aceptable
- σ es la desviación estandar del comportamiento del fenómeno

Ecuación 4. Número de Nusselt

$$Nu = \frac{hL_c}{k} = C (Gr_L Pr)^n = C Ra_l^n \quad (8)$$

Fuente: (Cengel & Ghajar, Transferencia de calor y masa, Fundamentos y Aplicaciones, 2011)

Donde:

- Nu es el número de Nusselt
- h es el coeficiente de transferencia de calor por convección
- k es la conductividad térmica del fluido
- L_c es la longitud característica
- Ra_L es el número de Rayleigh
- Gr es el número de Grashof
- Pr es el número de Prandtl

Ecuación 5. Número de Prandtl

$$Pr = \frac{\text{Difusividad molecular de la cantidad de movimiento}}{\text{Difusividad molecular de calor}} = \frac{\mu c_p}{k} \quad (9)$$

Fuente: (Cengel & Ghajar, Transferencia de calor y masa, Fundamentos y Aplicaciones, 2011)

Donde:

- μ es la viscosidad dinámica
- c_p es el calor específico isobárico
- k es la conductividad térmica del fluido

Ecuación 6. Número de Grashof

$$Gr = \frac{g\beta\rho^2|T_s - T_\infty|L_c^3}{\mu^2} \quad (10)$$

Fuente: (Cengel & Ghajar, Transferencia de calor y masa, Fundamentos y Aplicaciones, 2011)

Donde:

- g es la aceleración gravitacional, m/s^2
- β es el coeficiente de expansión térmica
- T_s es la temperatura superficial del elemento de refrigeración, en °C.
- T_∞ es la temperatura ambiental, en °C
- ρ es la densidad del aire
- L_c es la longitud característica altura del disipador
- μ es la viscosidad dinámica

Ecuación 7. Número de Rayleigh

$$Ra = GrPr \quad (11)$$

Fuente: (Cengel & Ghajar, Transferencia de calor y masa, Fundamentos y Aplicaciones, 2011)

Ecuación 8.

$$10^{-1} < Ra < 10^9 \leftrightarrow Nu = 0.68 + \frac{0.67 \times Ra^{\frac{1}{4}}}{\left(1 + \left(\frac{0.492}{Pr}\right)^{\frac{9}{16}}\right)^{\frac{4}{9}}} \quad (12)$$

Fuente: (ASHRAE, 2017)

Ecuación 9.

$$10^9 < Ra < 10^{12} \leftrightarrow Nu = \left(0.825 + \frac{0.387 \times Ra^{\frac{1}{6}}}{\left(1 + \left(\frac{0.492}{Pr} \right)^{\frac{9}{16}} \right)^{\frac{8}{27}}} \right)^2 \quad (13)$$

Fuente: (ASHRAE, 2017)

Ecuación 10.

$$10^{-1} < Ra < 10^{12} \leftrightarrow Nu = \left(0.825 + \frac{0.387 \times Ra^{\frac{1}{6}}}{\left(1 + \left(\frac{0.437}{Pr} \right)^{\frac{9}{16}} \right)^{\frac{8}{27}}} \right)^2 \quad (14)$$

Fuente: (ASHRAE, 2017)

Ecuación 11. Constante m

$$m = 2 \frac{h}{kt} \quad (15)$$

Fuente: (Cengel & Ghajar, Transferencia de calor y masa, Fundamentos y Aplicaciones, 2011)

Ecuación 12. Longitud característica

$$L_c = L + \frac{t}{2} \quad (16)$$

Fuente: (Cengel & Ghajar, Transferencia de calor y masa, Fundamentos y Aplicaciones, 2011)

Donde L es la longitud de la aleta y t es el espesor de la aleta.

Ecuación 13. Área de aleta

$$A_{aleta} = 2wL_c \quad (17)$$

Fuente: (Cengel & Ghajar, Transferencia de calor y masa, Fundamentos y Aplicaciones, 2011)

Donde w es el ancho de la aleta y L_c es la longitud característica.

Ecuación 14. Área total de aleta

$$A_{tot \ aleta} = 7 \times A_{aleta} \quad (18)$$

Fuente: (Cengel & Ghajar, Transferencia de calor y masa, Fundamentos y Aplicaciones, 2011)

Ecuación 15. Eficiencia de la aleta

$$\eta = \frac{\tanh(mL_c)}{mL_c} \quad (19)$$

Fuente: (Cengel & Ghajar, Transferencia de calor y masa, Fundamentos y Aplicaciones, 2011)

Ecuación 16.

$$\dot{Q}_{aleta} = \frac{T_b - T_\infty}{R} = hA_{tot\ aleta}\eta_{aleta}(T_b - T_\infty) \quad (20)$$

Fuente: (Cengel & Ghajar, Transferencia de calor y masa, Fundamentos y Aplicaciones, 2011)

Ecuación 17. Resistencia del disipador del calor

$$R_{disipador} = \frac{1}{hA_{tot\ aleta}\eta_{aleta}} \quad (21)$$

Ecuación 18. Pasta térmica

$$R_{pasta} = \frac{L_{pasta}}{k_{pasta}A_{base}} \quad (22)$$

Fuente: (Chicas, 2020)

Donde:

- L_{pasta} es el largo de la pasta térmica (espesor de la capa aplicada)
- A_{base} es el área base (el área de contacto entre la pasta y el disipador)
- k_{pasta} es la conductividad térmica de la pasta

Ecuación 19. Calor disipado

$$\dot{Q}_{disipado} = \frac{T_{base} - T_\infty}{R_{disipador} + R_{pasta}} \quad (23)$$

Fuente: (Cengel & Ghajar, Transferencia de calor y masa, Fundamentos y Aplicaciones, 2011)

Ecuación 20. Calor de entrada

$$\dot{q}_{in} = \frac{\dot{Q}_{disipado}}{A_{base}} \quad (24)$$

Fuente: (Cengel & Ghajar, Transferencia de calor y masa, Fundamentos y Aplicaciones, 2011)

Ecuación 21. Calor de salida

$$\dot{q}_{out} = \frac{\dot{Q}_{disipado}}{A_{tot\ aleta}} \quad (25)$$

Fuente: (Cengel & Ghajar, Transferencia de calor y masa, Fundamentos y Aplicaciones, 2011)

Ecuación 22. Coeficiente de transferencia de calor del evaporador

$$h_{evap} = 0.32q_{in}^{0.4} \times \left\{ \frac{\rho_l^{0.65} K_l^{0.3} C_{pl}^{0.7} g^{0.2}}{\rho_g^{0.25} h_{fg}^{0.4} \mu_l^{0.1}} \right\} \times \left(\frac{P_{sat}}{P_{amb}} \right)^{0.3} \quad (26)$$

Fuente: (Sundaram & Bhaskaran, 2011)

Ecuación 23. Coeficiente de transferencia de calor del condensador

$$h_{cond} = 0.943 \left\{ \frac{\rho_l g K_l^3 (\rho_l - \rho_v) [h_{fg} + 0.68 C_{pl} (T_{sat} - T_w)]}{\mu_l L_{cond} (T_{sat} - T_w)} \right\}^{0.25} \quad (27)$$

Fuente: (Sundaram & Bhaskaran, 2011)

Ecuación 24. Resistencia del evaporar

$$R_{evap} = \frac{1}{h_{evap} \times A_{evap,int}} = \frac{1}{\pi D_{int} L_{evap}} \quad (28)$$

Fuente: (Sundaram & Bhaskaran, 2011)

Ecuación 25. Resistencia del condensador

$$R_{cond} = \frac{1}{h_{cond} \times A_{cond,int}} = \frac{1}{\pi D_{int} L_{cond}} \quad (29)$$

Fuente: (Sundaram & Bhaskaran, 2011)

Ecuación 26. Resistencia térmica del tubo de evaporador

$$R_{tubo,evap} = \frac{\ln\left(\frac{r_{ext}}{r_{int}}\right)}{2\pi K_{tubo} L_{evap}} \quad (30)$$

Fuente: (Sundaram & Bhaskaran, 2011)

Ecuación 27. Resistencia térmica del tubo de condensador

$$R_{tubo,cond} = \frac{\ln\left(\frac{r_{ext}}{r_{int}}\right)}{2\pi K_{tubo} L_{cond}} \quad (31)$$

Fuente: (Sundaram & Bhaskaran, 2011)

Ecuación 28. Resistencia axial

$$R_{axial} = \frac{0.5L_{evap} + L_{axial} + 0.5L_{cond}}{K_{tubo}A_{cs}} = \frac{0.5L_{evap} + L_{axial} + 0.5L_{cond}}{K_{tubo} \left(\frac{\pi}{4} \times (D_{ext}^2 - D_{int}^2) \right)} \quad (32)$$

Fuente: (Sundaram & Bhaskaran, 2011)

Ecuación 29. Resistencia térmica del termosifón

$$R_{termosifon} = R_{pasta} + R_{tubo,evap} + R_{evap} + R_{tubo,cond} + R_{cond} + \frac{1}{\frac{2}{R_{axial}}} \quad (33)$$

Fuente: (Sundaram & Bhaskaran, 2011)

Donde:

- ρ es la densidad
- g es la gravedad
- μ es la viscosidad dinámica
- K es el coeficiente de conductividad térmica
- A_{cs} es el área de sección transversal
- C_p es el calor específico
- h_{fg} es la entalpía de evaporación
- T_w es la temperatura de la pared del tubo
- L_{cond} es la longitud de tubería del condensador
- L_{evap} es la longitud de tubería del evaporador
- L_{axial} es la longitud de tubería que une el evaporador con el condensador

Nota: Las propiedades que cuentan con subíndice “ l ” son propiedades de agua líquida, y todas las que tienen subíndice “ g ” son propiedades de vapor de agua.

9.2. Plan de fabricación del termosifón

Materiales y equipo requerido para la fabricación del termosifón:

Cuadro 14: Materiales y equipo

Material	Equipo
4 codos de cobre 1/4"	Drill
2 varillas de plata al 0%	Broca de 1/8"
Tubo capilar de 1/8"	Soldadura oxiacetilénica
1 pie de tubería de 1/4"	Bomba de vacío con capacidad de generar más de 20 pulgadas de mercurio
Manguera de 1/8"	Vacuómetro
1 mililitro de agua	Cortador de tubo
Aceite mineral	Alicate
	Jeringa con aguja de 5 mililitros
	Cepillo de alambre
	Prensa de banco
	Lentes para soldadura oxiacetilénica
	Guantes para soldadura
	Mandil de cuero para soldadura
	Polainas de cuero
	Botas punta de acero
	1 racor de 1/8"
	Jeringa con aguja de 5 mililitros

1. El primer paso antes de realizar cualquier proceso es contar con todos los materiales y equipo necesarios para el termosifón.
2. Haga uso del drill, junto con la broca de 1/8 de pulgada, y realice un agujero en dos de los codos en la parte de las esquinas.
3. Tome el tubo de 1/4 de pulgada y corte 4 pedazos, con una longitud de 1 cm cada uno.
4. Tome el tubo capilar de 1/8 de pulgada y corte 2 pedazos, con una longitud de 6 cm.
5. Corte un tramo de 10 cm del tubo de 1/4 de pulgada.
6. Antes de realizar el proceso de soldadura, utilice su equipo de seguridad: lentes para soldadura oxiacetilénica, guantes de cuero, mandil del cuero, polainas de cuero y botas punta de acero.
7. Tome uno de los codos a los que le realizó los agujeros e introduzca el tramo de tubo capilar en el agujero de 1/8, para asegurarse que entra sin problema. Repita este mismo proceso con el otro codo.

8. Tome el tramo de tubo de 10 cm e introdúzcalo en uno de los codos que tengan el agujero en la esquina.
9. Haciendo uso de la prensa de banco, preñe una parte del tubo de 10 cm y asegúrese de que al momento de realizar la soldadura el codo no se moverá.
10. Encienda el soplete.
11. Regule el nivel de acetileno y de oxígeno hasta conseguir una flama corta y de color azul.
12. Introduzca el tubo capilar y asegúrese de que este no tope el fondo del codo, para evitar que se tape.
13. Para facilitar que se funda la varilla de plata, precaliente la superficie donde realizará la soldadura.
14. Aplique calor y sostenga con firmeza la varilla de plata en la zona que une el codo con el tubo capilar.
15. Apague el soplete.
16. Deje enfriar el codo para posteriormente retirar el tramo de tubo de 10 cm.
17. Revise que la soldadura haya quedado uniforme y que no haya agujeros entre el tubo capilar y el codo.
18. Repita los pasos del 8 al 17 para el otro codo que cuenta con un agujero.
19. Tome uno de los pedazos de tubo de 1 cm y utilícelo para unir los dos codos que cuentan con tubo capilar.
20. Introduzca el tramo de tubo de 10 cm en uno de los codos con tubo capilar.
21. Haciendo uso de la prensa de banco, preñe una parte del tubo de 10 cm para asegurarse de que al momento de realizar la soldadura el codo no se moverá.
22. Encienda el soplete y regule la flama hasta conseguir un color azul y una flama corta.
23. Precaliente la unión que ha realizado de los dos codos.
24. Con firmeza, tome la varilla de plata y con el soplete realice la soldadura.
25. Una vez haya terminado la soldadura entre los dos codos, apague el soplete y deje enfriar los codos.
26. Una vez fríos, revise que la soldadura sea uniforme y que no haya agujeros.
27. Revise que ninguno de los dos tubos capilares haya quedado tapado.
28. Tome otro tramo de tubo de 1 cm y una los dos codos faltantes entre ellos.
29. Tome los dos tramos restantes de tubo de 1 cm e introdúzcalos en los agujeros de los codos.
30. Una todos los codos para formar un cuadrado.

31. Haciendo uso de la presa de banco, sostenga los tubos capilares para evitar movimientos al momento de realizar la soldadura.
32. Encienda el soplete y regule la flama hasta conseguir un color azul y una flama corta.
33. Precaliente la superficie para realizar la soldadura.
34. Con firmeza, tome la varilla de plata y con el soplete realice la soldadura de todos los codos restantes. Recuerde siempre realizar pequeñas pausas para evitar fundir alguno de los codos.
35. Deje enfriar el termosifón.
36. Una vez frío el termosifón, asegúrese de que la soldadura sea uniforme y no haya agujeros.
37. Utilice el cepillo de alambre para remover residuos que haya dejado el proceso de soldadura.
38. Haciendo uso de una jeringa con aguja, succione 1 mililitro de agua.
39. Cuidadosamente, introduzca en uno de los tubos capilares la aguja, y de manera lenta, vaya introduciendo el mililitro de agua.
40. Con un alicate, cierre uno de los tubos capilares. Asegúrese de que el sello será realizado en la parte baja del tubo capilar.
41. Corte el tubo capilar con la herramienta para cortar tubos.
42. Utilice la prensa de banco para sellar completamente el tubo capilar.
43. Ponga la bomba de vacío en alto sobre una superficie plana.
44. Asegúrese de que la bomba cuente con un vacuómetro o manómetro que esté en pulgadas de mercurio.
45. En la línea de vacío conecte el racor de 1/8 de pulgada.
46. Tome la manguera de 1/8" y conecte uno de sus extremos al racor y el otro al tubo capilar que aún está abierto.
47. Antes de conectar la bomba a la corriente, asegúrese de que esta cuenta con aceite, de lo contrario esto podría dañarla.
48. Conecte la bomba a la corriente.
49. Oprima el interruptor para que se encienda la bomba.
50. Vea el vacuómetro y cerciórese de que la presión de vacío alcance las 20 pulgadas de mercurio.
51. Sin apagar la bomba de vacío, utilice el alicate para sellar el tubo capilar. Selle en dos puntos del tubo.
52. Apague la bomba y retire la manguera.

53. Con la herramienta para cortar tubos, corte el excedente de tubo capilar.
54. Utilice la prensa de banco para sellar por completo el tubo capilar.
55. Para asegurarse de que no existan posibles pérdidas de presión. Aplique un punto de soldadura a los extremos sellados del tubo capilar.

9.3. Proceso para instalar los softwares

1. Descargar Raspberry Pi OS e instalarlo.
2. Hacer clic en seleccionar sistema operativo (figura 36).

Figura 26: Selección de sistema operativo



Fuente: Elaboración propia

3. Insertar una SD card en la computadora para escribir en ella el Software de Raspberry.
4. Seleccionar el sistema operativo Raspberry Pi (32 bits).
5. Hacer clic en seleccionar almacenamiento y seleccionar la tarjeta SD que se ingresó en el paso 3.
6. Seleccionar el botón de configuración (tiene forma de un engranaje).
7. Completar las siguientes opciones de configuración.
 - a) Establecer nombre del anfitrión: ingrese "raspberrypi".
 - b) Habilitar SSH: permitir que se realicen conexiones SSH.
 - c) Usar autenticación de contraseña/clave publica: método de inicio de sesión a través de SSH.
 - d) Establecer nombre y contraseña: elegir un nombre de usuario y una contraseña para usar el Raspberry.
 - e) Configurar la LAN inalámbrica: Configurar el SSID y la contraseña del WIFI.

- f) Configurar el país de LAN inalámbrica: Si se configuró el WIFI, debe configurar esto.
 - g) Establecer la configuración de región: Configurar el diseño del teclado y la zona horaria. (Graham, 2022)
8. Hacer clic en escribir para que el código se escriba en la SD card.
 9. Cuando se haya completado el paso anterior, retirar la SD card de la computadora e insertarla en su Raspberry (Figura 37).

Figura 27: Ranura para SD card del Raspberry



Fuente: **diaz_todo_2019**

10. Para comunicarse con el Raspberry se debe conectar un cable ethernet a la computadora y al Raspberry.
11. Descargar e instalar el Software PuTTY para configurar la conexión por medio de ethernet.
12. Abrir PuTTY en la computadora.
13. En PuTTY se debe ingresar el Host Name (o el IP address), que se asignó al configurar el Raspberry. Si no se cambió el Host Name, se debe ingresar el que Raspberry da por defecto: IP: raspberrypi. local, en el puerto 22.
14. La conexión debe ser de tipo SSH y Default Settings; guardar y oprimir open.
15. En la pantalla aparecerá lo siguiente:

Figura 28: Login de PuTTY

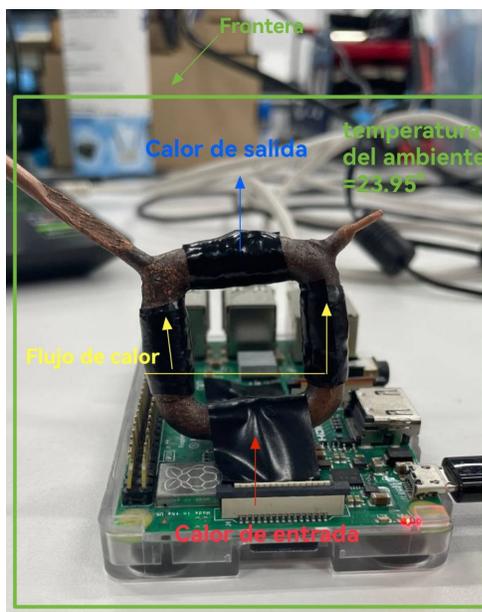


Fuente: **diaz_todo_2019**

16. Se debe ingresar el nombre de usuario y la contraseña que fueron asignados cuando se configuró Raspberry Pi OS.
17. Descargar e instalar VNC Viewer.

9.4. Cálculos preliminares de las resistencias térmicas de los diseños de termosifón

Figura 29: Sistema de termosifón analizado



Fuente: Elaboración propia

Para llevar a cabo los cálculos se asumió lo siguiente:

- Temperatura de la pared del tubo del evaporador = 41.91°C
- Temperatura promedio del microprocesador = 55.03°C
- Temperatura promedio superficial máxima = 45.77°C

Cuadro 15: Posibles valores de resistencia equivalentes de propuestas de termosifón: Para caso de temperatura de la base del termosifón igual a la temperatura del microprocesador

Propuesta de diseño	1	2	3	4
Resistencia del evaporador K/W	0.0226	0.0280	0.0298	0.0326
Resistencia del condensador K/W	0.2879	0.2879	0.5842	0.5842
Resistencia del tubo del evaporador K/W	0.00067	0.00131	0.00513	0.00996
Resistencia del tubo del condensador K/W	0.00067	0.00131	0.00513	0.00996
Resistencia axial K/W	39.179	76.065	4.864	9.443
Resistencia de pasta térmica K/W	5.861	5.861	6.168	6.168
Resistencia térmica equivalente del termosifón K/W	19.901	38.351	3.056	5.358

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 16: Posibles valores de resistencia equivalentes de propuestas de termosifón: Para el caso de temperatura de la base del termosifón igual a la temperatura superficial máxima

Propuesta de diseño	1	2	3	4
Resistencia de evaporador K/W	0.0260	0.0323	0.0343	0.0375
Resistencia de condensador K/W	0.2879	0.2879	0.5842	0.5842
Resistencia del tubo del evaporador K/W	0.00067	0.00131	0.00513	0.00996
Resistencia del tubo del condensador K/W	0.00067	0.00131	0.00513	0.00996
Resistencia axial K/W	39.179	76.065	4.864	9.443
Resistencia de pasta térmica K/W	5.861	5.861	6.168	6.168
Resistencia térmica equivalente del termosifón K/W	19.905	38.355	3.061	5.363

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 17: Resultados de análisis térmico: Para caso de temperatura de la base del termosifón igual a la temperatura del microprocesador

Propuesta de diseño	1	2	3	4
Calor disipado en Watts	1.206	0.703	3.369	2.696
Flujo de calor de entrada W/m^2	13647.071	7952.205	40110.632	32099.764
Flujo de calor de salida W/m^2	145.122	84.563	726.180	581.147
Porcentaje de calor disipado del TDP (7 W)	17 %	10 %	48 %*	39 %

Fuente: Elaboración propia

*Nota: Los porcentajes de calor disipado se obtienen de dividir el calor disipado por el termo-

sifón en Watts por el TDP y luego se multiplica por 100 para obtener es porcentaje. Ejemplo: el 48 % se obtiene de la siguiente manera $\frac{3.369W}{7W} = 0.48 * 100 = 48 \%$.

Cuadro 18: Resultados de análisis térmico: Para el caso de temperatura de la base del termosifón igual a la temperatura superficial máxima

Propuesta de diseño	1	2	3	4
Calor disipado en Watts	0.847	0.493	2.364	1.892
Flujo de calor de entrada W/m^2	9579.775	5582.381	28146.207	22526.252
Flujo de calor de salida W/m^2	101.870	59.363	509.570	407.824
Porcentaje de calor disipado del TDP (7 W)	12 %	7 %	34 %*	27 %

Fuente: Elaboración propia

*Nota: Los porcentajes de calor disipado se obtienen de dividir el calor disipado por el termosifón en Watts por el TDP y luego se multiplica por 100 para obtener es porcentaje. Ejemplo: el 41 % se obtiene de la siguiente manera $\frac{2.364W}{7W} = 0.34 * 100 = 34 \%$.

