



UNL

Universidad
Nacional
de Loja

Universidad Nacional de Loja

Facultad de la Energía, las Industrias y los Recursos

Naturales no Renovables

Carrera de Ingeniería Electromecánica

**ANÁLISIS DE UN SISTEMA DE DISIPADORES DE CALOR PARA LA
REFRIGERACIÓN TÉRMICA EN MÓDULOS DE BATERÍAS DE ION-
LITIO TIPO 18650.**

**Trabajo de Integración Curricular,
previo a la obtención del título de
Ingeniero Electromecánico.**

AUTOR:

Jorge Alexander Rivera Yaguana

DIRECTOR:

Ing. Darwin Giovanni Tapia Peralta, Mg. Sc.

Loja – Ecuador

2024

Certificación

Loja, 25 de octubre de 2024

Ing. Darwin Giovanni Tapia Peralta, Mg. Sc.

DIRECTOR DE TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

CERTIFICO:

Que he revisado y orientado todo proceso de la elaboración del Trabajo de Integración Curricular denominado: **ANÁLISIS DE UN SISTEMA DE DISIPADORES DE CALOR PARA LA REFRIGERACIÓN TÉRMICA EN MÓDULOS DE BATERÍAS DE ION-LITIO TIPO 18650**, de autoría del estudiante **Jorge Alexander Rivera Yaguana**, con **cédula de identidad Nro. 1150025839**, previa a la obtención del título de **Ingeniero Electromecánico**, una vez que el trabajo cumple con todos los requisitos exigidos por la Universidad Nacional de Loja para el efecto, autorizo la presentación para la respectiva sustentación y defensa.

Darwin Giovanni Tapia Peralta

DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Autoría

Yo, **Jorge Alexander Rivera Yaguana**, declaro ser autor del presente trabajo de integración curricular y eximo expresamente a la Universidad Nacional de Loja y a sus representantes jurídicos de posibles reclamos y acciones legales, por el contenido del mismo. Adicionalmente, acepto y autorizo a la Universidad Nacional de Loja, la publicación de mí Trabajo de Integración Curricular en el Repositorio Digital Institucional – Biblioteca Virtual.

Firma:



Cédula de Identidad: 1150025839

Fecha: 16 de septiembre de 2024

Correo electrónico: jorge.a.rivera@unl.edu.ec

Teléfono: 0969052918

Carta de Autorización por parte del autor, para consulta, reproducción parcial o total y/o publicación electrónica del texto competo, del trabajado de integración curricular.

Yo, **Jorge Alexander Rivera Yaguana**, declaro ser autor del Trabajo de Integración Curricular denominado: **ANÁLISIS DE UN SISTEMA DE DISIPADORES DE CALOR PARA LA REFRIGERACIÓN TÉRMICA EN MÓDULOS DE BATERÍAS DE ION-LITIO TIPO 18650**, como requisito para optar el título de **Ingeniero Electromecánico**; autorizo al sistema Bibliotecario de la Universidad Nacional de Loja para que con fines académicos, muestre la producción intelectual de la Universidad, a través de la visibilidad de su contenido de la siguiente manera en el Repositorio Institucional.

Los usuarios pueden consultar el contenido de este trabajo en el Repositorio Institucional, en las redes de información del país y del exterior con las cuales tenga convenio la Universidad.

La Universidad Nacional de Loja, no se responsabiliza por el plagio o copia del trabajo de integración curricular que realice un tercero.

Para constancia de esta autorización, suscribo, en la ciudad de Loja, a los dieciséis días del mes de septiembre del dos mil veinticuatro.

Firma:



Autor: Jorge Alexander Rivera Yaguana

Cédula: 1150025839

Dirección: Clodoveo Jaramillo

Correo electrónico: jorge.a.rivera@unl.edu.ec

Teléfono: 0969052918

DATOS COPLEMENTARIOS:

Director del trabajo de integración curricular: Ing. Darwin Giovanni Tapia Peralta, Mg. Sc

Dedicatoria

A mis padres, Sebastián y Elizabeth, cuyo amor incondicional y apoyo constante han sido mi mayor inspiración. A mi hermano Jordan, quien ha compartido este viaje conmigo, brindando ánimo, paciencia y risas en los momentos difíciles. Gracias por ser mi fuente de fortaleza y por creer en mí. A todos aquellos que han contribuido de alguna manera a este proyecto, gracias por su valioso aporte.

Jorge Alexander Rivera Yaguana

Agradecimientos

Quisiera expresar mi sincero agradecimiento a todas las personas que contribuyeron de manera significativa a la realización de este trabajo de tesis. En primer lugar, quiero agradecer a mi asesor, Ing. Darwin Giovanni Tapia Peralta, Mg. Sc, por su orientación experta, paciencia y apoyo continuo a lo largo de este proceso. Sus conocimientos y dedicación han sido fundamentales para el desarrollo de este trabajo. A la Universidad Nacional de Loja, de la carrera de Ingeniera Electromecánica y toda su planta de docentes por la oportunidad de aprender de su experiencia. Agradezco profundamente a mis padres, Sebastián y Elisabeth, por su amor incondicional y por ser una fuente constante de inspiración. Su apoyo inquebrantable ha sido mi mayor motivación y fortaleza.

Jorge Alexander Rivera Yaguana

Índice de Contenidos

Portada.....	i
Certificación	ii
Autoría	iii
Carta de Autorización.	iv
Dedicatoria.....	v
Agradecimientos.....	vi
Índice de Contenidos.....	vii
Índice de tablas.....	x
Índice de figuras.....	xi
Índice de anexos	xiv
Simbología	xv
1 Título	1
2 Resumen.....	2
Abstract.....	3
3 Introducción	4
4 Marco Teórico	6
4.1. Capítulo I: Conceptos y características sobre baterías.	6
4.1.1 Baterías de ion-litio.....	6
4.1.2 Terminología utilizada en las baterías.	7
4.1.3 Módulo de baterías de Ion-litio.....	10
4.1.4 Efecto de la temperatura sobre las baterías de ion litio.	11
4.1.5 Fuga térmica – Thermal Runaway	11
4.1.6 Métodos de refrigeración de módulos de baterías de litio.	12
4.2. Capítulo II: Conceptos teóricos sobre transferencia de calor	13
4.2.1 Fundamentos básicos de termodinámica.	13

4.2.2	Balance energético en módulos de baterías de litio.	15
4.2.3	Proceso de Transferencia de Calor	16
4.2.4	Tipos de transferencia de calor.	17
4.2.5	Transferencia de calor por conducción unidimensional.	19
4.2.6	Transferencia de calor en estado estacionario.	19
4.2.7	Transferencia de calor transitorio.	19
4.2.8	Disipadores de calor tipo aletas.	19
4.2.9	Superficies extendidas.	20
4.2.10	Resistencias térmicas.	24
4.2.11	Rendimiento efectividad y flujo de calor.	25
4.3.	Capítulo III: Simulación computacional	27
4.3.1	Método de elementos finitos.	27
4.3.2	Método de volúmenes finitos (FVM)	28
4.3.3	Modelo computacional usando elementos finitos.....	29
4.3.4	SolidWorks Simulation.....	30
5	Metodología	31
5.1.	Área de estudio.....	31
5.2.	Equipos y materiales.....	31
5.3.	Procedimiento.....	32
5.3.1	Actividades para llevar a cabo el primer objetivo: Deducir el sistema geométrico de disipadores de calor aplicado al módulo de baterías de litio.	32
5.3.2	Actividades para llevar a cabo el segundo objetivo: Diseñar térmicamente la configuración geométrica de los disipadores de calor tipo aleta en la refrigeración de un módulo de baterías de ion-litio.....	34
5.3.3	Actividades para llevar a cabo el tercer objetivo: Simular térmicamente el modelo geométrico propuesto de disipadores de calor aplicados a la refrigeración de módulos de baterías de ion-litio.....	36
6	Resultados.....	41

6.1. Proceso y análisis de datos Objetivo 1: Deducir el sistema geométrico de disipadores de calor aplicado al módulo de baterías de ion-litio.	41
6.1.1 Determinación de la celda a estudio	42
6.1.2 Disipación de calor del sistema.....	46
6.1.3 Geometría de celda	47
6.1.4 Disposición de las celdas	47
6.2. Objetivo 2: Diseñar térmicamente la configuración geométrica de los disipadores de calor tipo aleta en la refrigeración de un módulo de baterías de litio.....	51
6.2.1 Configuración de aleta.	51
6.2.2 Ecuación del proceso de transferencia de calor.	67
6.2.3 Cálculo de error con respecto a valores obtenidos mediante simulación régimen estacionario.	75
6.3. Procesamiento y Análisis de Datos Tercer objetivo: simular térmicamente el modelo geométrico propuesto de disipadores de calor aplicados a la refrigeración de módulos de baterías de ion-litio.	77
6.3.1 Cálculo de temperatura alcanzada régimen transitorio.	82
6.3.2 Cálculo de error respecto a valores obtenidos mediante simulación régimen transitorio.	84
6.3.3 Calidad de malla y evaluación de malla.	84
7 Discusión de Resultados	87
8 Conclusiones	91
9 Recomendaciones	94
10 Bibliografía	95
11 Anexos	98

Índice de tablas

Tabla 1. Requisitos de diseño para un sistema de refrigeración.	11
Tabla 2. Ecuaciones para el cálculo de distribución de temperatura y la tasa de transferencia de calor para aletas de sección transversal constante.	23
Tabla 3. Materiales y equipos utilizados en la investigación.	32
Tabla 4. Caracterización de las baterías ion-litio tipo 18650.	41
Tabla 5. Características de celda ICR 18650-22P.	42
Tabla 6. Especificaciones térmicas de la celda a estudio.	44
Tabla 7. Revisión bibliográfica refrigeración al módulo de baterías mediante aletas.	44
Tabla 8. Comparación geométrica para flujo de calor.	45
Tabla 9. Propiedades termo físicas de aire seco 20 °C, presión atmosférica.	46
Tabla 10. Propiedades termo físicas de aluminio.	48
Tabla 11. Valores de coeficiente de convección hc.	50
Tabla 12. Temperaturas de la base del módulo contenedor de baterías de aletas cuadradas y anulares, al variar parámetros geométricos.	66
Tabla 13. Características de mallas utilizadas en simulación.	81
Tabla 14. Características de simulación.	85
Tabla 15. Resultados obtenidos mediante el software SolidWorks®.	100

Índice de figuras

Figura 1. Proceso de carga y descarga baterías ion-litio.....	6
Figura 2. Densidad de energía gravimétrica y volumétrica de diferentes tipos de tecnología de baterías recargables.	7
Figura 3. Curva característica de descarga	9
Figura 4. Sistema de empaquetamiento de baterías.....	10
Figura 5. Flujo de calor en dirección a temperatura decreciente	14
Figura 6. Transferencia de calor unidimensional.....	19
Figura 7. Diagramas de diferentes tipos de aletas	21
Figura 8. Diagrama esquemático de una aleta-recta que sobresale de una pared.	21
Figura 9. Arreglos de aletas que representan un rendimiento global.....	26
Figura 10. Esquema de nodos y malla – Volúmenes finitos.	28
Figura 11. Variación de número de elementos finitos.....	30
Figura 12. Ubicación de área de estudio.....	31
Figura 13. Proceso para la realización del primer objetivo.	33
Figura 14. Proceso para la realización del segundo objetivo.....	35
Figura 15. Proceso para la realización del tercer objetivo.....	37
Figura 16. Dimensiones de la batería a objeto de estudio.	47
Figura 17. Arreglos para banco de celdas (a) Alineado, (b) escalonado.....	47
Figura 18. Módulo circular de baterías con base aluminio 1060.....	49
Figura 19. Módulo cuadrado de baterías con base de aluminio 1060.....	49
Figura 20. Resultados simulación térmica - Módulo circular de baterías base de aluminio 1060.	50

Figura 21. Resultados simulación térmica - Módulo cuadrado de baterías base de aluminio 1060.	51
Figura 22. Módulo circular de aluminio 1060 – e = 1.5 mm.	52
Figura 23. Módulo circular de aluminio 1060 – e = 2.5 mm.	52
Figura 24. Módulo circular de aluminio 1060 – e = 3.5 mm.	53
Figura 25. Módulo cuadrado de aluminio 1060– e = 1.5 mm.	53
Figura 26. Módulo cuadrado de aluminio 1060 – e = 2.5 mm.	53
Figura 27. Módulo cuadrado de aluminio 1060 – e = 3.5 mm.	54
Figura 28. Gráfico Temperatura vs Espesor – Aleta Anular.	54
Figura 29. Gráfico Temperatura vs Espesor – Aleta Cuadrada.	55
Figura 30. Módulo circular de aluminio 1060 – d = 3 mm.	56
Figura 31. Módulo circular de aluminio 1060 – d = 5 mm.	56
Figura 32. Módulo circular de aluminio 1060 – d = 7 mm.	56
Figura 33. Módulo cuadrado de aluminio 1060 – d = 3 mm.	57
Figura 34. Módulo cuadrado de aluminio 1060 – d = 5 mm.	57
Figura 35. Módulo cuadrado de aluminio 1060 – d = 7 mm.	57
Figura 36. Gráfico Temperatura vs distanciamiento entre aletas – Aleta anular.	58
Figura 37. Gráfico Temperatura vs distanciamiento entre aletas – Aleta cuadrada.	58
Figura 38. Módulo circular de aluminio 1060 – L = 25 mm.	59
Figura 39. Módulo circular de aluminio 1060 – L = 35 mm.	59
Figura 40. Módulo circular de aluminio 1060 – L = 45 mm.	60
Figura 41. Módulo cuadrado de aluminio 1060 – L = 25 mm.	60
Figura 42. Módulo cuadrado de aluminio 1060 – L = 35 mm.	60

Figura 43. Módulo cuadrado de aluminio 1060 – L = 45 mm.	61
Figura 44. Gráfico Temperatura vs longitud de aleta – Aleta anular.	61
Figura 45. Gráfico Temperatura vs longitud de aleta – Aleta cuadrada.	62
Figura 46. Módulo circular de aluminio 1060– N = 7 aletas.	62
Figura 47. Módulo circular de aluminio 1060 – N = 10 aletas.	63
Figura 48. Módulo circular de aluminio 1060– N = 13 aletas.	63
Figura 49. Módulo cuadrado de aluminio 1060– N = 7 aletas.	63
Figura 50. Módulo cuadrado de aluminio 1060– N = 10 aletas.	64
Figura 51. Módulo cuadrado de aluminio 1060– N = 13 aletas.	64
Figura 52. Gráfico Temperatura vs número de aletas – Aleta anular.	65
Figura 53. Gráfico Temperatura vs número de aletas – Aleta cuadrada.	65
Figura 54. Módulo de baterías con aletas circulares L = 35 mm.	68
Figura 55. Superficies de módulo con aleta y sin aleta.	70
Figura 56. Resultados SolidWorks® simulation – Geometría del módulo con aletas anulares... 76	76
Figura 57. Módulo de baterías con aletas circulares L = 35 mm.	77
Figura 58. Malla de elementos finitos tipo triangular.	78
Figura 59. Cargas térmicas asignadas - SolidWorks® Thermal Simulation.	79
Figura 60. Temperatura base del módulo vs Tipo de Malla Utilizada.	82
Figura 61. Resultados evaluación cociente jacobiano.	85
Figura 62. Simulación de módulo refrigerado por convección.	90

Índice de anexos

Anexo 1. Flujograma de proceso iterativo.....	98
Anexo 2. Propiedades termo-físicas del aire seco a presión atmosférica.	99
Anexo 3. Resultados de simulación al trabajar con los distintos tipos de malla mencionados. .	100
Anexo 4. Módulo de baterías propuesto.	103
Anexo 5. Costos asociados al material utilizado.	104
Anexo 6. Costos asociados al proceso de fabricación del arrelgo.	105
Anexo 7. Certificado de traducción del resumen.....	106

Simbología

C_{bat} : capacidad calorífica de la celda.

CC : carga con corrinete constante.

CV : carga con un voltaje constante.

ΔE : Cambio de contenido energetico.

Q_{gen} : corresponde al calor generado por las celdas.

Q_{dis} : calor disipado al actuar el sistema de refrigeración.

Q_{con} : Calor transferido al interior de las celdas mediante conducción.

\overline{Nu}_L : Número de Nusselt.

Re_L : Número de Reynolds.

Pr : Número de Prandtl.

h : Coeficiente de convección.

$R_{Conducción}$: Resistencia térmica conductiva

$R_{Convección}$: Resistencia térmica convectiva

$k_{Aluminio}$: Conductividad térmica del aluminio

v_m : Velocidad media del fluido

$\mu_{Dinámica}$: Viscosidad dinámica

μ_{Cine} : Viscosidad cinemática

ρ : Densidad del fluido

d : Diámetro del módulo

A_t : Área total de las aletas

A_b : Área de la base de la aleta

A_s : Área transversal de la aleta

η_f : *Eficiencia de una aleta*

η_0 : *Eficiencia de arreglo de aleta*

1 Título

**ANÁLISIS DE UN SISTEMA DE DISIPADORES DE CALOR PARA LA
REFRIGERACIÓN TÉRMICA EN MÓDULOS DE BATERÍAS DE ION-LITIO TIPO
18650.**

2 Resumen

La temperatura es crucial para el desempeño y la seguridad de las baterías de ion-litio, fundamentales en aplicaciones que van desde dispositivos portátiles hasta vehículos eléctricos debido a su alta densidad energética y larga vida útil. Sin embargo, el sobrecalentamiento durante la carga y descarga puede reducir su vida útil, degradar su rendimiento e incluso causar incendios o explosiones. El presente documento detalla el procedimiento utilizado para evaluar la geometría y el comportamiento térmico de un módulo de baterías de ion-litio refrigerado por aletas. Se enfoca en mitigar riesgos al determinar el calor generado y la temperatura máxima admisible para evitar accidentes. Utilizando simulaciones numéricas en SolidWorks® Thermal Simulation, se varían características clave del módulo, como el espesor, la longitud, el espaciamiento y número de aletas, validando luego los resultados con cálculos analíticos. Se encontró que un módulo circular de aluminio con 13 aletas anulares de 35 mm de longitud y 1.5 mm de espesor alcanza una temperatura de base de 32.9 °C con un flujo de calor de 56 W en régimen estacionario, por otra parte, al evaluar nuevamente para un tiempo de 776 segundos para el régimen transitorio se encuentra una temperatura de 29.51°C. Este estudio proporciona directrices cruciales para el diseño eficiente de sistemas de refrigeración, asegurando la operación segura de las baterías dentro de límites térmicos seguros.

Palabras Clave: módulo de baterías, SolidWorks Thermal Simulation, transferencia de calor.

Abstract

Temperature is crucial to the performance and safety of lithium-ion batteries, which are critical in applications ranging from portable devices to electric vehicles due to their high energy density and long life. However, overheating during charging and discharging can reduce their lifetime, degrade their performance and even cause fires or explosions. This paper details the procedure used to evaluate the geometry and thermal behavior of a fin-cooled lithium-ion battery module. It focuses on mitigating risks by determining the heat generated and the maximum allowable temperature to avoid accidents. Using numerical simulations in SolidWorks® Thermal Simulation, key module characteristics such as thickness, length, spacing and number of fins are varied, and the results are then validated with analytical calculations. It was found that a circular aluminum module with 13 annular fins of 35 mm length and 1.5 mm thickness reaches a base temperature of 32.9 °C with a heat flux of 56 W in stationary regime, on the other hand, when re-evaluated for a time of 776 seconds for the transient regime a temperature of 29.51°C is found. This study provides crucial guidelines for the efficient design of cooling systems, ensuring the safe operation of batteries within safe thermal limits.

Keywords: Battery module, SolidWorks Thermal Simulation, heat transfer.

3 Introducción

En la actualidad las baterías de ion-litio son consideradas como uno de los dispositivos ideales para el almacenamiento de energía, y esto se debe a las ventajosas características que posee, como su alta densidad de potencia, su larga vida útil y su moderada tasa de descarga. Sin embargo, la temperatura de las baterías varía dependiendo a su uso, afectando las propiedades de la misma. Si las baterías sobrepasan ciertos límites de temperatura, como consecuencia se tiene que la degradación aumenta, acortando su vida útil y su capacidad de almacenamiento, imponiendo riesgos extremadamente altos por explosiones, en ese sentido, resulta necesario un sistema de control térmico, el cual permita mantener la temperatura de las baterías dentro de límites apropiados y seguros.

Gallardo (2017) menciona que, dado que las baterías eléctricas forman parte íntegra en la industria y desarrollo tecnológico, la investigación abre cabida a la seguridad y buen rendimiento. Como preocupación primordial, la correcta refrigeración busca implementar sistemas que mantengan las baterías dentro de rangos de temperatura aceptables, la importancia en aplicaciones críticas como vehículos eléctricos y sistemas de almacenamiento de energía, que en la actualidad está en auge, incitando a aumentar sistemas cada vez con mayor eficiencia económica, fiable y segura.

La investigación impulsa al desarrollo tecnológico y da nuevas perspectivas en lo que se refiere a la refrigeración de baterías de ion de litio, aumentando rendimientos y dando más usos en sus dispositivos, la búsqueda de sistemas de refrigeración efectivos brinda: seguridad, rendimiento, durabilidad, aplicaciones críticas, eficiencia energética, adaptabilidad e impacto ambiental.

Las complicaciones en el uso práctico de las baterías como el desbordamiento térmico, ha llevado a que se realicen varios tipos de métodos de refrigeración en los sistemas de gestión

térmica, tanto en aplicaciones comerciales como de investigación, en ese aspecto, una de las técnicas o métodos que se hablará en la mayor parte de este trabajo de titulación es el enfriamiento por aire natural, es así que, se planea que los sistemas enfriados por aire tienen una mayor eficiencia en cuanto a su construcción de diseño seguro y bajo costo, al existir distintas configuraciones de enfriamiento por aire natural, se investigará la mejor configuración tipo aleta mediante modelos matemáticos y simulaciones en softwares técnicos como Solidworks® Thermal Simulation, logrando una distribución uniforme de la temperatura aplicada al módulo de batería (Kummitha, 2023).

El objetivo general que ha guiado la presente investigación es “Analizar la influencia de los disipadores de calor tipo aletas en la temperatura base del módulo de baterías de ion-Litio”.

Los objetivos específicos son los siguientes:

- Deducir el sistema geométrico de disipadores de calor aplicado al módulo de baterías de ion-litio.
- Diseñar térmicamente la configuración geométrica de los disipadores de calor tipo aleta en la refrigeración de un módulo de baterías de ion-litio.
- Simular térmicamente el modelo geométrico propuesto de disipadores de calor aplicados a la refrigeración de módulos de baterías de ion-litio.

Con la ejecución de este proyecto se busca realizar una correcta gestión térmica en las baterías de iones de litio mediante disipadores de calor tipo aleta, en la actualidad las baterías al estar sometidas a procesos de carga y descarga liberan energía térmica provocando un mal funcionamiento de la misma, la investigación propone dar validación mediante datos analíticos y simulaciones en el software SolidWorks® Thermal Simulation, al interactuar directamente con las celdas y el módulo.

4 Marco Teórico

4.1. Capítulo I: Conceptos y características sobre baterías.

4.1.1 Baterías de ion-litio.

Se conoce que las reacciones químicas pueden producir distintos tipos de energía, los sistemas capaces de almacenar energía eléctrica en forma de energía química se denominan celdas electroquímicas o baterías. La estructura básica de una celda electroquímica consta de dos electrodos metálicos colocados en una solución conductora que generalmente se denomina electrolito, a la cual se añade un elemento separador como se muestra en la **Figura 1**: el electrodo positivo se denomina cátodo, y el electrodo negativo se denomina ánodo (Hamel, 2011).

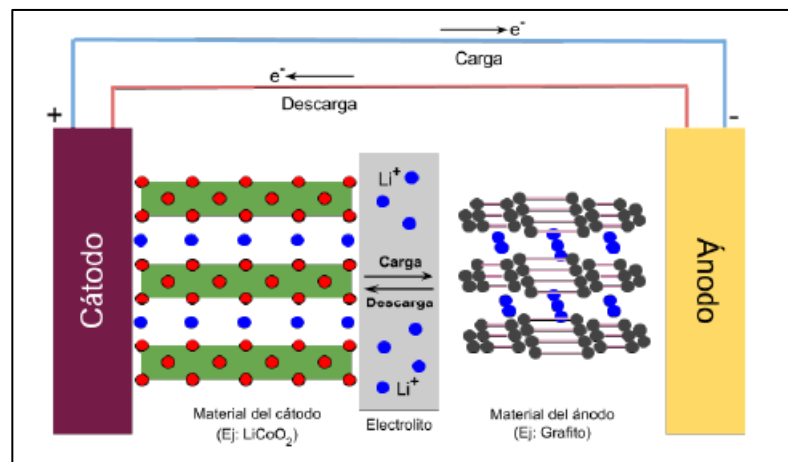


Figura 1. Proceso de carga y descarga baterías ion-litio (Quintero et al., 2021, p.15).

Si la reacción química que libera energía en el proceso de oxidación (ánodo) no es reversible después de que los reactivos se consumen, durante el proceso de descarga, se llama pila (Tipo primario). Por el contrario, cuando la reacción química es reversible, mediante un proceso de Oxido- Reducción, el sistema se llama batería y se puede cargar mediante el paso de corriente, también conocida como pila (Tipo secundario), en ese sentido, también se conoce como baterías recargables al conjunto de celdas electroquímicas que conforman un módulo (Hamel, 2011).

En la actualidad las baterías de ion-litio son muy superiores entre todos los tipos de baterías, esto se debe a sus características de rendimiento en cuanto a: reducción de precios, peso ligero y alta densidad de potencia. Al observar la **Figura 2**, se puede comprender que la batería de ion-litio presenta menor volumen y peso, lo que la hace mucho más viable en cuanto a su uso para dispositivos eléctricos y electrónicos.

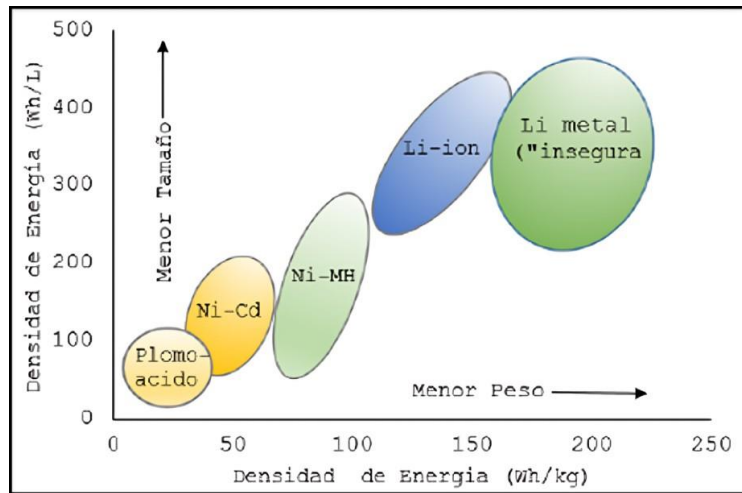


Figura 2. Densidad de energía gravimétrica y volumétrica de diferentes tipos de tecnología de baterías recargables (Pico, H.A., 2021, p. 84).

Los compuestos más utilizados para fabricar cátodos son los óxidos de metal de transición y el litio, es por ello que el cobalto al ofrecer unas mejores condiciones de estabilidad frecuentemente se lo utiliza para la fabricación del cátodo formando así el óxido de litio cobalto (LiCoO_2). Por otra parte, la desventaja es el costo del compuesto, en solución a este problema se utilizan elementos con níquel, aluminio, manganeso y combinaciones para encontrar el mejor equilibrio entre coste y propiedades (Olmo, 2019).

4.1.2 Terminología utilizada en las baterías.

Para comprender el comportamiento térmico de las baterías según Quintero et al. (2021), es necesario detallar la terminología que se explica a continuación:

- Ciclo: se define como el proceso de descargar una batería que ha sido cargada completamente.
- Degradación: se define como el proceso en el que se disminuye la capacidad de almacenamiento de energía de la batería.
- Electrodo Negativo: se define como el lugar donde un elemento o componente químico se somete a una reacción electroquímica de oxidación.
- Electrodo Positivo: se define como el lugar donde un elemento o componente químico se somete a una reacción electroquímica de reducción.
- Electrolito: Es una solución acuosa o no acuosa de sales, bases y ácidos que permite el flujo de electrones.
- Estado de Carga (SOC): se define como la energía que está disponible en la batería.
- Estado de Salud (SOH): se define como el porcentaje de degradación sufrida por la batería.
- Impedancia Interna: medida de oposición al paso de la corriente en un circuito cuando se aplica un voltaje.
- Proceso de Carga: proceso inverso donde la reacción de oxidación ocurre en el electrodo positivo y la reacción de reducción ocurre en el electrodo negativo.
- Proceso de Descarga: flujo de electrones desde el ánodo (reacción de oxidación) hasta el cátodo (reacción de reducción) a través de una carga externa.
- Profundidad de Descarga (DoD): porcentaje de cuánta energía se ha usado.
- Vida útil Remanente: capacidad máxima de energía remanente en la batería.
- Voltaje Nominal: voltaje de operación del dispositivo o instrumento.

- Voltaje de Corte de descarga: voltaje mínimo al cual puede llegar la batería durante el proceso de descarga. Se utiliza como medida de protección para evitar daños irreversibles en la batería. (p.16)

La **Figura 3** representa la curva característica de descarga de una batería el cual representa 3 valores de tensión característicos cuando se descarga una batería. Según Olmo (2019, p.9):

- Tensión máxima: representa el valor máximo de tensión que la batería es capaz de soportar durante un proceso de carga.
- Tensión nominal: Es el valor de tensión del cual la batería esté operando durante la mayoría de la descarga.
- Tensión mínima: Es el valor de tensión en el cual se considera que la batería está totalmente descargada.

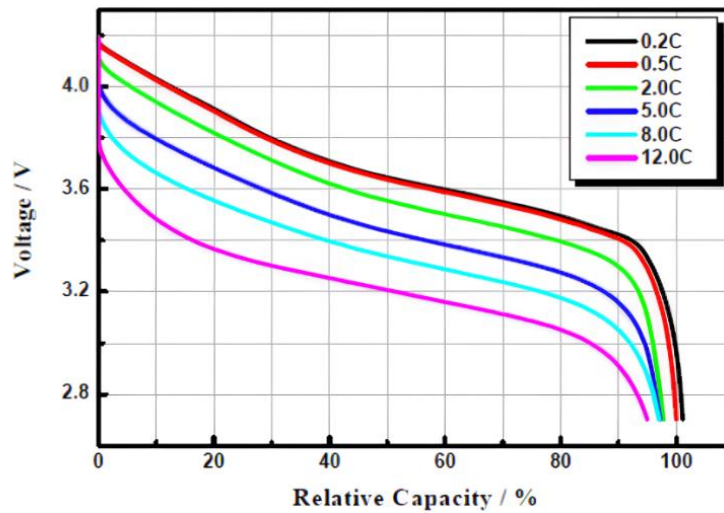


Figura 3. Curva característica de descarga (Olmo, 2019, p.9).

Al observar la gráfica se puede deducir que la batería al estar en un circuito abierto se encuentra a su valor máximo de tensión pero que, una vez comienza la descarga, este valor cae rápidamente por la caída de tensión interna que provoca la corriente de descarga aplicada.

Seguidamente, se puede observar un tramo donde de alguna manera se estabiliza la curva de descarga, donde se determina la tensión nominal que prácticamente se ocupa durante el periodo de descarga, en última instancia la tensión cae de forma pronunciada hasta su valor mínimo momento en el cual la batería se desconecta.

4.1.3 Módulo de baterías de Ion-litio

Existen baterías de ion-litio que están empaquetadas mediante una agrupación de unidades llamadas celdas y entre ellas existe una unidad intermedia conocida como módulo que se ilustra en la **Figura 4**.

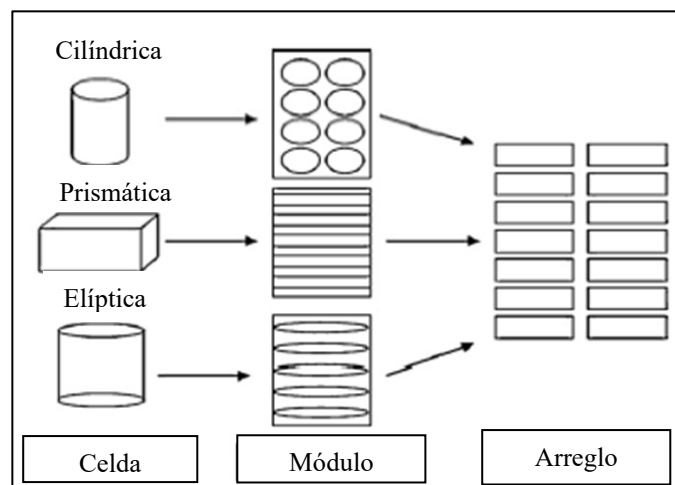


Figura 4. Sistema de empaquetamiento de baterías (Ramírez, 2014, p.5).

La celda otorga características de capacidad, tiempos de tensión y corriente que a su vez conforma una unidad llamada módulo, estos a su vez se agrupan y conforman una unidad mayor denominada empaque que se denominan batería de ion-litio, sin embargo, los empaquetamientos al manejar valores elevados de tensión y corriente existe un mayor incremento en la temperatura, dado el caso, estas pueden ser utilizadas de manera eficiente entre un rango no mayor a 40 °C, al tener un rango mayor de temperatura la vida útil de la misma y su capacidad de almacenamiento se reduce significativamente (Ramírez, 2014).

Cuando la actividad química aumenta a altas temperaturas la consecuencia es que ocurre un fenómeno denominado auto descarga en consecuencia, la temperatura de la batería se debe controlar en un rango adecuado que garantice un buen rendimiento y durabilidad (ver **Tabla 1**).

Tabla 1. Requisitos de diseño para un sistema de refrigeración.

Objetivos Sistema de Refrigeración.
Temperatura máxima < 60 °C
Temperatura mínima > 0 °C
Diferencia de temperaturas < 5 °C
25 °C < <i>Temperatura óptima</i> < 40 °C

Fuente: (Ramírez, 2014, p.6).

4.1.4 Efecto de la temperatura sobre las baterías de ion litio.

Las baterías de ión litio al trabajar con elevadas temperaturas presentan un mejor desempeño, sin embargo, su vida útil se verá reducida de forma significativa. Por otra parte, dichas baterías, al operar en condiciones de muy baja temperatura, ocurre el efecto opuesto, es decir, el desempeño de la batería se ve reducido pero su vida útil aumenta considerablemente. Por ejemplo, al trabajar con una batería de ion litio que se encuentra a -30 °C, su capacidad se reduce a un 50 % y su vida útil aumenta en aproximadamente un 60 % (Oosten, 2020).

4.1.5 Fuga térmica – Thermal Runaway

En las celdas de iones de litio, el movimiento de electrones e iones de litio produce electricidad. El proceso de carga y descarga normalmente va acompañado de una pequeña cantidad de calor (Underwriters Laboratories, 2023).

En condiciones ideales, el calor puede disiparse de la celda. Sin embargo, en el caso de fuga térmica, la celda de iones de litio genera calor a una velocidad varias veces mayor que la

velocidad a la que el calor se disipa. La celda alcanza un descontrol térmico cuando su temperatura aumenta incontrolablemente a un ritmo superior a 20 °C por minuto con temperaturas máximas que alcanzan más de 300 °C acompañadas de ventilación de gas y/o electrolitos, humo o fuego o una combinación de todos (Underwriters Laboratories, 2023).

La fuga térmica es uno de los principales riesgos relacionados con las baterías de iones de litio. Es un fenómeno en el que la celda de iones de litio entra en un estado de autocalentamiento incontrolable. La fuga térmica puede provocar: eyección de gas, metralla y/o partículas (ventilación violenta de células), temperaturas extremadamente altas, humo y fuego (Underwriters Laboratories, 2023).

4.1.6 Métodos de refrigeración de módulos de baterías de litio.

En la actualidad existen muchos tipos de métodos de enfriamiento que se utilizan en los sistemas de gestión térmica de las baterías, una de las áreas problemáticas más importantes de la tecnología de baterías es la gestión térmica. Las baterías de iones de litio, que son las unidades de almacenamiento de energía más adecuadas para muchas aplicaciones en la actualidad, liberan energía térmica durante la carga y la descarga, mientras que el aumento de las temperaturas puede causar ineficiencia en las baterías, una vida útil más corta de las baterías e incluso incendios debido a la fuga térmica. Se estima que la temperatura ideal de funcionamiento está entre 15 °C y 35 °C (Öztop, 2022).

Entre los métodos de enfriamiento para las baterías de ion de litio existen sistemas pasivos, y sistemas activos. Se denominan sistemas pasivos a aquellos que no requieren energía externa para su funcionamiento. Según Valdés (2015) los sistemas de refrigeración pueden ser pasivos como activos y pueden estar divididos en 4 categorías: aire, líquido, PCM (Gestión térmica basado en materiales en cambio de fase) y combinaciones de las anteriores.

Thakur (2020) desarrolló un estudio de revisión tecnológica para un estado del arte detallado de BTMS (Battery Thermal Management System), que son las técnicas avanzadas de enfriamiento para sistemas de baterías de iones de litio de vehículos eléctricos, entre ellas se encuentran las técnicas de enfriamiento por aire forzado y natural, métodos de enfriamiento por líquido directo e indirecto y enfriamiento por tuberías de calor, en ese sentido plantea que las baterías enfriadas por aire poseen características ventajosas como un diseño seguro, consistente y simple, sin embargo, la relativa menor capacidad calorífica y eficiencia térmica que presenta el aire con respecto a otros fluidos, propician que este se utilice como medio de enfriamiento en aplicaciones con baterías de baja capacidad, es decir que no generen una cantidad elevada de calor.

La relación entre las geometrías de los módulos realizada por Hunt et al. (2016), muestra que existe una gran diferencia entre enfriar la superficie lateral de la celda de la batería y enfriar las superficies superior e inferior. Demuestra que en el proceso de enfriamiento de las superficies polares tiene un impacto positivo en la duración de la batería a comparación con los procesos de enfriamiento de la superficie lateral (Cengel y Boles, 2012).

4.2. Capítulo II: Conceptos teóricos sobre transferencia de calor

4.2.1 Fundamentos básicos de termodinámica.

La termodinámica se puede delimitar como la ciencia que estudia la energía, aunque es un poco complicado definirla, se puede decir que la energía es la capacidad para provocar cambios, entre una de las leyes fundamentales que es gobernada por la naturaleza es el principio de conservación de la energía, el cual manifiesta, que en un intercambio la energía puede ir de un estado a otro con la misma cantidad de energía.

Entonces, Cengel y Boles (2012) afirman que: *“El cambio de contenido energético de un cuerpo o de cualquier otro sistema es igual a la diferencia entre la entrada y la salida de energía*

“ (p. 220.). Este balance se conoce como principio de conservación de la energía, misma que se expresa mediante la **Ecuación 1**:

$$E_{\text{ENTRADA}} - E_{\text{SALIDA}} = \Delta E \quad (1)$$

Donde:

E_{ENTRADA} : Energía de entrada.

E_{SALIDA} : Energía de salida.

ΔE : Cambio de contenido energético.

La primera ley de la termodinámica es puramente una demostración del principio de conservación de la energía y estipula que la energía es una propiedad de la termodinámica. La segunda ley de la termodinámica establece que la energía tiene calidad y cantidad, y que en un proceso real la energía se dirige a donde se tiene una menor calidad de energía.

En la **Figura 5** se observa un claro ejemplo de la segunda ley de la termodinámica, donde la energía de alta temperatura se degrada se transforma en menos útil a otra con menor temperatura al transferirse al aire con temperatura ambiente.

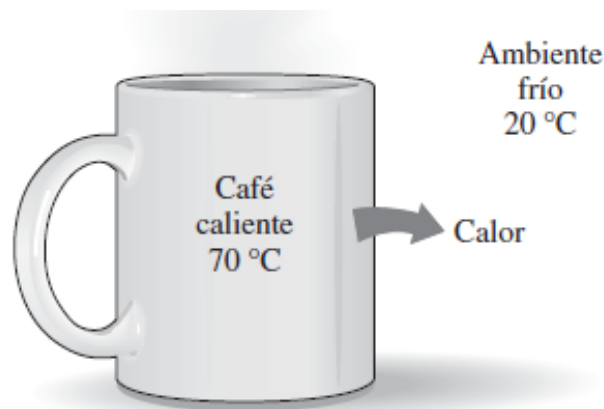


Figura 5. Flujo de calor en dirección a temperatura decreciente (Cengel y Boles, 2012, p.3).

4.2.2 Balance energético en módulos de baterías de litio.

La **Ecuación 2** que se muestra a continuación, rige el balance de energía dentro de un empaque formada por módulos:

$$C_{\text{bat}}m_{\text{bat}}\frac{dT_{\text{bat}}}{dt} = Q_{\text{gen}}(n) - Q_{\text{dis}}(n) + Q_{\text{con}}(n) \quad (2)$$

Donde:

C_{bat} = capacidad calorífica de la celda.

Q_{gen} = corresponde al calor generado por las celdas.

Q_{dis} = calor disipado al actuar el sistema de refrigeración.

Q_{con} = Calor transferido al interior de las celdas mediante conducción.

La producción de calor originado en las celdas se da por el efecto Joule, fenómeno que usualmente se da en los conductores, al transitar corriente, parte de la energía cinética de los electrones se convierte en calor, este efecto surge dado a las colisiones de los átomos y el conductor o material por donde se transportan, lo que provoca un aumento en la temperatura, este fenómeno se rige en base a la **Ecuación 3**, la misma que indica que el calor generado en una celda en función de la resistencia interna de la batería (Ramírez, 2014).

$$\dot{g} = I^2 * R \quad (3)$$

Donde \dot{g} es el calor generado, I es la corriente que circula y R es la resistencia interna de la batería.

Por lo general la disipación de calor en empaque de baterías se da a modo de transferencia de calor por convección entre la superficie de la celda y un fluido de refrigeración, en ese sentido, resulta necesario encontrar el coeficiente de convección h el cual se determina en base a distintos factores que a la final determina el desempeño de la transferencia de calor.

Denominados grupos adimensionales determinan el coeficiente de convección buscado, según Ramírez (2014), estos afectan el valor final del coeficiente convectivo, entre ellos se tiene: número de Nusselt, número de Rayleigh y el número de Prandtl.

El número de Nusselt es un valor adimensional que indica el cambio en la transferencia de calor desde una superficie por la cual circula un fluido. Es decir, mide la transferencia que ocurre por conducción y convección en comparación a la tasa de transferencia que tuviera lugar si ocurriera solamente por convección (Incropera y De Witt, 1999).

$$\overline{Nu}_L = \frac{\bar{h}_L}{k_f} = CRe_L^m Pr^n \quad (4)$$

El número de Rayleigh se interpreta como la relación entre los efectos de las fuerzas que generan flotabilidad y el valor que representa los efectos que generan las fuerzas de conducción térmica y fuerzas de viscosidad (Incropera y De Witt, 1999).

$$Ra = \frac{g * \beta * (T_s - T_\infty) * L_c^3}{\gamma^2} * Pr \quad (5)$$

Donde g es valor de la gravedad, β es el coeficiente de expansión volumétrica del aire T_s es la temperatura de la superficie de la base, T_∞ es la temperatura del aire circundante, L_c es la longitud característica, Pr es el número de Prandtl y γ es la viscosidad cinemática.

El número de Prandtl es un número adimensional proporcional que relaciona la velocidad de difusión de la cantidad de momento (ν) y la difusividad térmica (α).

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} \quad (6)$$

4.2.3 Proceso de Transferencia de Calor

La transferencia de calor se puede definir como la energía en tránsito en una disparidad de temperaturas, entonces, mientras exista un gradiente de temperatura en un sistema, y en consecuencia interactúan entre sí, se dice que se transfiere energía.

Los procesos de transferencia de calor están gobernados por la primera y segunda ley de la termodinámica, en ese sentido, se puede pensar que la transferencia de calor se puede deducir a través de las leyes básicas de la termodinámica, lo cual es un error, ya que la transferencia de calor determina cuantitativamente las transformaciones que ocurren por la falta de equilibrio en temperaturas de distintos procesos en el campo de la ingeniería (Incropera y De Witt, 1999).

4.2.4 Tipos de transferencia de calor.

Para poder determinar los elementos que establecen el comportamiento térmico en las baterías de ion de litio resulta importante tener conocimiento de los distintos mecanismos de transferencia de calor que se conocen de la naturaleza.

4.2.4.1 Conducción

La conducción se ve involucrada con la actividad atómica y molecular, es decir, existen procesos a estos niveles que defienden la transferencia de calor, en ese sentido la conducción es considerada como la transferencia de energía de las partículas más energéticas a las menos energéticas (Ramírez, 2014).

Al hablar de ecuaciones o modelos matemáticos que más se acoplan para calcular la cantidad de energía que se transfiere por unidad de tiempo en conducción, según Ramírez (2014), se hace referencia a la ley de Fourier para pared plana unidimensional y se expresa mediante las **Ecuaciones 7 y 8.**

$$q''_x = -k \frac{dT}{dx} \quad (7)$$

$$q''_x = k \frac{T_1 - T_2}{L} = k \frac{\Delta T}{L} \quad (8)$$

Donde, q''_x es la tasa de transferencia de calor por unidad cuadrada, k es la conductividad térmica, L es el espesor de la pared, y T es la temperatura.

4.2.4.2 *Convección.*

La transferencia de calor por convección se constituye de dos maneras por movimiento molecular aleatorio (difusión) y mediante el movimiento global o macroscópico del fluido, en la transferencia de calor por este método se da porque grandes números de moléculas se mueven y dicho movimiento en presencia de una diferencia de temperatura ayuda a la transferencia de calor (Kreith et al., 2012).

La relación entre fluido-superficie se da por una región en el fluido en la que la velocidad se altera desde cero en la superficie a un valor finito asociada al flujo, habitualmente conocida como capa límite hidrodinámica. Mientras las temperaturas de la superficie y el fluido sean distintas existirá una parte del fluido a través de la cual la temperatura varía de T_s (temperatura de superficie) a T_∞ (temperatura de fluido) en el flujo exterior, donde comúnmente se llama capa límite térmica (Ramírez, 2014).

Es importante destacar que la transferencia de calor por convección se cataloga de acuerdo con la naturaleza de flujo, es decir, cuando el flujo es ocasionado por medios externos se denomina convección forzada, mientras que, cuando nos referimos a convección natural el flujo es persuadido por fuerzas que se dan a partir de diferencias de densidad usualmente ocasionadas por variaciones de temperatura en el fluido. La ecuación que describe la transferencia de calor por convección se puede observar en la **Ecuación 9** (Ramírez, 2014).

$$q'' = h (T_s - T_\infty) \quad (9)$$

Donde h es el coeficiente de convección T_s es la temperatura superficial y T_∞ es la temperatura ambiente.

4.2.5 *Transferencia de calor por conducción unidimensional.*

Cuando se habla de transferencia de calor por conducción unidimensional se hace referencia a que únicamente se necesita de una coordenada para describir la variación espacial de las variables dependientes, que por lo general se refiere al gradiente de temperatura en dos superficies y la transferencia de calor ocurre necesariamente en esa dirección como se indica la **Figura 6** (Kreith et al., 2012).

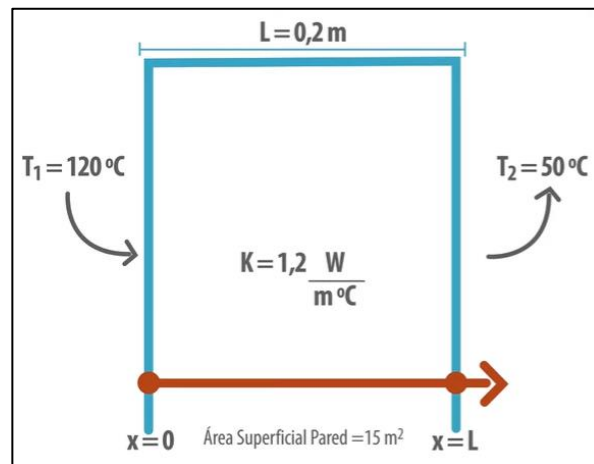


Figura 6. Transferencia de calor unidimensional.

4.2.6 *Transferencia de calor en estado estacionario.*

Cuando la temperatura es independiente en el tiempo el problema de transferencia de calor se designa como estado permanente o estacionario (Kreith et al., 2012).

4.2.7 *Transferencia de calor transitorio.*

Entre los problemas de transferencia de calor se catalogan en base a las variables que interfieren en la temperatura, es decir, si la temperatura se encuentra en función del tiempo se determina como transitorio o inestable (Kreith et al., 2012).

4.2.8 *Disipadores de calor tipo aletas.*

Al referirnos a la transferencia de calor el empleo aletas es lo más utilizado para la disipación de calor en una pared, es decir, cuando una superficie expuesta a un fluido de

temperatura T_{∞} que rodea la superficie, la pared está desnuda y la temperatura superficial T_s es fija, se dice que la tasa de transferencia de calor por área unitaria de la pared plana está dominada por el coeficiente de transferencia de calor \bar{h} .

Entonces, en muchos de los casos para aumentar la tasa de transferencia de calor al emplear aletas lo más común sería incrementar el área de contacto entre la superficie sólida y el fluido (Kreith et al., 2012).

4.2.9 Superficies extendidas.

Las aletas existen en distintas formas y configuraciones que se basan principalmente en su desempeño térmico, costo, peso, espacio disponible, caída de presión del fluido de transferencia de calor etc. De acuerdo al desempeño de una aleta, se puede determinar mediante un análisis la eficacia del proceso transferencia de calor, para lo cual se emplea la **Ecuación 10** (Kreith et al., 2012).

$$\eta_f = \frac{\text{calor real transferido por la aleta.}}{\text{Calor que se tendría que transferir si toda la aleta estuviera a la temperatura base.}} \quad (10)$$

La **Figura 7** que se muestra a continuación, representa cada caso de aleta: a) aleta recta de perfil rectangular, b) tubo cilíndrico con aletas de perfil rectangular, c) aleta recta de perfil trapezoidal, d) aleta recta de perfil parabólico, e) tubo cilíndrico con aleta radial de perfil rectangular; f) tubo cilíndrico con aleta radial de perfil troncocónico, g) aleta-recta cilíndrica, h) curva irregular troncocónica, i) curva irregular parabólica.

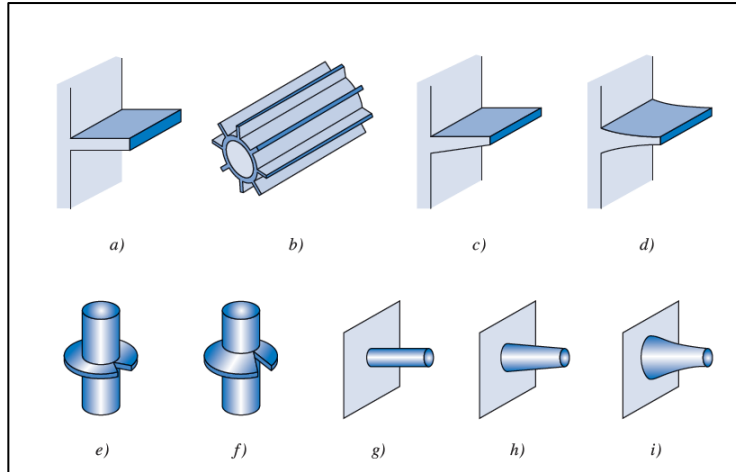


Figura 7. Diagramas de diferentes tipos de aletas (Kreith et al., 2012, p.101).

4.2.9.1 *Sección Transversal uniforme.*

Al considerar una aleta-pasador mostrado en la **Figura 8**, que se encuentra pegado a una pared con una temperatura superficial T_s , la aleta se refrigera a lo largo de su superficie al estar en contacto con un fluido a temperatura T_∞ , la aleta al tener una sección transversal uniforme a y una conductividad térmica k que se restringe comúnmente por el material utilizado, se considera que el coeficiente de transferencia de calor es \bar{h}_c , lo que supone que la temperatura solo depende de $x_1 T = T(x)$ al considerar que la temperatura en una sección transversal es uniforme.

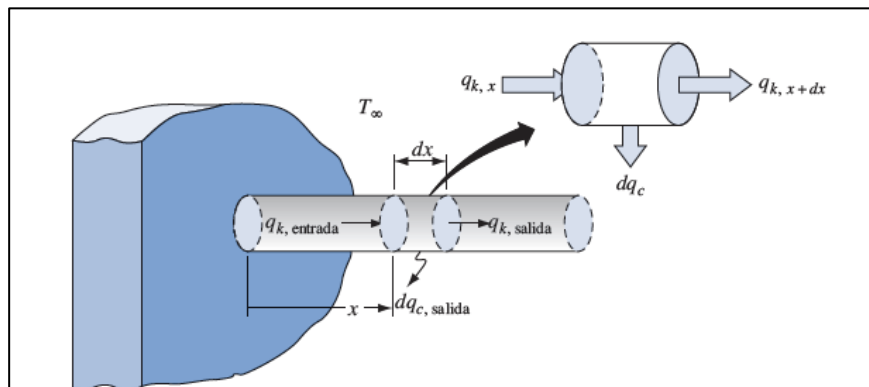


Figura 8. Diagrama esquemático de una aleta-recta que sobresale de una pared. (Keith et al., 2012, p. 95).

Al observar la **Figura 8** se puede identificar cómo se efectúa el equilibrio térmico para una aleta de sección transversal uniforme, el calor sale por el elemento por conducción por la cara derecha y por convección de la superficie, en consecuencia:

Tasa de flujo de calor por conducción hacia el elemento	=	Tasa de flujo de calor por conducción hacia fuera del elemento en $x + dx$	+ Tasa de flujo de calor por convección de la superficie entre $x + dx$.
---	---	--	---

La formulación matemática que más se ajusta para transferencia de calor por conducción en una aleta de sección transversal uniforme se representa mediante la **Ecuación 11**.

$$q_{k,x} = q_{k,x+dx} + dq_c \quad (11)$$

Según Kreith et al, (2012,p.86), existen condiciones de frontera que estas a su vez dependen de la condición física del extremo de la aleta.

1. Cuando la aleta es muy larga y la temperatura de su extremo tiende a la temperatura del fluido:

$$\theta = 0 \text{ en } x \rightarrow \infty$$

2. El extremo de la aleta está aislado:

$$\frac{d\theta}{dx} = 0 \text{ en } x = L$$

3. La temperatura en el extremo de la aleta es fija:

$$\theta = \theta_L \text{ en } x = L$$

4. La punta pierde calor por convección:

$$-k \left. \frac{d\theta}{dx} \right|_{x=L} = \bar{h}_{c,L} \theta_L$$

Tabla 2. Ecuaciones para el cálculo de distribución de temperatura y la tasa de transferencia de calor para aletas de sección transversal constante.

Caso	Condición en la punta ($X = L$)	Distribución de temperatura, θ / θ_x	Tasa de transferencia de calor de la aleta, θ_{aleta}
1	Aleta infinita ($L \rightarrow \infty$): $\theta(L) = \theta_L$	e^{-mx}	M
2	Adiabática: $\left. \frac{d\theta}{dx} \right _{x=L} = 0$	$\frac{\cos h m(L - x)}{\cos h mL}$	$M \tanh mL$
3	Temperatura fija: $\theta(L) = \theta_L$	$\frac{\theta_L/\theta_s \text{sen } hmx + \text{sen } hm(L - x)}{\text{sen } h mL}$	$M \frac{\cos h mL - (\theta_L/\theta_s)}{\text{sen } h mL}$
4	Transferencia de calor por convección: $\bar{h}_c \theta(L) = -k \left. \frac{d\theta}{dx} \right _{x=L}$	$\frac{\cos h m(L - x) + (\bar{h}_c/mk) \text{sen } m(L - x)}{\cos h mL + (\bar{h}_c/mk) \text{sen } mL}$	$M \frac{\text{sen } h mL + (\bar{h}_c/mk) \cosh mL}{\cos h mL + (\bar{h}_c/mk) \text{sen } mL}$

$$^{\circ}\theta \equiv T - T_{\infty}$$

$$\theta_s \equiv \theta(0) = T_s - T_{\infty}$$

$$m^2 \equiv \frac{\bar{h}_c P}{kA}$$

$$1M \equiv \sqrt{\bar{h}_c P k A} \theta_s$$

Fuente: (Kreith et al., 2012)

4.2.9.2 Sección Irregular.

Cuando la sección transversal no es uniforme el análisis del comportamiento térmico de la aleta se vuelve más complejo, las soluciones ya no tienen la forma de funciones hiperbólicas o exponenciales simples, según Incropera et al. (2011, p.124) menciona que si la temperatura en la base de la aleta se establece como $\theta(\mathbf{r}_1) = \theta_b$ y se supone la periferia adiabática, se puede evaluar para dar una distribución de temperaturas según la **Ecuación 12**.

$$\frac{\theta}{\theta_b} = \frac{I_0(mr)K_1(mr_2) + k_0(mr)I_1(mr_2)}{I_0(mr_1)K_1(mr_2) + k_0(mr_1)I_1(mr_2)} \quad (12)$$

Donde $I_1(mr) = d[I_0(mr)]/d(mr)$ y $k_1(mr) = -d[K_0(mr)]/d(mr)$ son funciones de Bessel de primer orden modificadas de primera y segunda clase, respectivamente.

Si la transferencia de calor de la aleta se expresa como la **Ecuación 13**.

$$q_f = -k A_{c,b} \left. \frac{dT}{dr} \right|_{x=r_1} = -k (2\pi r_1 t) \left. \frac{d\theta}{dr} \right|_{x=r_1} \quad (13)$$

El calor transferido se determina mediante la **Ecuación 14**.

$$q_f = 2\pi r_1 t \theta_b m \frac{k_1(mr_1)I_1(mr_2) - I_1(mr_1)K_1(mr_2)}{k_0(mr_1)I_1(mr_2) - I_0(mr_1)K_1(mr_2)} \quad (14)$$

Y la eficiencia se define mediante la **Ecuación 15**.

$$\eta_f = \frac{q_f}{h 2\pi |r_2^2 - r_1^2| \theta_b} = \frac{2r_1}{m |r_2^2 - r_1^2|} \frac{k_1(mr_1)I_1(mr_2) - I_1(mr_1)K_1(mr_2)}{k_0(mr_1)I_1(mr_2) - I_0(mr_1)K_1(mr_2)} \quad (15)$$

4.2.10 Resistencias térmicas.

Se plantea un concepto muy importante que relaciona la difusión de calor y la carga eléctrica, es decir, se asocia la resistencia térmica con la conducción de calor, al igual que la resistencia térmica con la conducción de electricidad **Ecuación 16** (Incropera y De Witt, 1999).

$$R_{t,cond} = \frac{L}{kA} \quad (16)$$

Donde, L es el espesor de la pared, k es la conductividad térmica y A es el área perpendicular al flujo de calor. La resistencia térmica de convección de igual forma se asocia con la transferencia de calor mediante la **Ecuación 17**.

$$R_{t,conv} = \frac{T_s - T_\infty}{q} = \frac{1}{hA} \quad (17)$$

La tasa de transferencia de calor se establece por separado de cada elemento mediante la **Ecuación 18**:

$$q_x = \frac{T_{\infty,1} - T_{s,1}}{1/h_1A} = \frac{T_{s,1} - T_{s,2}}{L/kA} = \frac{T_{s,2} - T_{\infty,2}}{1/h_2A} \quad (18)$$

Cuando se habla de diferencia de temperatura $T_{\infty,1} - T_{\infty,2}$, y de la resistencia térmica total R_{tot} , la transferencia de calor también se determina con la **Ecuación 19**:

$$q_x = \frac{T_{\infty,1} - T_{\infty,2}}{R_{tot}} \quad (19)$$

Dado el caso de que las resistencias de conducción y convección están en serie pueden sumarse y se determina mediante la **Ecuación 20**.

$$R_{tot} = \frac{1}{h_1A} + \frac{L}{kA} + \frac{1}{h_2A} \quad (20)$$

4.2.11 Rendimiento efectividad y flujo de calor.

En general las aletas se emplean para aumentar la transferencia de calor a partir de una superficie al aumentar su área superficial efectiva, sin embargo, la aleta en sí representa una resistencia de conducción a la transferencia de calor desde la superficie original, es por ello, que no existe garantía de que la tasa de transferencia de calor aumente mediante el uso de aletas, por lo que se realiza una evaluación con respecto a la efectividad, y esta se define mediante la **Ecuación 21** que es la relación entre la tasa de transferencia de calor de la aleta y la tasa de transferencia de calor que existiría sin la aleta (Incropera et al., 2011).

$$\varepsilon_f = \frac{q_f}{hA_{c,b}\theta_b} \quad (21)$$

Donde $A_{c,b}$ es el área de transferencia de calor, θ_b es la diferencia de temperaturas entre la temperatura de la base y la temperatura del fluido, q_f es la tasa de transferencia de calor en la base y h es el coeficiente de convección.

La eficacia de las aletas se ve afianzado por la elección de un material de alta conductividad térmica. Sin embargo, el aluminio al ser un material con una conductividad térmica menor respecto

al cobre, es la opción más común debido a los beneficios adicionales relacionados con menor peso y costo, la eficacia de las aletas también se mejora al aumentar la relación entre el perímetro y el área de la sección transversal (Incropera et al., 2011).

4.2.11.1 Rendimiento global.

La eficiencia global de la superficie η_0 describe un arreglo de aletas y la superficie base a la que se ensambla y esta se define mediante la **Ecuación 22**.

$$\eta_0 = \frac{q_t}{q_{max}} = \frac{q_t}{hA_t\theta_b} \quad (22)$$

Donde q_t es la tasa de transferencia de calor real y q_{max} es la tasa de transferencia de calor tomando en cuenta que toda la aleta se encuentra a la misma temperatura que su base.

Es decir, que es la transferencia de calor total del área de la superficie A , asociada con las aletas y la parte expuesta de la base que comúnmente se denomina superficie primaria. Si hay N aletas en un arreglo, cada una de las áreas superficiales A_f , y el área de la superficie primaria se designa como A_b , el área de la superficie total se designa mediante la **Ecuación 23**.

$$A_t = NA_f + A_b \quad (23)$$

La transferencia de calor máxima posible resultaría si toda la superficie de aleta, fuera como la base expuesta, se mantuviera en T_b .

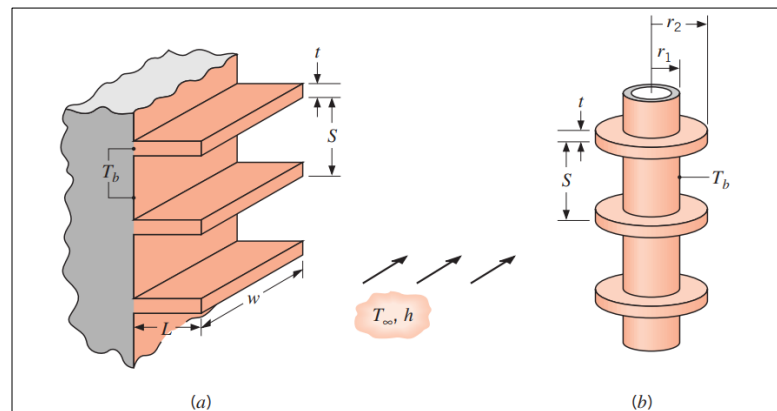


Figura 9. Arreglos de aletas que representan un rendimiento global (Incropera y De Witt, 1999 p. 171).

La transferencia de calor por convección de las aletas y la superficie principal (sin aletas) se expresa mediante la **Ecuación 24**.

$$q_t = N\eta_1 h A_f \theta_b + h A_b \theta_b \quad (24)$$

El coeficiente de convección h se supone equivalente para las superficies principal y con aletas, η_f es la eficiencia de una sola aleta y η_0 es la eficiencia del arreglo, entonces la fórmula se rige en base a la **Ecuación 25**.

$$\eta_0 = 1 - \frac{N A_f}{A_t} (1 - \eta_f) \quad (25)$$

4.2.11.2 Flujo de calor.

Al inferirse la expresión de resistencia térmica antes mencionada ecuación 13 mediante la **Ecuación 26** se expresa la resistencia térmica para un arreglo de aletas.

$$R_{t,0} = \frac{\theta_b}{q_t} = \frac{1}{\eta_0 h A_t} \quad (26)$$

El cual $R_{t,0}$ es una resistencia efectiva que explica las trayectorias de flujo de calor paralelas por conducción convección en las aletas y por convección de la superficie principal (Kreith et al., 2012).

4.3. Capítulo III: Simulación computacional

4.3.1 Método de elementos finitos.

El método de los elementos finitos es una de las herramientas numéricas para lograr una solución aproximada a un problema de valores en la frontera, que generalmente se representa en forma de ecuación diferencial parcial. Este método funciona según el principio de dividir el dominio del problema en subdominios más pequeños (llamados elementos finitos), representar el problema para todos los subdominios en forma de PDE, ensamblar las PDE de todos los

subdominios y resolver el conjunto de ecuaciones que representa el dicho problema para el dominio inicial. El término “elemento finito” fue introducido por primera vez por Clough, alrededor de 1960, mientras analizaba problemas de tensiones planas dentro del límite elástico (Kobayashi et al., 1989). Posteriormente se amplió a problemas de deformación plástica. En la década de 1970 se inició el análisis de elementos finitos de los procesos de formación de metales (Chenot y Massoni, 2006). El método de elementos finitos también se conoce como modelado de elementos finitos o análisis de elementos finitos.

4.3.2 Método de volúmenes finitos (FVM)

El método de volúmenes finitos expuesto por McDonald, McCormick y Paullay (1970), es una alternativa a los métodos ya establecidos, como el método de diferencias finitas y el método de elementos finitos. El enfoque plantea una formulación de las ecuaciones integrales de conservación (Navier-Stokes) para cada volumen de control generado previamente en el mallado del dominio. El mallado al ser bastante flexible puede ser estructurado como no estructurado, esto permite su aplicación a geometrías complejas, en ese sentido, se obtiene la solución discreta para los puntos de control de cada volumen en dependencia se requiere un mayor refinado de malla cuanto mayor sea la precisión deseada. Estos puntos de control, donde se almacenan los valores obtenidos, pueden ubicarse en los vértices de cada celda o en el centro de las mismas **Figura 10**.

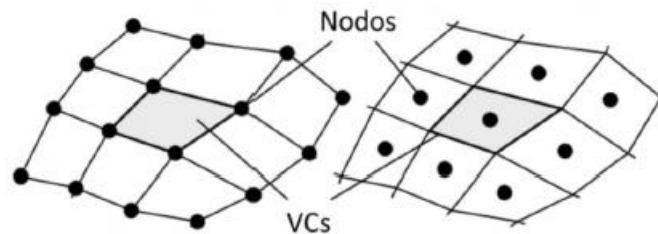


Figura10. Esquema de nodos y malla – Volúmenes finitos (Ortiz, 2022)

4.3.3 Modelo computacional usando elementos finitos

El método de elementos finitos se ha convertido en una tecnología clave indispensable en el modelado y simulación de sistemas de ingeniería avanzados en diversos campos como vivienda, transporte, comunicaciones, etc. Al construir un sistema de ingeniería tan avanzado, los ingenieros y diseñadores pasan por un sofisticado proceso de modelado, simulación, visualización, análisis, diseño, creación de prototipos, pruebas y, por último, fabricación. El FEM se utilizó por primera vez para resolver problemas de análisis estructural y sólido y desde entonces se ha aplicado a muchos otros problemas como análisis térmico, análisis de flujo de fluidos, análisis piezoeléctrico y muchos otros (Harish, 2023).

4.3.3.1 Mallado Computacional

El mallado es el proceso de crear elementos finitos y conectar esos elementos para formular un conjunto de funciones. Los elementos finitos se crean separando la geometría conocida con líneas imaginarias y luego los elementos se conectan entre sí especificando la conectividad nodal en los límites de los elementos. Cada elemento puede representarse mediante un conjunto de matrices, y conectar los elementos esencialmente compila las matrices individuales en 1 matriz estructural (Liu, 2014).

4.3.3.2 Validación Mallado

La malla generada por el software computacional afecta directamente los resultados que esta muestra al usuario. De forma general, al trabajar con una cantidad mayor de elementos finitos se obtienen resultados más precisos, sin embargo, los recursos computacionales requeridos se incrementan al trabajar con un número mayor de elementos. Por este motivo, es necesario un método que permita optimizar los recursos computacionales disponibles, sin dejar de lado la precisión y exactitud de los resultados (Sun, 2019).

El método propuesto consiste en establecer un punto que servirá como referencia y proceder a variar el número de elementos finitos que se generan en la pieza. El objetivo es observar cómo los valores del punto de referencia cambian cuando se incrementa o disminuye el número de elementos finitos, de esta forma se establece un valor óptimo en el cual se obtienen resultados precisos con un número de elementos adecuado. La **Figura 11** muestra un esquema en el cual al variar el número de elementos finitos se logra cada vez resultados más precisos que convergen hacia un único valor (Sun, 2019).

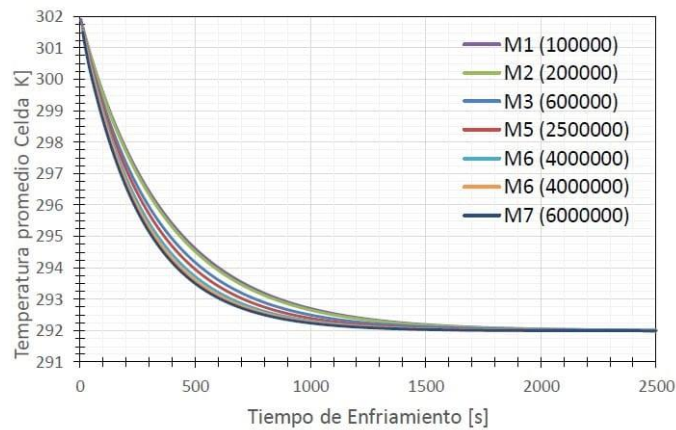


Figura 11. Variación de número de elementos finitos (Kummitha, 2023).

4.3.4 *SolidWorks Simulation*

Solidworks Simulation es un complemento de SolidWorks® que permite a los diseñadores poner a prueba sus diseños e identificar cualquier defecto de forma rápida y precisa. El diseñador recibirá datos muy precisos, a partir de las cargas estructurales y térmicas asignadas, lo que significa que podrá realizar cambios en el diseño antes de que se produzca un prototipo físico. De esta forma, el complemento de simulación permite ahorrar mucho tiempo, dinero y esfuerzo al identificar problemas con sus diseños en las primeras etapas del proceso, al poner a prueba los prototipos 3D generados en el software (Midtgard, 2024).

5 Metodología

5.1. Área de estudio

El estudio se lleva a cabo en el laboratorio integrado de energía de fluidos y manufactura, que se encuentra ubicado en la Facultad de la Energía, las Industrias y los Recursos Naturales no Renovables de la Universidad Nacional de Loja (Ver **Figura 12**).

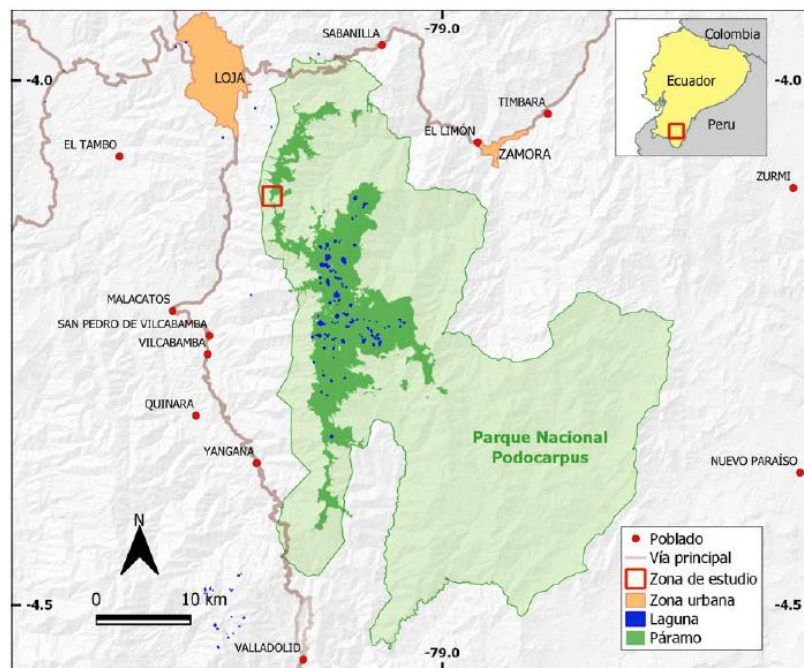


Figura 12. Ubicación de área de estudio.

5.2. Equipos y materiales

Los materiales y equipos que fueron empleados durante el desarrollo del estudio se detallan en la **Tabla 3**, con el fin de proporcionar una visión clara y precisa de los recursos utilizados en cada etapa del proceso investigativo.

Tabla 3. Materiales y equipos utilizados en la investigación.

Equipos	Software	Materiales Bibliográficos
		Artículos científicos
		Tesis
Computadora portátil	SolidWorks®	Libros
		Manuales
		Sitios web

5.3. Procedimiento

El enfoque de la investigación es cuantitativo ya que se recopila información cuantitativa sobre la temperatura generada en las celdas, los diferentes tipos de refrigeración aplicados al módulo de baterías de ion litio, incluyendo en su estudio una configuración geométrica, y sistema enfriado por convección natural con la inclusión de aletas. Con este propósito, se realizó lo siguiente:

Simulaciones numéricas: se utilizó el software SolidWorks® para simular el comportamiento térmico de un banco de baterías en función de las variables cuantitativas relevantes, se plantearon ecuaciones y modelos matemáticos.

Validación y verificación: se comparó los resultados con mediante procesos analíticos ecuaciones relacionadas a la transferencia de calor e investigación bibliográfica evaluando la consistencia y precisión de los hallazgos.

5.3.1 Actividades para llevar a cabo el primer objetivo: Deducir el sistema geométrico de disipadores de calor aplicado al módulo de baterías de litio.

En la realización del primer objetivo se desarrolló las siguientes actividades mostradas en la **Figura 13**.

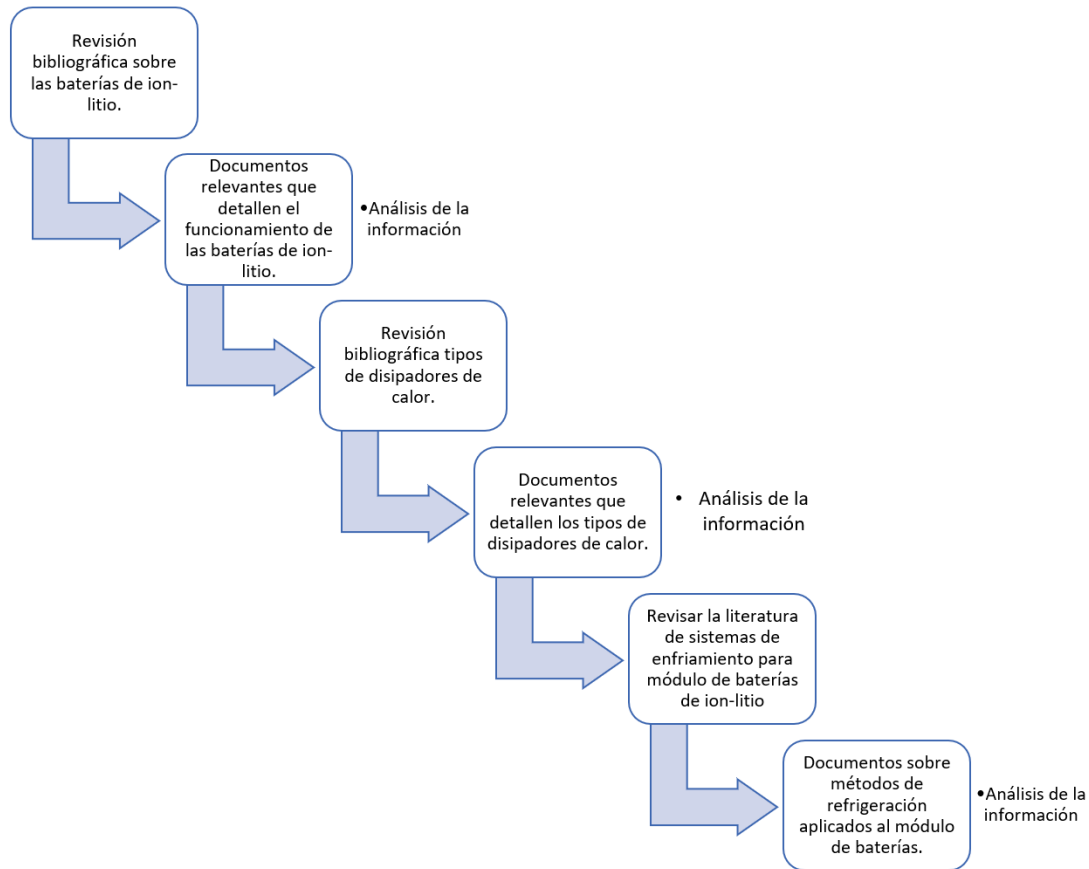


Figura 13. Proceso para la realización del primer objetivo.

Revisión bibliográfica sobre baterías de ion-litio: En esta actividad se recopiló información bibliográfica de artículos científicos, libros, tesis y publicaciones con relación con las baterías de ion-litio, poniendo hincapié en el principio de funcionamiento, utilidad y se definió conceptos técnicos utilizados en las baterías.

Análisis de la información: Capacidad, densidad de energía, eficiencia, características y aplicaciones de las celdas cilíndricas, etc.

Selección de la batería ion-litio: Se seleccionó una batería de ion-litio 18650 de catálogo Samsung identificando sus características técnicas con una tasa máxima de descarga de 10 amperios.

Revisión bibliográfica de los tipos de disipadores de calor: Se define los tipos de disipadores de calor, tipos de aletas, eficiencia en aletas, condiciones de operación, tipo de refrigeración.

Análisis de la información: Tipos de aletas, tipo de refrigeración en aletas, eficiencia.

Selección del tipo de aleta: Se seleccionó una aleta tipo rectangular identificando su respectiva geometría y modelos matemáticos para la transferencia de calor por conducción.

Revisar la literatura de sistemas de enfriamiento para el módulo de baterías ion-litio: Se identificó los sistemas de refrigeración aplicados al módulo de baterías de ion-litio en celdas cilíndricas tipo 18650, diferentes configuraciones geométricas identificando el número de celdas, disposición, espaciamiento, formas de bancos de baterías.

Selección sistema de enfriamiento: Se seleccionó un sistema de enfriamiento, la disposición de las celdas, número de celdas, parámetros térmicos del aire, mediante recopilación de información en artículos, el tipo de aleta para el banco de baterías.

5.3.2 Actividades para llevar a cabo el segundo objetivo: Diseñar térmicamente la configuración geométrica de los disipadores de calor tipo aleta en la refrigeración de un módulo de baterías de ion-litio.

Para cumplir con el siguiente objetivo se realizan las actividades que se pueden apreciar en la **Figura 14**.

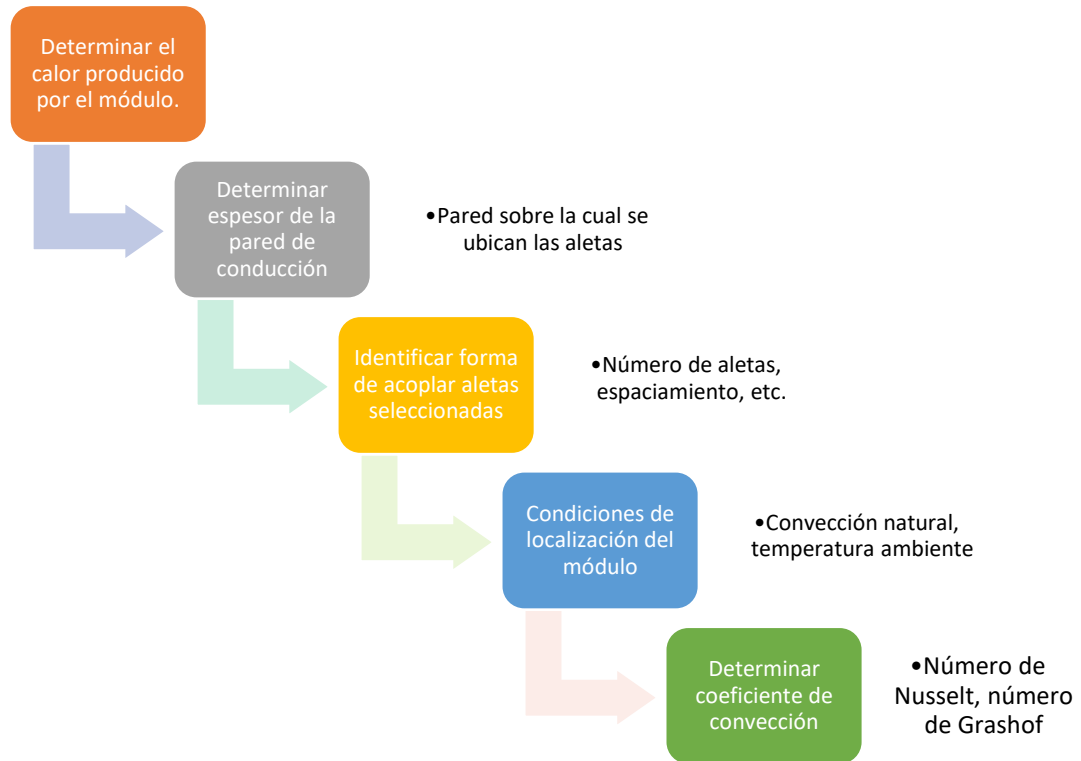


Figura 14. Proceso para la realización del segundo objetivo.

Determinar el calor producido por el módulo: El calor que se produce en el módulo de baterías se determina de acuerdo al calor producido por cada una de ellas. Dicho calor proviene de la transformación de la corriente eléctrica que fluye por la resistencia que se encuentra en el interior de las baterías.

Determinar el espesor de la pared de conducción. Las aletas se ubican sobre una pared de aluminio, la misma que actúa como resistencia de conducción al paso del calor. Determinar el espesor adecuado permite disipar calor con mayor eficiencia.

Identificar forma de acoplar aletas seleccionadas. Se identifica el mejor arreglo de las aletas seleccionadas y la forma en la que estas se ubican sobre la pared base de aluminio.

Número de aletas y espaciamento entre ellas. Mediante el software SolidWorks® se inserta una cantidad determinada de aletas y luego se varía dicha cantidad con el objetivo de determinar el arreglo que genere una mayor transferencia de calor.

Espesor de aletas y longitud. De igual forma, mediante el software SolidWorks® se prueban varios tamaños de aletas con sus respectivos espesores y se determina una longitud y espesor que presenten una disipación de calor adecuada tomando en cuenta su facilidad de construcción y ensamblaje.

Condiciones de localización del módulo de baterías. Es necesario identificar las condiciones ambientales donde se ubicará el módulo de baterías, ya que de esto depende la transferencia de calor por convección que ocurre entre el arreglo de las aletas seleccionadas y el medio ambiente.

Convección natural. El proceso de transferencia de calor ocurre de forma natural sin elementos mecánicos externos que ocasionan que el aire circundante cambie su velocidad.

Temperatura de localización. La temperatura de los alrededores donde se ubica el módulo de baterías influye en el coeficiente de convección de transferencia de calor. Se propone que dicha temperatura sea igual a 20 °C.

Determinar coeficiente de convección. El valor del coeficiente de convección se determina por medio del cálculo del número de Nusselt que toma en cuenta propiedades del fluido donde ocurre el proceso de transferencia de calor, como la conductividad térmica, densidad del fluido, etc.

5.3.3 Actividades para llevar a cabo el tercer objetivo: Simular térmicamente el modelo geométrico propuesto de disipadores de calor aplicados a la refrigeración de módulos de baterías de ion-litio.

Para llevar a cabo el objetivo mencionado se realizan las actividades presentadas en la **Figura 15.**



Figura 15. Proceso para la realización del tercer objetivo.

Generación de geometría 3D. Tomando en cuenta las dimensiones del módulo donde se ubica el arreglo de baterías, el espesor de la pared base y el arreglo de aletas seleccionado, se procede a generar la geometría mediante el uso del software SolidWorks®.

Mallado de geometría generada. Sobre el modelo 3D generado se aplica la malla de elementos finitos. Se propone utilizar elementos finitos de tipo triangular ya que esta es recomendable para analizar procesos de transferencia de calor.

Validación de malla. Para validar la malla generada es necesario identificar el acoplamiento de los elementos finitos localizados sobre la geometría 3D y verificar que estos presenten formas regulares ya que de esto dependerá la exactitud de los resultados que se obtengan.

Asignación de condiciones de contorno. Se aplican las condiciones de contorno o de borde que gobernarán el proceso de transferencia de calor, entre ellos se encuentra el coeficiente de convección, la conductividad térmica, etc. Se asigna a todas las caras

expuestas al aire un valor de convección de $11 \text{ w /m}^2 \cdot \text{K}$ y una generación de calor de 3.5 W en cada uno de los espacios donde se ubican las baterías.

Determinación de cargas térmicas. Se determinan las cargas térmicas que se introducen en el software, correspondientes al calor generado por el módulo que contiene el arreglo de baterías.

Asignación de cargas térmicas. Se identifican las áreas donde se asignan las cargas térmicas generadas por el calor disipado por las baterías.

Simulación de proceso de transferencia de calor. Mediante el software SolidWorks® Thermal Simulation, utilizando el método de los elementos finitos y tomando en cuenta las condiciones mencionadas previamente, se realiza el proceso de simulación.

Visualización y análisis de resultados. Se obtienen los resultados del proceso de simulación y se presentan mediante la interfaz gráfica del software SolidWorks® Thermal Simulation. A partir de los datos obtenidos del software, se calcula el porcentaje de error con respecto a los resultados obtenidos analíticamente. Para realizar el cálculo, el software utiliza el método euleriano, en el cual se supone que el espacio físico se comparte entre todas las fases, se introduce el concepto de fracción volumétrica de fase para describir el transporte de fase. Además, las fracciones volumétricas de fase son funciones continuas de espacio y tiempo, y que su suma es igual a uno. Se aplican las leyes de la conservación para cada fase a fin de derivar un conjunto de ecuaciones gobernantes, que se cierran por relaciones constitutivas teóricas o empíricas (Rout, 2012).

$$\frac{\partial(\partial_q \alpha_q \phi_q)}{\partial t} + \nabla \cdot (\partial_q \alpha_q \vec{V}_q \phi_q) = \nabla \cdot (\Gamma_{\phi_q} \nabla \cdot \phi_q) + \sum_{p=1}^n (\theta_{pq} + m_{pq} \phi_p - m_{qp} \phi_q) + S_{\phi_q}$$

Donde ρ es la densidad, α_q es la fracción de volumen de la fase, V es la velocidad, Γ es el coeficiente de difusión y Φ representa las variables dependientes de un sistema multifase:

$$\Phi = \{1, \alpha_q, U_q, V_q, W_q, H_q, Y_{qi}, k, \varepsilon, \dots\}$$

Donde, U_q, V_q, W_q son los componentes de la velocidad de fase, H_q es la entalpía total de fase, Y_{qi} es la fracción másica de la especie i en la fase q , k es la energía cinética turbulenta y ε es el índice de disipación de energía cinética turbulenta para los modelos de $k - \varepsilon$.

Ecuaciones que usa el software SolidWorks. Para determinar las soluciones el software formula las ecuaciones que rigen el comportamiento de cada elemento teniendo en cuenta su conectividad con los demás elementos. Estas ecuaciones hacen referencia a la respuesta de cargas, restricciones y propiedades del material conocidas. Posteriormente, el programa organiza las ecuaciones en un conjunto mayor de ecuaciones algebraicas simultáneas y resuelve las desconocidas.

En el caso de un estudio térmico, se utiliza la ecuación de conducción de Newton para determinar la cantidad de calor transferido a lo largo de la geometría del elemento.

$$Q_{(i,j)} = -kA \frac{dT}{dx} \quad (27)$$

Donde, $Q_{(i,j)}$: Calor transferido desde el nodo i hacia el nodo j , k es la conductividad del material empleado, A área de transferencia de calor, dT diferencia de temperaturas entre el nodo i y el nodo j , dx es la separación entre el nodo i y el nodo j .

Además, en caso de superficies en los que exista pérdida de calor por convección se utiliza la siguiente expresión aplicada sobre cada nodo:

$$Q_{(i)} = h (T_s - T_\infty) \quad (28)$$

Donde, $Q_{(i)}$: Calor transferido desde el nodo i hacia el medio circundante, h es el valor convectivo del medio circundante, A área de transferencia de calor, T_i es la temperatura en el nodo y T es la temperatura del medio circundante

El programa SolidWorks® permite obtener una ecuación en cada nodo que conforma el mallado de la geometría y establecer una matriz que permita determinar la temperatura en todos los nodos de acuerdo con las condiciones y propiedades establecidas.

6 Resultados

6.1. Proceso y análisis de datos **Objetivo 1: Deducir el sistema geométrico de disipadores de calor aplicado al módulo de baterías de ion-litio.**

Con base a la investigación bibliográfica detallada en la **Tabla 4** las baterías de ion-litio son superiores a cualquier tipo de batería debido a sus características: buena capacidad en rendimiento, reducción de precios, peso ligero y alta densidad de potencia. La recaudación de información fiable ha generado bases sólidas que contribuyen a la solución de la problemática actual sobre el sobrecalentamiento en el módulo de baterías de ion litio.

Tabla 4. Caracterización de las baterías ion-litio tipo 18650.

N°	Referencia	Artículo
1	Augusto Rodríguez et al. (2020)	Baterías de ion-litio: presente y futuro.
2	Delgado (2022)	Caracterización de baterías ion-litio utilizadas en la movilidad eléctrica
3	Quintero et al. (2021)	Baterías de ion-litio: características y aplicaciones
4	H.A. Pico et al. (2021)	Análisis de los factores que intervienen en el envejecimiento prematuro de las baterías ion-litio
5	Olmo, (2020)	Caracterización de baterías de ion-litio para estudio de envejecimiento
6	Hamel, (2011)	Celdas, Pilas y baterías de ion litio una alternativa para su uso.

En las investigaciones se utilizan celdas cilíndricas tipo 18650, específicamente su estudio prioriza la caracterización de las baterías.

6.1.1 Determinación de la celda a estudio

Analizar y caracterizar las condiciones de funcionamiento de la celda es importante para la selección de la batería, lo que implica la temperatura de operación, capacidad nominal, potencia, peso, costo y geometría.

En la actualidad, se observa un amplio uso de elementos electrónicos que utilizan energía eléctrica contenida en baterías de ion-litio, como es el caso de celulares, computadoras y vehículos eléctricos Naoki Nitta (2015), Además, debido a políticas ambientales, que se han ido implementado para preservar el planeta, las baterías de ion-litio juegan un rol importante en la descarbonización de la comunidad global (Altimiras, 2021).

Por los motivos mencionados, para el presente estudio, se selecciona la celda de ion-litio ICR18650-22P de la marca Samsung, en la **Tabla 5** se identifican las características técnicas de la batería.

Tabla 5. Características de celda ICR 18650-22P.

Ítem	Especificaciones.
Capacidad típica	2150 mAh (0.2 C, descarga de 2.75 V)
Capacidad mínima	2050 mAh (0.2 C, descarga de 2.75 V)
Voltaje de carga	4.2 V \pm 0.05 V

Voltaje Nominal	3.62 V (descarga 1 C)
Método de carga	CC- CV
Corriente de carga	Carga estándar: 1075 mA Carga rápida: 2150 mA
Tiempo de carga	Carga estándar: 3 horas Carga rápida: 2.5 horas
Max. Corriente de carga	2150 mA
Max. Corriente de descarga	10 A (descarga continua)
Voltaje de corte de descarga	2.75 V
Peso de la celda	44.5 g máx.
Dimensión de celda	Diámetro (máx.): 18.40 mm Altura (máx.): 65 mm máx.
Temperatura de funcionamiento	Carga: -10 a 50 °C
(Temperatura de la superficie de la celda)	Descarga: -20 a 70 °C
Temperatura de almacenamiento	1 año: 20~25 °C 3 meses: 20 ~ 45 °C 1 mes: 20 ~60 °C

Fuente: Especificación del producto ICR18650 22P, (2010)

La **Tabla 5** indica que la mayor tasa de descarga que permite la batería es de 10 A, mediante este dato se puede determinar el calor producido por las baterías. De igual manera, se definen las especificaciones térmicas de la celda ICR 18650-22 P. En la **Tabla 6** se presentan las especificaciones térmicas de la celda a estudio.

Tabla 6. Especificaciones térmicas de la celda a estudio.

Ítem	Unidad
Densidad (kg / m ³)	2873
Capacidad calorífica específica (J / kg·K)	1200
Conductividad térmica en dirección radial (W / m· K)	0.2
Conductividad térmica en dirección axial (W / m ·K)	37.6
Resistencia interna (mΩ)	35

Fuente: Zhang ,et al., 2021.

Mediante la investigación bibliográfica expuesta en la **Tabla 7** se pudo identificar el funcionamiento de la refrigeración al módulo de baterías, mediante el uso de superficies extendidas de calor tipo aleta.

Tabla 7. Revisión bibliográfica refrigeración al módulo de baterías mediante aletas.

N°	Referencia	Artículo
1	Oztop y Sahinaslan (2022)	Control de la distribución de temperatura para módulos de baterías ion-litio mediante aletas longitudinales.
2	Kummitha (2023)	Enfriamiento térmico del módulo de batería de celdas cilíndricas de iones de litio con deflectores disposición para el análisis numérico de enfriamiento del flujo de aire.
3	H. Fayaz et al. (2022)	Optimización del diseño térmico y estructural en iones de litio; Baterías para obtener una gestión

		térmica de baterías energéticamente eficiente
		Sistema (BTMS): una revisión crítica.
4	Agueros (2021)	Análisis térmico del sistema de refrigeración de un módulo de baterías mediante CFD. Una revisión del estado del arte y un punto de vista futuro sobre técnicas avanzadas de enfriamiento.
5	A.K.Tharkur (2020)	Sistema de batería de iones de litio de vehículos eléctricos. Rendimiento térmico del sistema de refrigeración
6	Wen Yang et al. (2020)	por aire axial con estructura de superficie biónica para módulo de batería cilíndrica de iones de litio.

Según Rodríguez et al. (2010), en su investigación: análisis térmico de disipadores de calor mediante simulación en Solidworks® Thermal Simulation, pudo identificar la configuración de aleta que presenta la mejor distribución de temperatura y flujo de calor. La configuración que presenta mayor desempeño térmico es el disipador con aletas circulares, seguidas de las aletas rectangulares, realizando una comparación, las configuraciones que presentan menor rapidez en transferencia de calor son las configuraciones cuadradas, triangulares y parabólicas **Tabla 8**.

Tabla 8. Comparación geométrica para flujo de calor.

Configuración	Temperatura más alta
Aletas circulares	75.825 °C

Aletas rectangulares	87.687 °C
Aletas triangulares	98.052 °C
Aletas cuadradas	100.367 °C
Aletas parabólicas	117.047 °C

Fuente: Rodríguez et al. (2010)

6.1.2 Disipación de calor del sistema.

En el presente estudio se propone enfriar un banco que contiene 16 celdas, se sabe que existen dos tipos de enfriamiento que son la activa y pasiva, se eligió el enfriamiento pasivo que resulta de la transferencia de calor por convección natural y conducción. Esto debido a que las baterías se encontrarán en funcionamiento en un ambiente que se encuentra en condiciones normales, es decir que no existe elementos mecánicos que alteren el flujo del fluido circundante a las baterías, la presión es de 1 atmósfera y la temperatura 20 °C. Las propiedades termo-físicas a 20°C del aire seco, se expresan mediante la **Tabla 9**.

Tabla 9. Propiedades termo físicas de aire seco 20 °C, presión atmosférica.

Propiedades	Valor
Densidad (kg /m ³)	1.204
Calor específico (J/ Kg · K)	1.007
Viscosidad dinámica (kg/m · s)	18.25x10 ⁻⁶
Conductividad térmica (W/m · K)	25.14 x10 ⁻³

Fuente: Incropera et al. (2011).

6.1.3 Geometría de celda

La celda cilíndrica 18650 define su diámetro y altura, parámetros importantes para desarrollar el estudio, se expresa en la unidad de longitud en milímetros como se observa en la **Figura 16**.

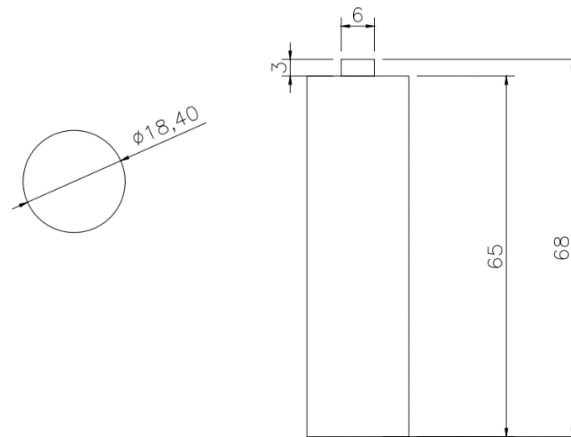


Figura 16. Dimensiones de la batería a objeto de estudio.

6.1.4 Disposición de las celdas

Existen dos tipos de arreglos para bancos de baterías que usualmente se estudian, conocidos como disposición alineada y escalonada. En la **Figura 17** se indica los tipos de arreglos utilizados en presente trabajo de investigación, donde se puede identificar las distancias s_L en forma vertical y s_T de manera horizontal, indispensables para la realización del estudio térmico.

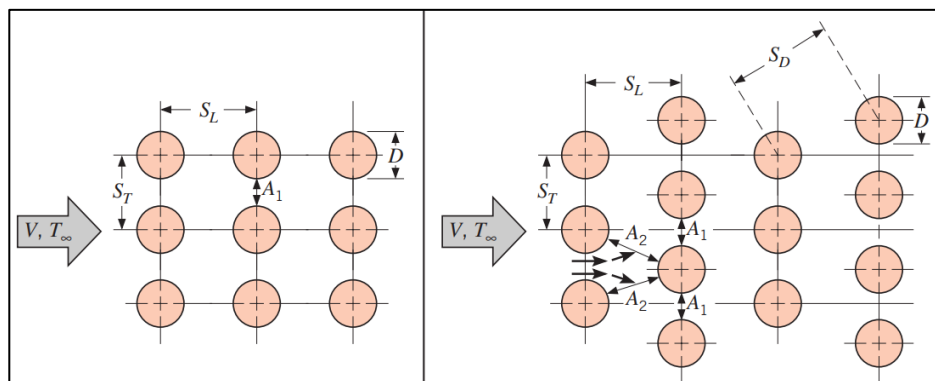


Figura 17. Arreglos para banco de celdas (a) Alineado, (b) escalonado (Incropera et al., 2011)

Oztop y Şahinaslan, (2020) en su estudio; control de la distribución de temperatura para módulos de baterías de iones de litio mediante aletas longitudinales, mediante refrigeración por aire, determinó que el aumento de temperatura se ve afectado por el espaciamiento entre celdas vecinas y la uniformidad de la temperatura, el resultado mejora al implementar un espacio entre celdas moderado. El análisis se repitió para mayores distancias entre baterías, donde $s_T = s_L = 24$ mm para la matriz alineada y $s_T = 20.78$, $s_L = 24$ mm para la disposición escalonada, resultando de que una configuración más amplia tiene un efecto negativo en las temperaturas de la batería y diferencias altas de temperatura entre cada celda lo que afecta el rendimiento del módulo.

De acuerdo a las recomendaciones mencionadas anteriormente, mediante el uso del software SolidWorks® Thermal Simulation se genera la geometría 3D del módulo **Figura 18-19** en la cual se insertarán las baterías y se realizaron ensayos de simulación térmica. Para ello, se propuso emplear Aluminio 1060 para fabricar el módulo. La **Tabla 10** muestra las propiedades termo físicas del material empleado.

Tabla 10. Propiedades termo físicas de aluminio.

Propiedades	Valor
Densidad (kg /m ³)	2700
Capacidad calorífica (J/ kg · K)	0.896
Conductividad térmica (W/m · K)	205

Fuente: Incropera et al. (2011).

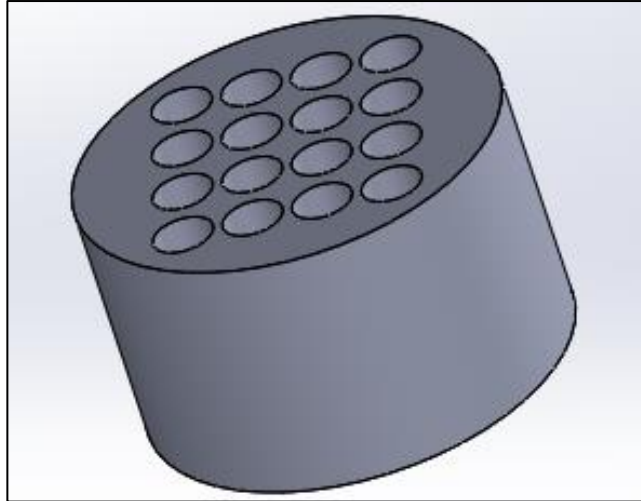


Figura 18. Módulo circular de baterías con base aluminio 1060.

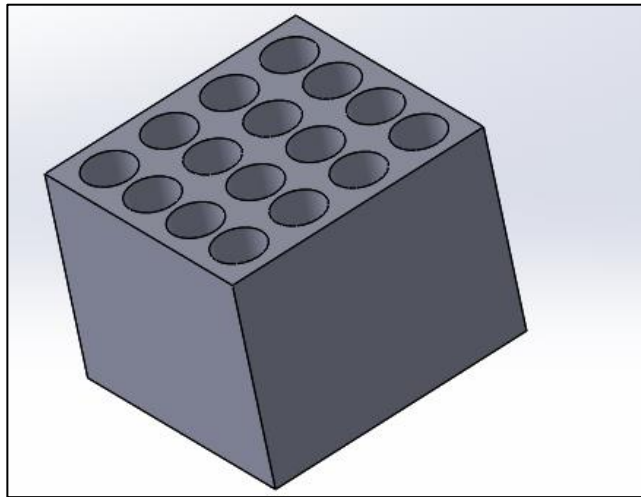


Figura 19. Módulo cuadrado de baterías con base de aluminio 1060.

Para evaluar la efectividad de disipación de calor de los módulos contenedores propuestos, es necesario indicar el coeficiente de convección al cual se encontrará expuesto el módulo. Para ello, se establece que el módulo se encuentra operando en un ambiente de $T_{\infty}=20\text{ }^{\circ}\text{C}$ y se selecciona un coeficiente convectivo $h=11\text{ W/m}^2 \cdot \text{k}$, el mismo que se encuentra dentro de los valores de coeficiente de convección natural expuestos en la **Tabla 11** a una presión de 1 atmósfera.

Tabla 11. Valores de coeficiente de convección hc.

Coeficiente de conductividad ($W/m^2 \cdot K$)	
Convección natural (Gas)	2-25
Convección natural (Líquido)	50-1000
Convección forzada (Gas)	25-250
Convección forzada (Líquido)	50-20000

Fuente: Agueros, 2021.

Las **Figuras 20 y 21** muestran los resultados de la simulación que se obtienen mediante SolidWorks® Thermal Simulation, en la cual se muestra que el módulo contenedor de tipo circular presenta una temperatura más baja con respecto al módulo contenedor tipo cuadrado.

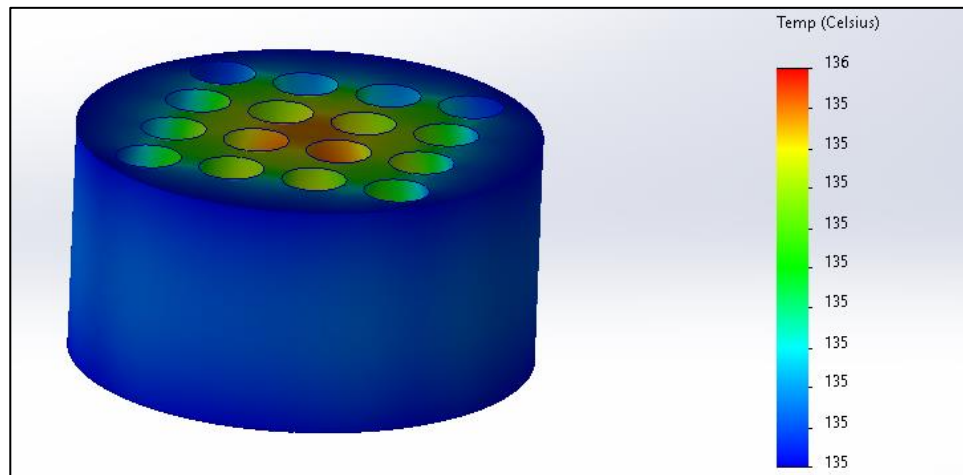


Figura 20. Resultados simulación térmica - Módulo circular de baterías base de aluminio 1060.

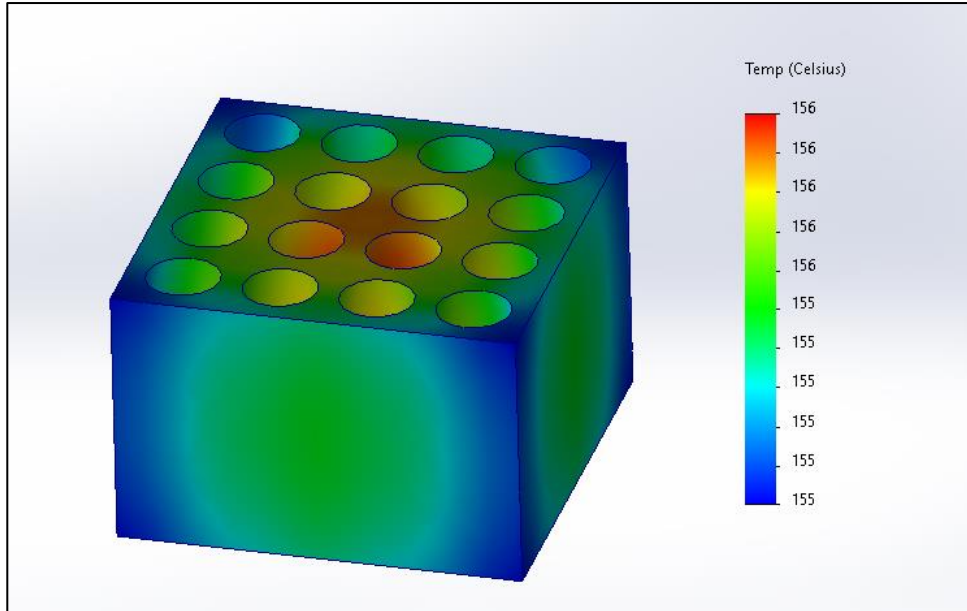


Figura 21. Resultados simulación térmica - Módulo cuadrado de baterías base de aluminio 1060.

6.2. Objetivo 2: Diseñar térmicamente la configuración geométrica de los disipadores de calor tipo aleta en la refrigeración de un módulo de baterías de litio.

6.2.1 Configuración de aleta.

Debido a que en este estudio se pretendió determinar la mejor configuración de arreglo y tipo aleta, se realizó el análisis variando el espesor de aleta (t), longitud (l) y espacio (e) entre aletas y número de las mismas, de esta manera se identificó que configuración permite obtener la temperatura base más baja, mediante simulación.

Para determinar las distintas características de espesor, espaciamiento, longitud y número de aletas se empleó el siguiente procedimiento: mantener constantes todas las variables menos una de ellas, el objetivo fue observar cómo ésta varía en función de la temperatura base que se obtiene mediante simulación y seleccionar la mejor alternativa. Este procedimiento se repitió con todas las variables.

La primera variable que se deseó evaluar fue el espesor, por lo que las otras variables permanecieron constantes: longitud = 30 mm, espaciamiento = 10 mm, número de aletas = 5.

Mediante el software SolidWorks® Thermal Simulation se genera la geometría de los módulos circulares y rectangulares agregando las aletas con las dimensiones ya mencionadas.

Se procedió a variar el espesor en pasos de 1 mm desde 1.5 mm hasta 3.5 mm para observar como la temperatura de la base del módulo varía, cuando varía dicho espesor. Para ello se realizaron 3 modelos de aletas rectangulares y 3 modelos de aletas anulares. Las Figuras 22 – 27 muestran los gráficos obtenidos mediante simulación térmica por medio del software SolidWorks® Thermal Simulation al variar el espesor.

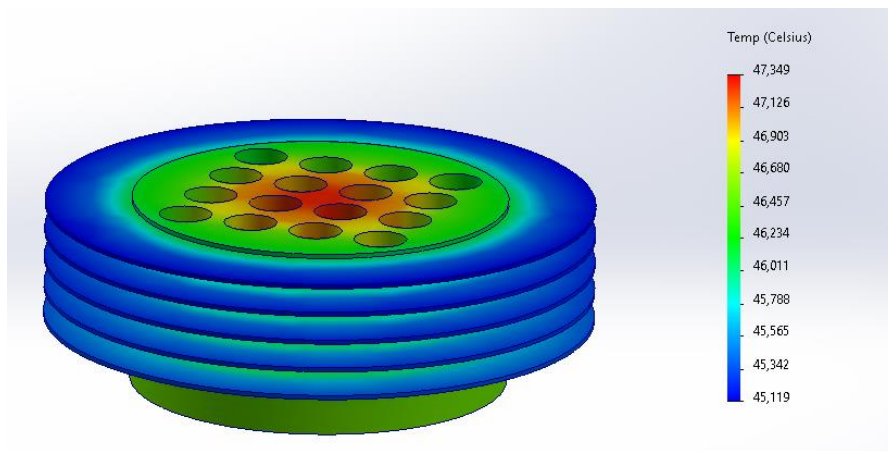


Figura 22. Módulo circular de aluminio 1060 – e = 1.5 mm.

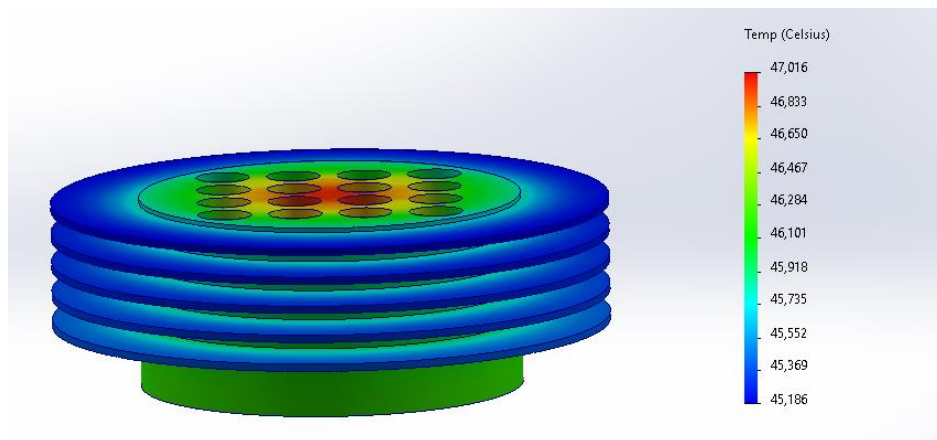


Figura 23. Módulo circular de aluminio 1060 – e = 2.5 mm.

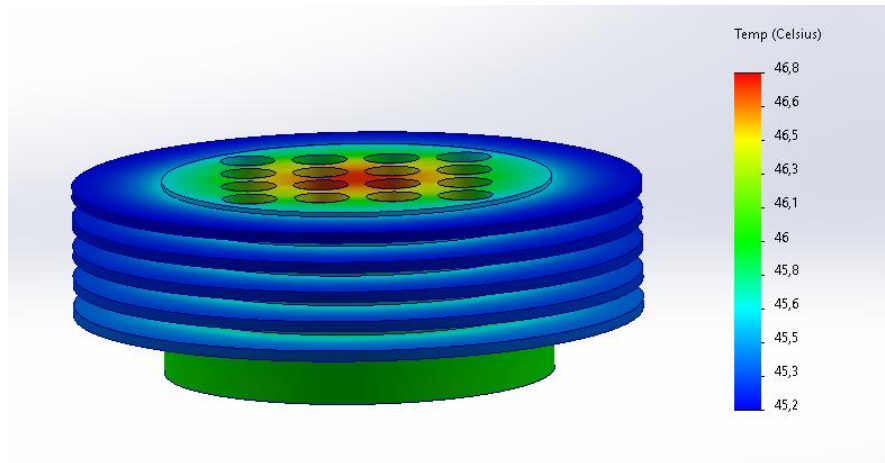


Figura 24. Módulo circular de aluminio 1060 – e = 3.5 mm.

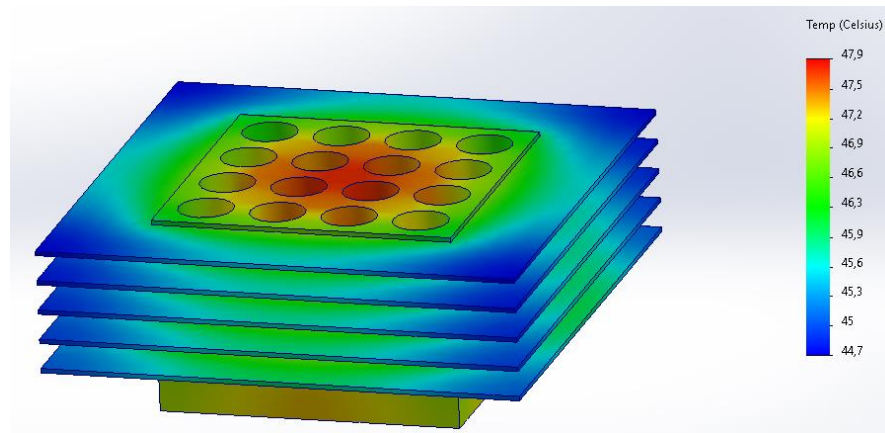


Figura 25. Módulo cuadrado de aluminio 1060– e = 1.5 mm.

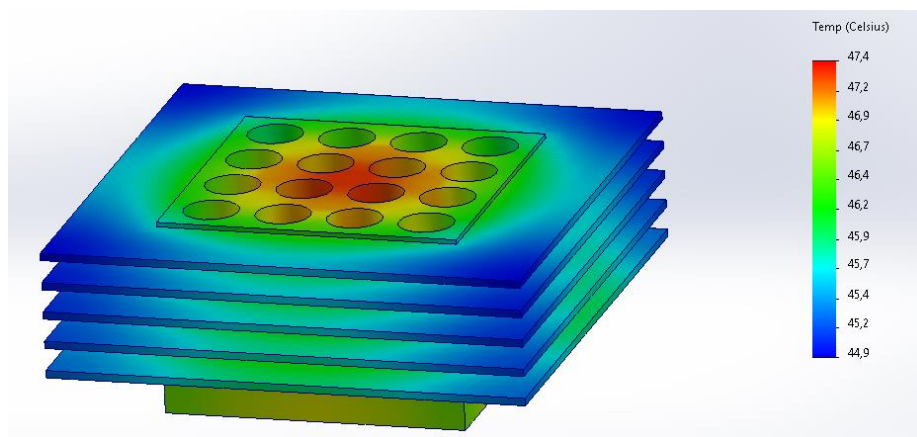


Figura 26. Módulo cuadrado de aluminio 1060 – e = 2.5 mm.

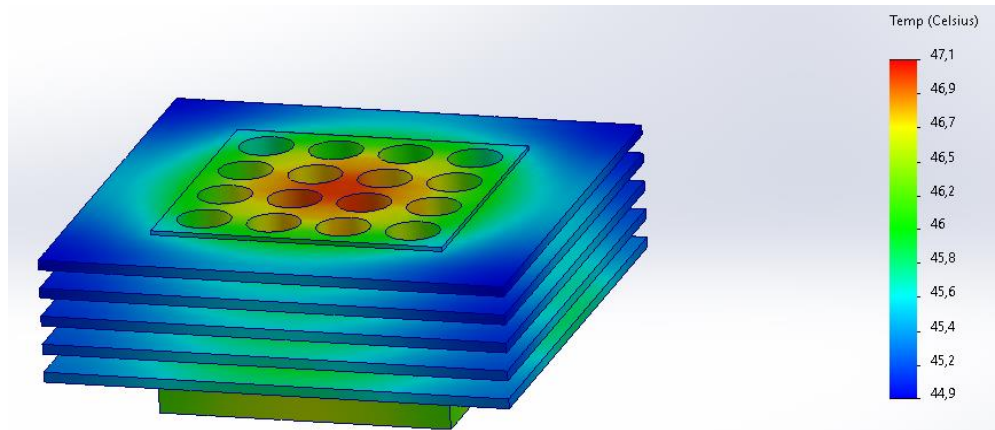


Figura 27. Módulo cuadrado de aluminio 1060 – $e = 3.5$ mm.

Para analizar los resultados se realiza un gráfico en el que se compara la temperatura de la base con el espesor de las aletas, tanto para el módulo cuadrado como para el módulo circular (Ver Figuras 28 – 29).

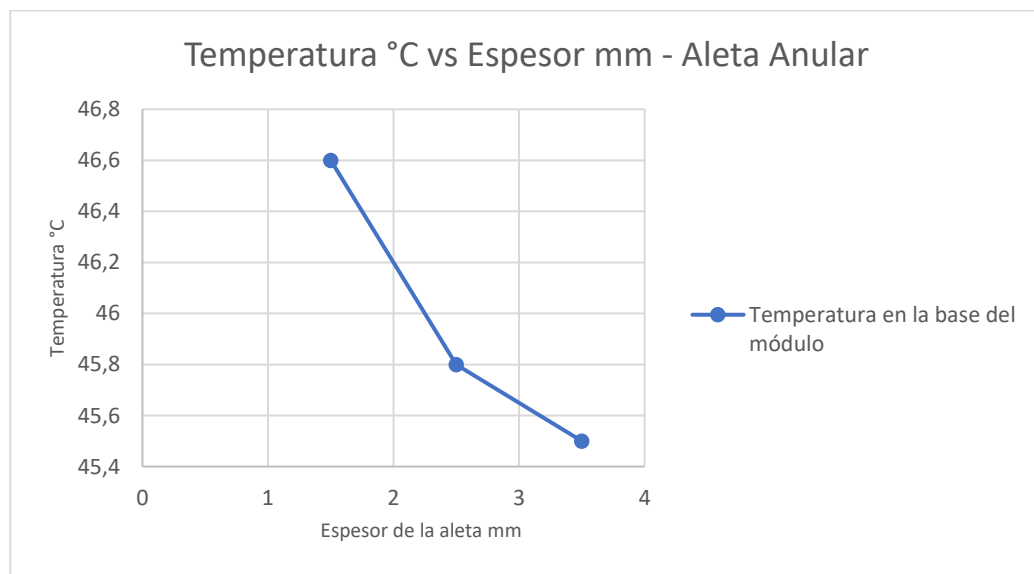


Figura 28. Gráfico Temperatura vs Espesor – Aleta Anular.

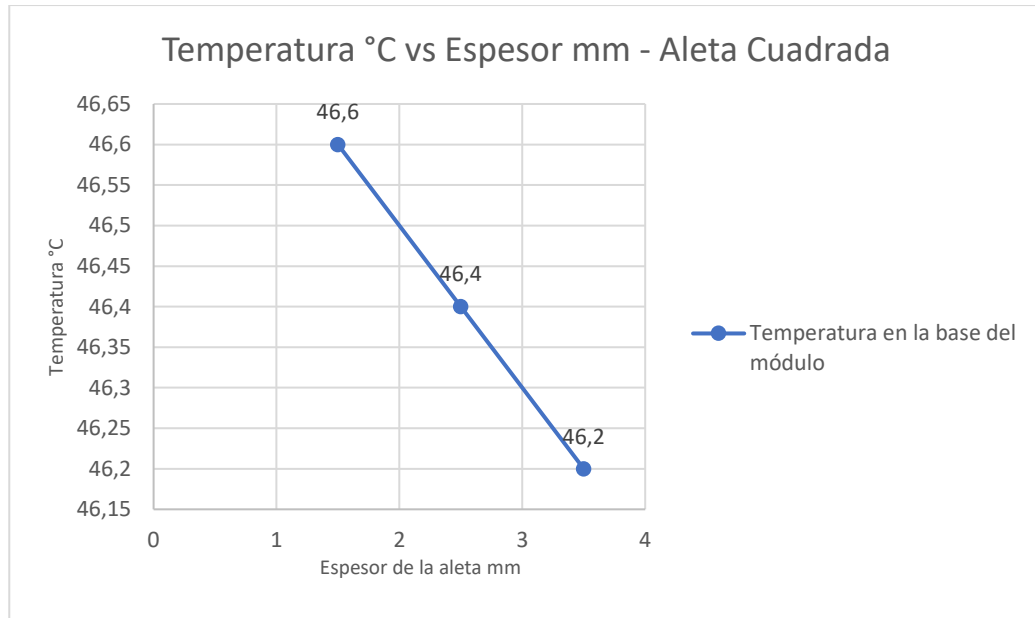


Figura 29. Gráfico Temperatura vs Espesor – Aleta Cuadrada.

Las **Figuras 28 y 29** indican que al aumentar el espesor de la aleta la temperatura de la base del módulo, disminuye. Sin embargo, el cambio de temperatura se encuentra en el orden de 1 °C, por lo que se procede a seleccionar el espesor de 1.5 mm ya que de esta forma se pueden acoplar un mayor número de aletas tanto para el módulo cuadrado como para el módulo circular.

La siguiente variable que se evaluó fue el distanciamiento entre aletas, para ello se mantuvieron constantes el resto de variables: longitud = 30 mm, espesor = 1.5 mm, número de aletas = 5. Se varió el distanciamiento entre aletas en pasos de 2 mm desde 3 mm hasta 7 mm del módulo cuadrado y circular. Las **Figuras 30 – 35** muestran los gráficos obtenidos mediante simulación térmica por medio del software SolidWorks® Thermal Simulation al variar el distanciamiento entre aletas.

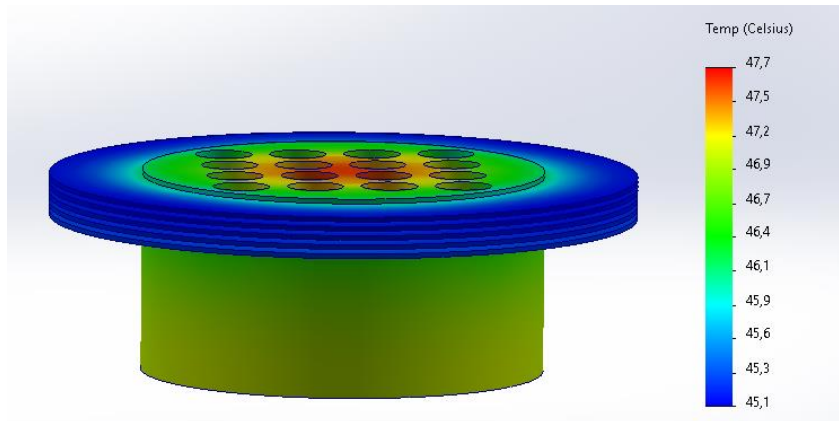


Figura 30. Módulo circular de aluminio 1060 – $d = 3$ mm.

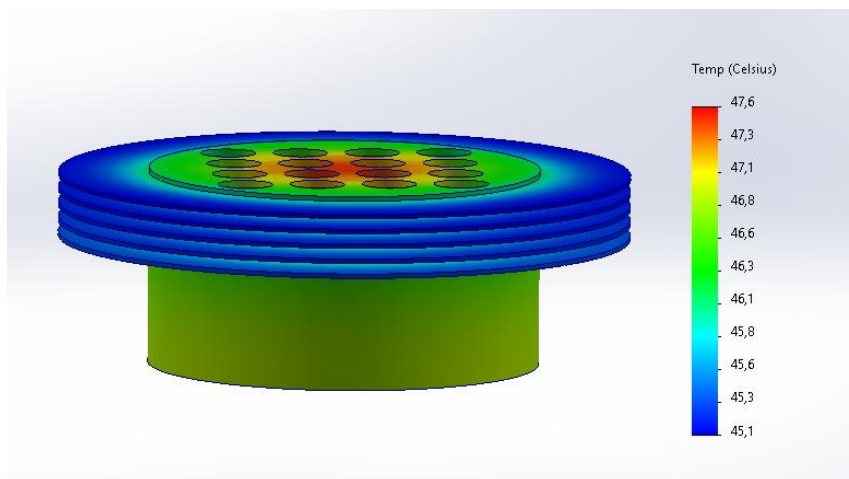


Figura 31. Módulo circular de aluminio 1060 – $d = 5$ mm.

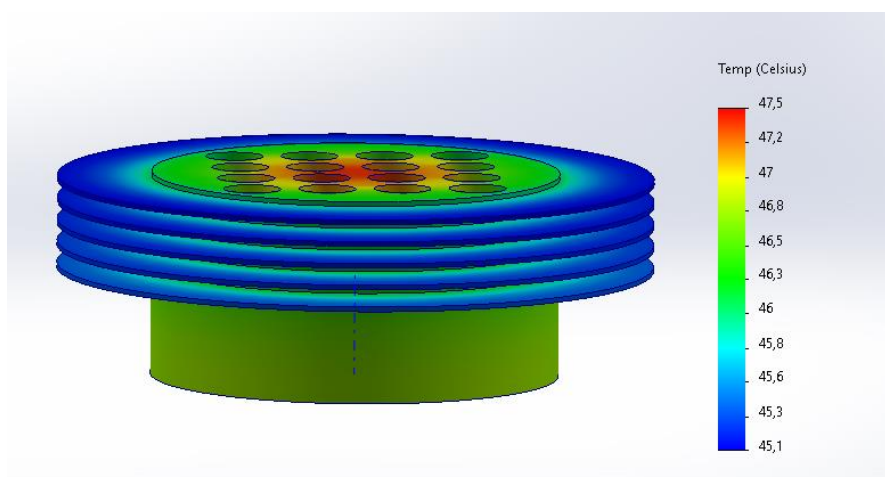


Figura 32. Módulo circular de aluminio 1060 – $d = 7$ mm.

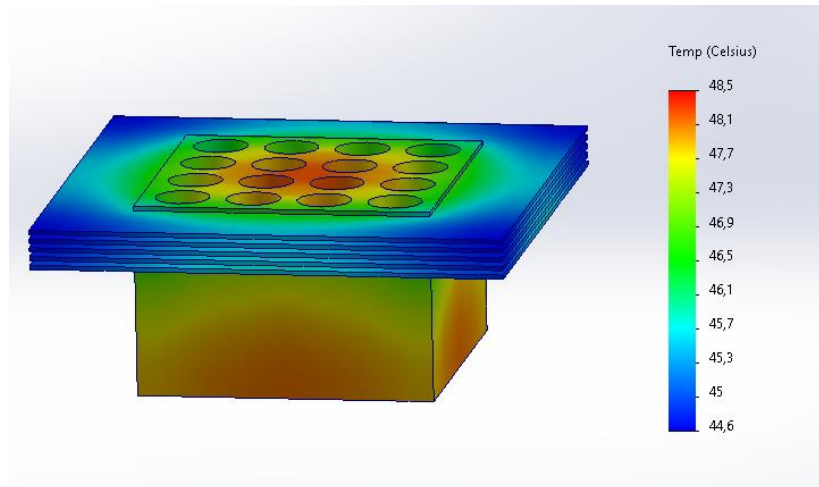


Figura 33. Módulo cuadrado de aluminio 1060 – $d = 3$ mm.

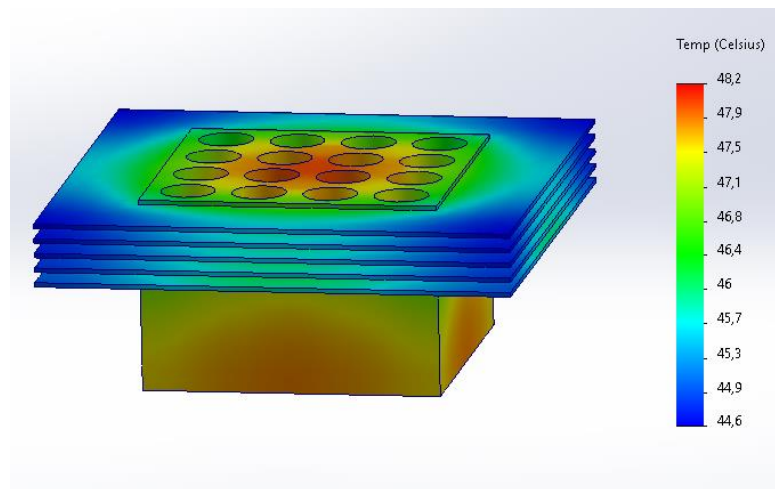


Figura 34. Módulo cuadrado de aluminio 1060 – $d = 5$ mm.

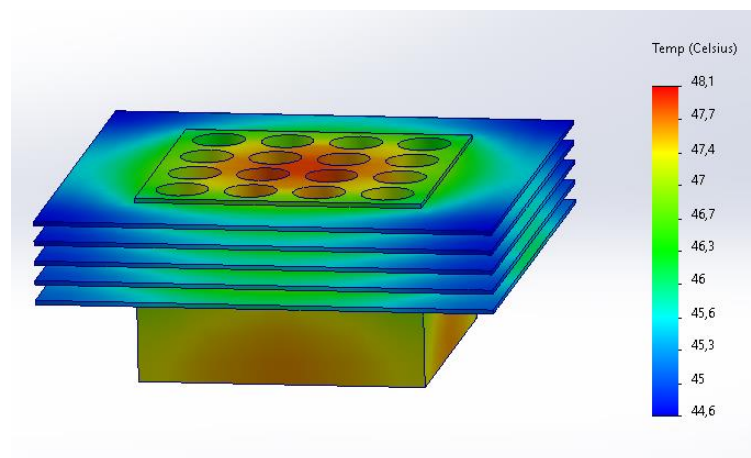


Figura 35. Módulo cuadrado de aluminio 1060 – $d = 7$ mm.

Para analizar los resultados se realizó un gráfico en el que se comparó la temperatura de la base con el distanciamiento de las aletas, tanto para el módulo cuadrado como para el módulo circular (Ver **Figuras 36 – 37**).

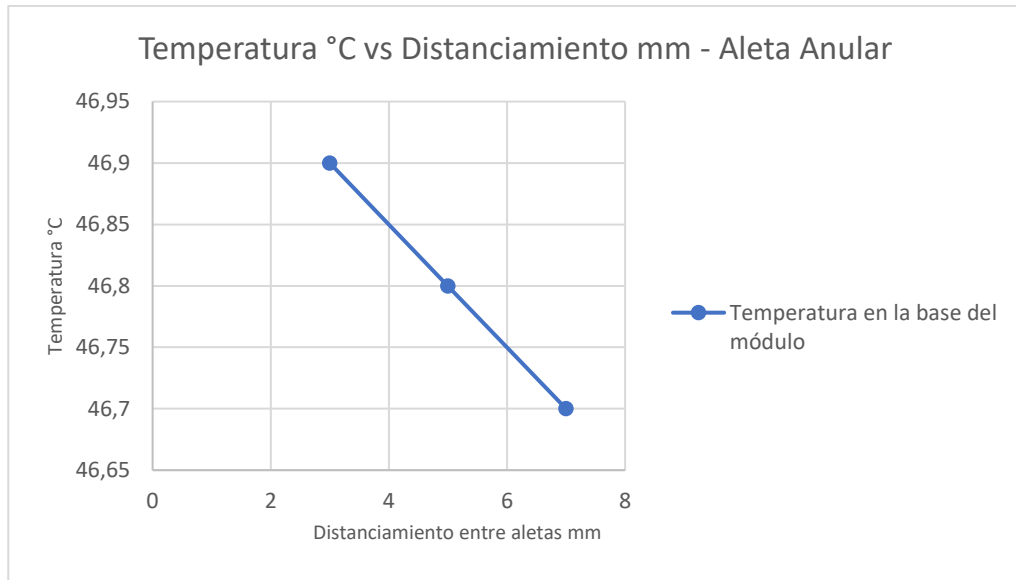


Figura 36. Gráfico Temperatura vs distanciamiento entre aletas – Aleta anular.

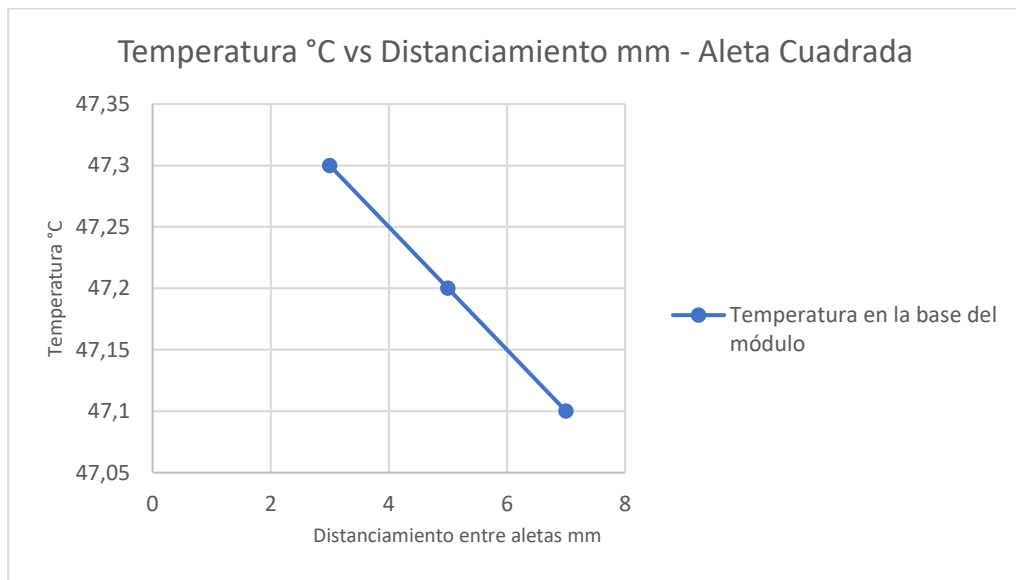


Figura 37. Gráfico Temperatura vs distanciamiento entre aletas – Aleta cuadrada.

Las **Figuras 36 y 37** indican que, al aumentar el distanciamiento entre las aletas, la temperatura de la base del módulo prácticamente permanece constante, por lo que se procede a

seleccionar el distanciamiento de 5 mm ya que de esta forma se pueden acoplar un mayor número de aletas y la fabricación sería más sencilla que si se escogiera un distanciamiento de 3 mm.

La siguiente variable a analizar fue la longitud de las aletas, por lo que se mantuvieron constantes el resto de variables: distanciamiento entre aletas = 5 mm, espesor = 1.5 mm, número de aletas = 5. Se varía la longitud en pasos de 10 mm desde 25 mm hasta 45 mm, para determinar cómo cambia la temperatura del módulo cuadrado y circular con respecto a esta variable. Las **Figuras 38 – 43** muestran los gráficos obtenidos mediante simulación térmica por medio del software SolidWorks® Thermal Simulation al variar la longitud de las aletas.

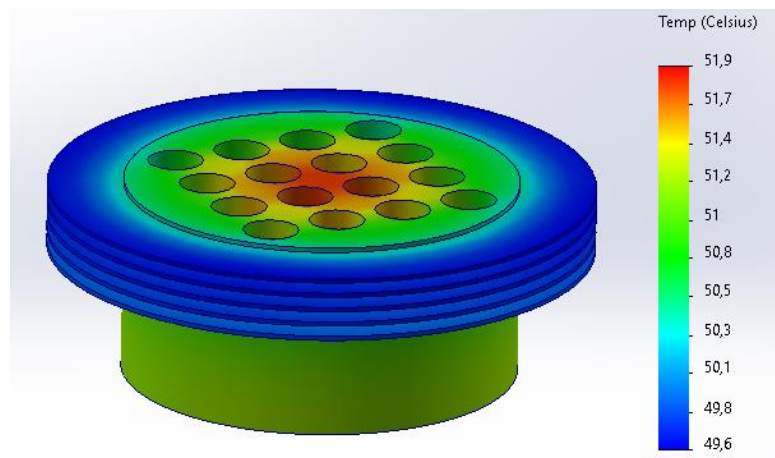


Figura 38. Módulo circular de aluminio 1060 – L = 25 mm.

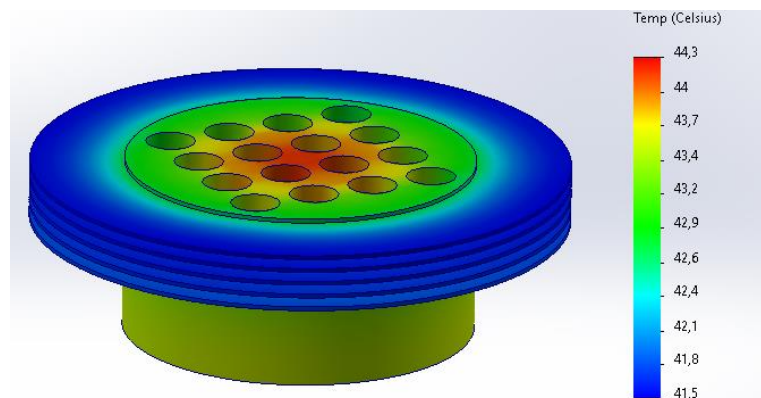


Figura 39. Módulo circular de aluminio 1060 – L = 35 mm.

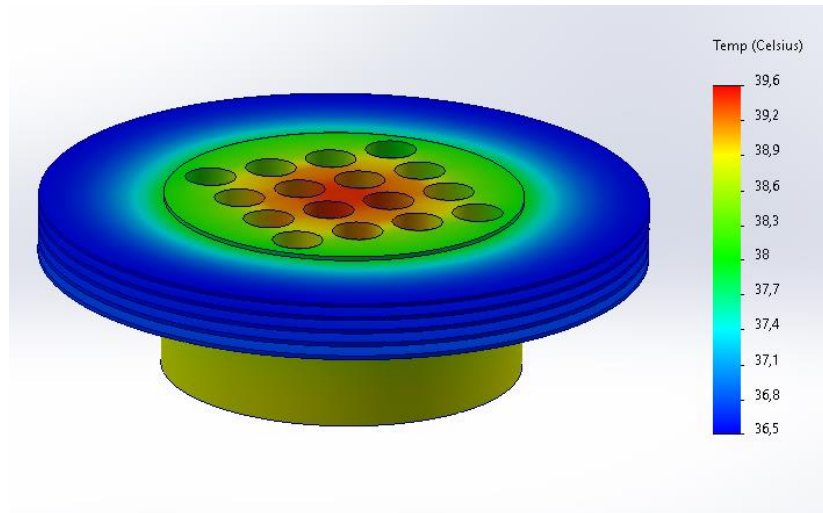


Figura 40. Módulo circular de aluminio 1060 – L = 45 mm.

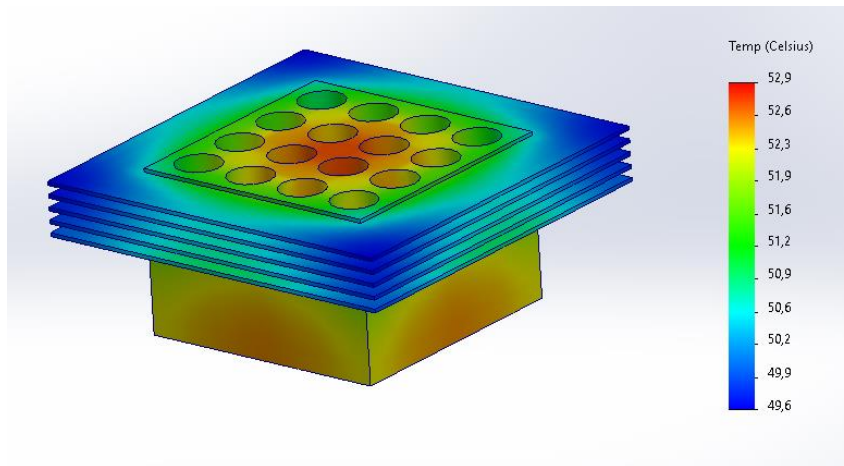


Figura 41. Módulo cuadrado de aluminio 1060 – L = 25 mm.

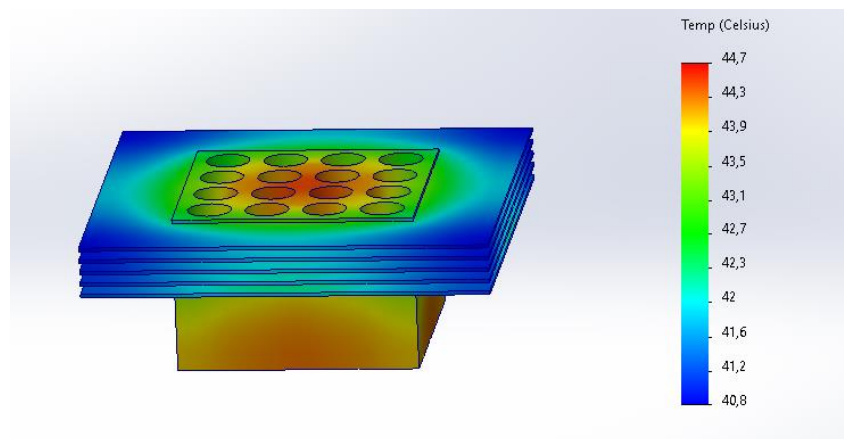


Figura 42. Módulo cuadrado de aluminio 1060 – L = 35 mm.

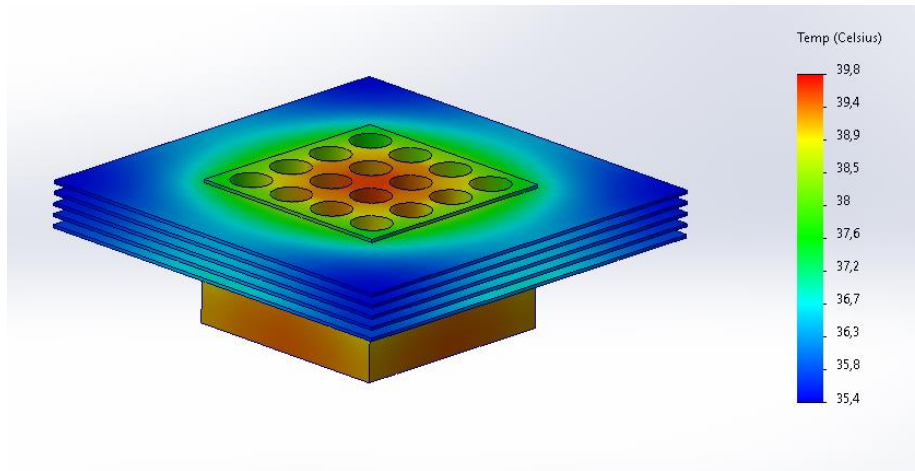


Figura 43. Módulo cuadrado de aluminio 1060 – L = 45 mm.

Para analizar los resultados se realizó un gráfico en el que se comparó la temperatura de la base con la longitud de las aletas, tanto para el módulo cuadrado como para el módulo circular. (Ver Figuras 44 – 45).

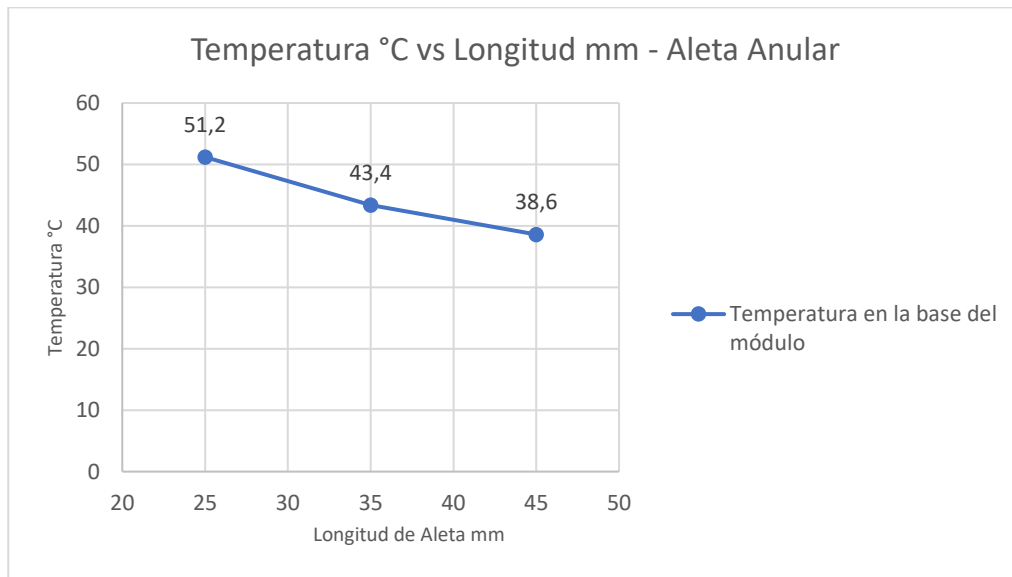


Figura 44. Gráfico Temperatura vs longitud de aleta – Aleta anular.

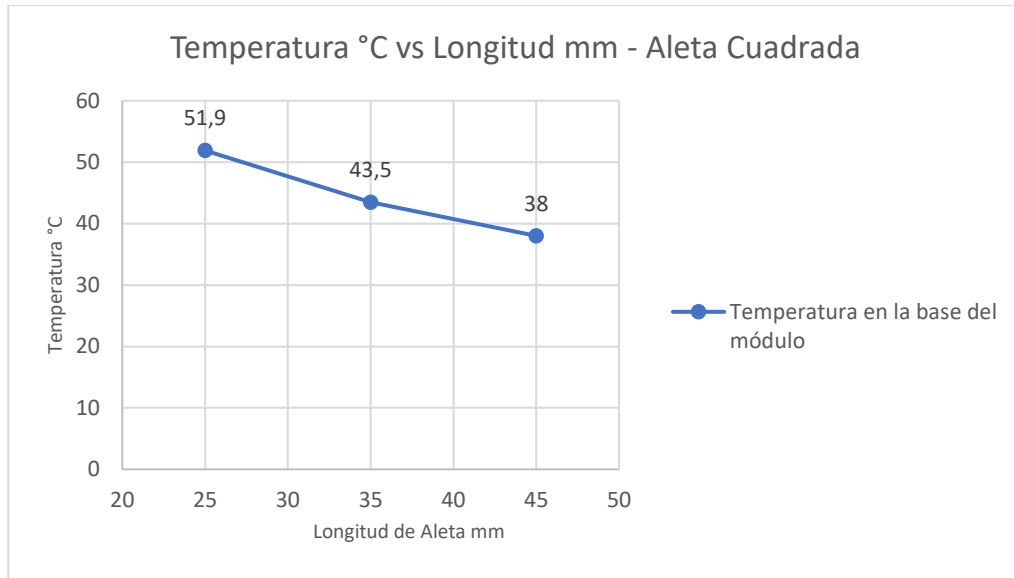


Figura 45. Gráfico Temperatura vs longitud de aleta – Aleta cuadrada.

Se puede apreciar que, al incrementar la longitud de las aletas, la temperatura de la base disminuye. Sin embargo, al trabajar con aletas demasiado largas estas pueden tender a romperse debido a que presentan un espesor bajo, por lo que se selecciona la aleta de 35 mm de longitud para ambos módulos.

Para evaluar la variable número de aletas, se mantuvieron constantes el resto de variables: distanciamiento entre aletas = 5 mm, espesor = 1.5 mm, longitud = 35 mm. Se varía el número de aletas en pasos de 3, desde 7 hasta 13 aletas. Las **Figuras 46 – 51** muestran los gráficos obtenidos mediante simulación térmica por medio del software SolidWorks® al variar el número de aletas.

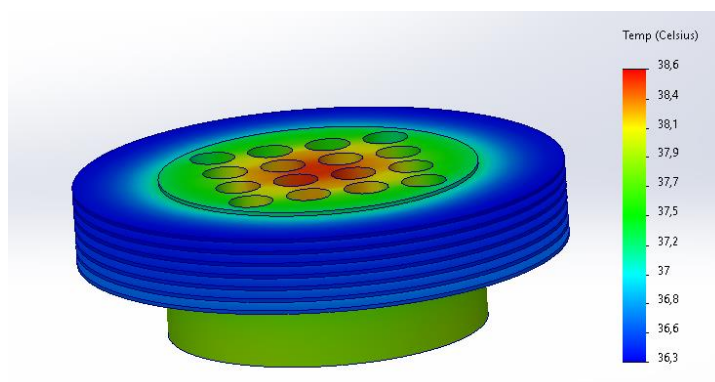


Figura 46. Módulo circular de aluminio 1060– N = 7 aletas.

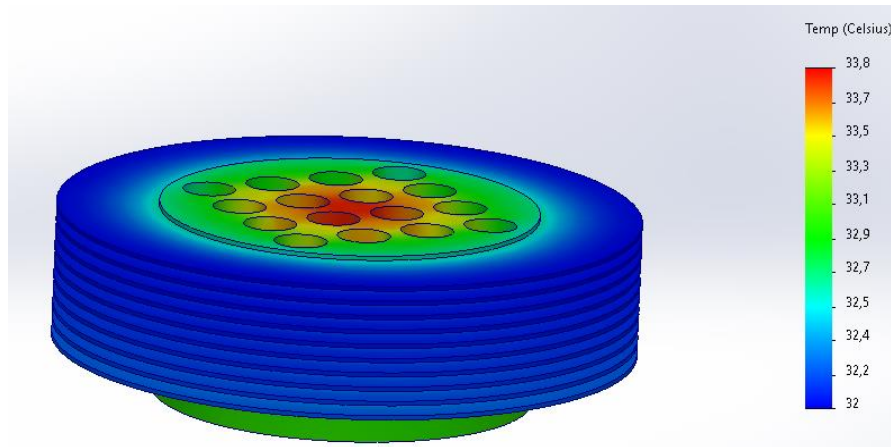


Figura 47. Módulo circular de aluminio 1060 – N = 10 aletas.

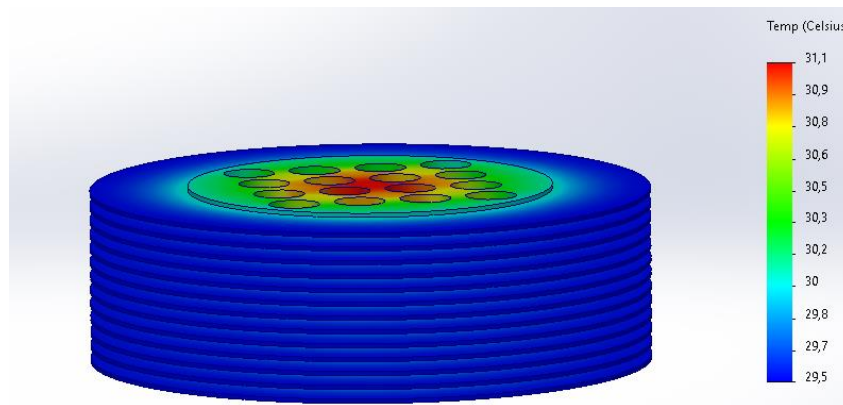


Figura 48. Módulo circular de aluminio 1060– N = 13 aletas.

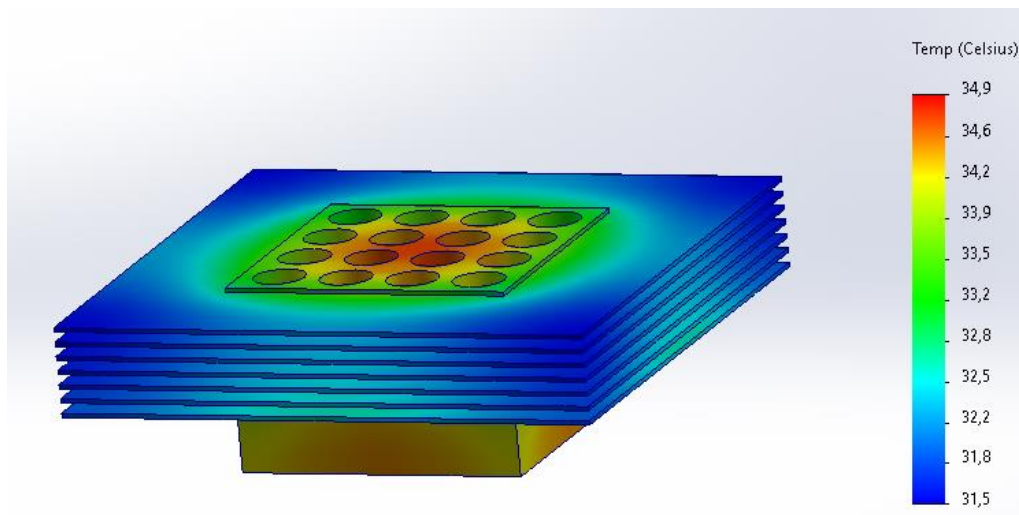


Figura 49. Módulo cuadrado de aluminio 1060– N = 7 aletas.

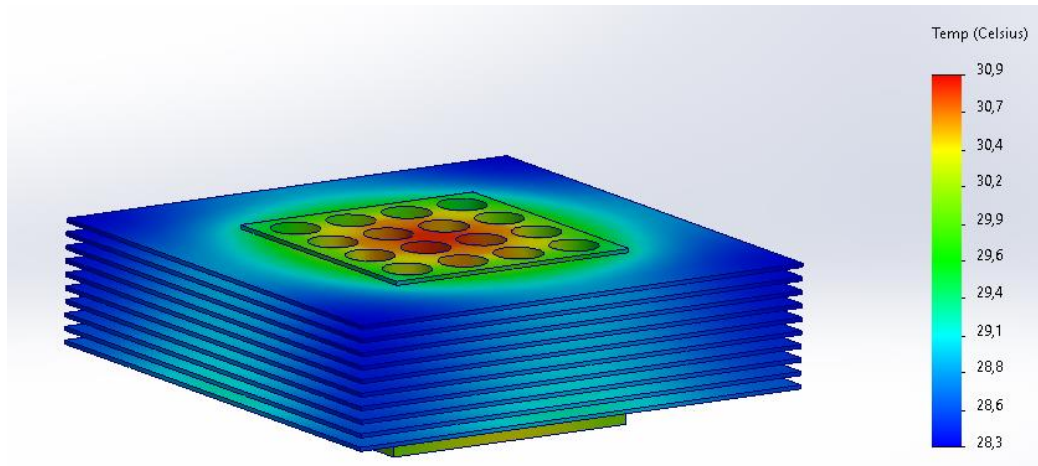


Figura 50. Módulo cuadrado de aluminio 1060– N = 10 aletas.

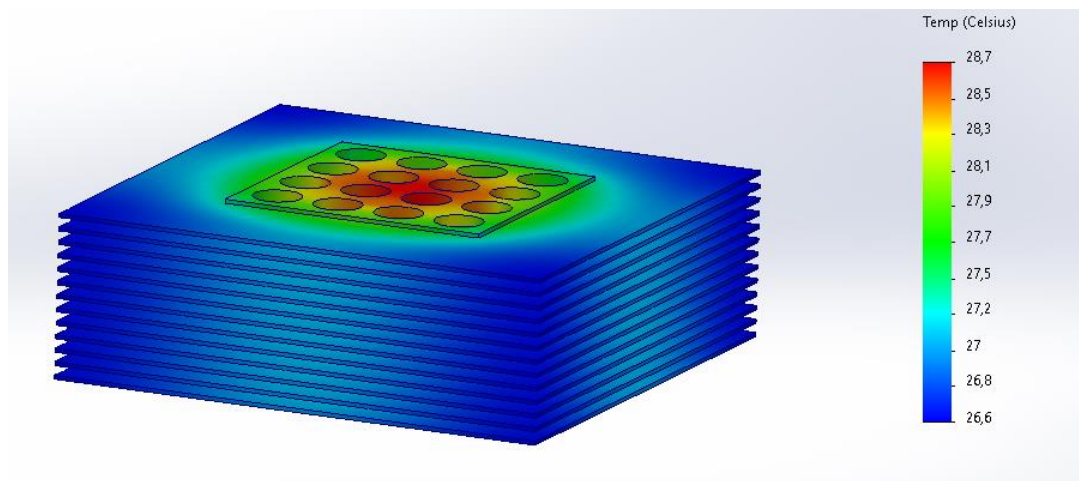


Figura 51. Módulo cuadrado de aluminio 1060– N = 13 aletas.

Para analizar los resultados se realizó un gráfico en el que se comparó la temperatura de la base con el número de aletas, tanto para el módulo cuadrado como para el módulo circular. (Ver **Figuras 52 – 53**).

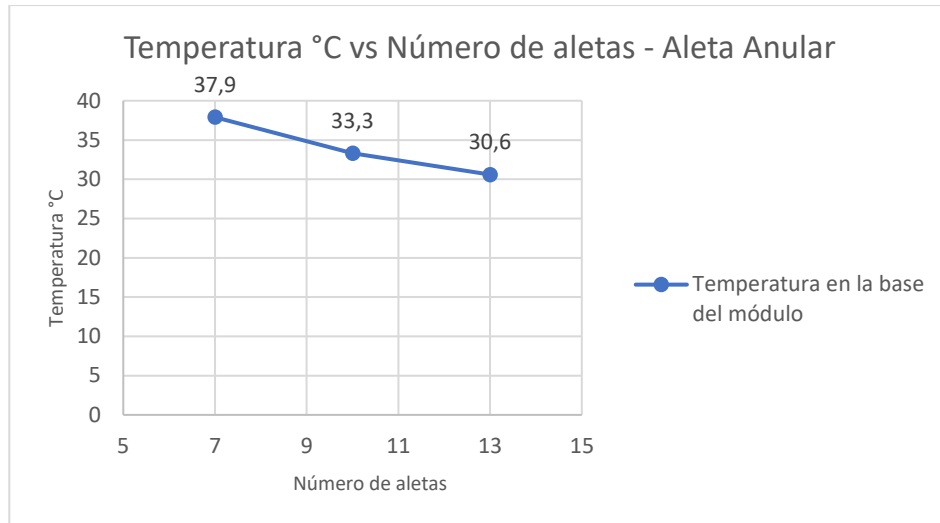


Figura 52. Gráfico Temperatura vs número de aletas – Aleta anular.

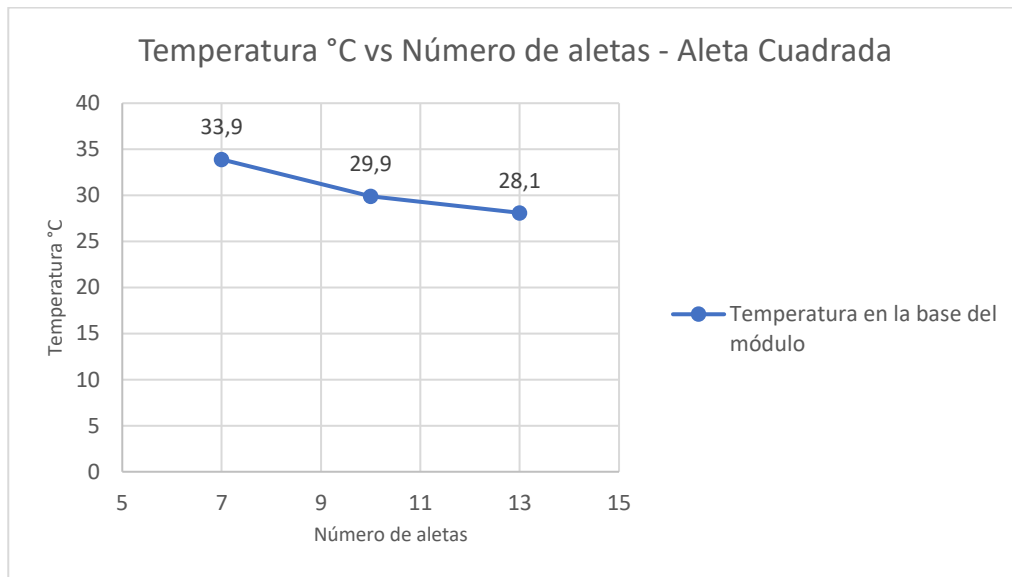


Figura 53. Gráfico Temperatura vs número de aletas – Aleta cuadrada.

Las **Figuras 52** y **53** muestran que, al variar el número de aletas, la temperatura de la base disminuye su valor por este motivo se trabaja con el mayor número de aletas que se puedan acoplar, es decir con 13 aletas. Para comparar los resultados obtenidos se emplea la **Tabla 12** que se muestra a continuación.

Tabla 12. Temperaturas de la base del módulo contenedor de baterías de aletas cuadradas y anulares, al variar parámetros geométricos.

	Espesor mm			Espaciamiento mm			Longitud mm			Número de aletas		
	1.5	2.5	3.5	3	5	7	25	35	45	7	10	13
Temperatura base °C Aletas anulares	46.60	45.8	45.5	46.9	46.8	46.7	51.2	43.4	38.6	37.9	33.3	30.6
Temperatura base °C Aletas cuadradas	46.6	46.4	46.2	47.3	47.2	47	51.9	43.5	38	33.9	29.9	28.1

Al comparar los resultados del módulo cuadrado y el módulo circular, tomando en cuenta todas las variables mencionadas, se observa que la temperatura de la base del módulo cuadrado es menor que la temperatura de la base del módulo circular. Sin embargo, debido a la diferencia mínima que ambas presentan, se selecciona el modelo circular para facilitar el proceso de fabricación.

Para determinar la validez del módulo seleccionado y su arreglo de aletas respectivo, se realizó un análisis térmico del prototipo seleccionado anteriormente, para ello, se realiza un flujograma en el cual se presentan los cálculos, actividades y operaciones a realizar. (Ver **Anexo 1**)

Determinar el calor producido por el módulo de baterías. Para cuantificar el valor total del calor que se genera en el módulo primero se definió el calor generado **Ecuación 29** por efecto de resistencia eléctrica (Ramírez 2020).

$$Q_g = i^2 * R_c \quad (29)$$

Donde:

i es la corriente de descarga.

R_c es la resistencia interna de la batería.

Cabe recalcar que el calor generado en una batería puede generarse por distintas manifestaciones químicas, o por su efecto como resistencia eléctrica Darío Delgado E. (2019), realizó un test donde combina altos pulsos de corriente de descarga y carga, con las variaciones de intensidad y de voltaje medidas se puede hallar la resistencia interna de la batería, mediante las pruebas realizadas experimentalmente afirma que la resistencia interna promedio es de 35 mΩ en descarga.

Mediante los valores obtenidos en las **Tablas 5 y 6** donde se encuentran las características nominales de la celda, se tiene una tasa máxima de descarga de 10 A y la resistencia interna 35 mΩ, en base a la **Ecuación 29** se obtuvo:

$$Q_g = (10 \text{ A})^2 \cdot 35 \text{ m}\Omega = 3.5 \text{ W}$$

Siendo Q_g el calor máximo generado por la celda ICR18650-22P.

$$Q_{\text{Total}} = Q_g \cdot n \quad (30)$$

Donde, Q_g representa el calor generado por una batería y n es el número de baterías que componen el arreglo. En el caso actual, de acuerdo a las baterías seleccionadas, Q_g es igual a 3.5 W y n es igual a 16, por lo que el calor total generado es 56 W. El valor del calor generado total, mediante el uso del software SolidWorks®, se aplica sobre el espacio donde se ubican las baterías.

6.2.2 Ecuación del proceso de transferencia de calor.

Para determinar la ecuación que describe el fenómeno de transferencia de calor, se hace uso del diagrama mostrado en la **Figura 54**, a partir del cual se define la **Ecuación 31**.

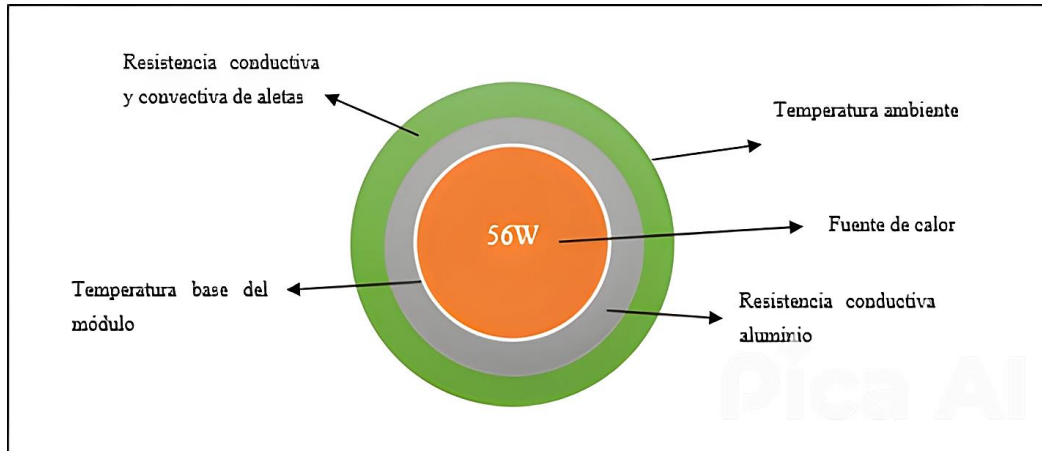


Figura 54. Módulo de baterías con aletas circulares $L = 35$ mm.

$$q = \frac{T_{\text{Módulo}} - T_{\text{Ambiente}}}{R_{\text{Conducción_Pared}} + R_{\text{Conducción_Aletas}}} \quad (31)$$

El fenómeno se modela como un problema de generación de potencia interna de 56 W que se aplica sobre la pared circular del módulo de las baterías. El calor se transmite por conducción a través de la pared circular y por conducción y convección a través del arreglo de aletas. Para determinar la temperatura a la cual se encuentra el módulo que contiene las baterías, se debe calcular la resistencia conductiva de la pared térmica, la resistencia conductiva del arreglo de aletas y la resistencia convectiva del aire circundante.

Cálculo de resistencia térmica de conducción. Para determinar la resistencia térmica de conducción en la pared, se toma en cuenta que el espesor de la pared es de 5 mm y la longitud del cilindro es de 70 mm, además se trabaja con aluminio 1060, mediante la **Tabla 10** se obtiene la conductividad térmica 205 (W/m · K). Por medio de la **Ecuación 32** se puede calcular el valor de resistencia térmica en pared de cilindros circulares.

$$R_{\text{Conducción_Pared}} = \frac{\ln \frac{r_{\text{ext}}}{r_{\text{int}}}}{2\pi \cdot k_{\text{Al}} \cdot L} \quad (32)$$

Al reemplazar los valores correspondientes, se determina la resistencia a la conducción en la pared cilíndrica.

$$R_{\text{Conducción_Pared}} = \frac{\ln \frac{0.065 \text{ m}}{0.0625 \text{ m}}}{2\pi \cdot (205 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}})(0.07 \text{ m})} = 0.0026 \frac{\text{K}}{\text{W}}$$

Cálculo de resistencia térmica de convección. Para determinar la resistencia térmica de convección, primero se calcula el coeficiente convectivo del aire. Para ello es necesario determinar los números de Rayleigh, Prandtl y Nusselt, que son función de las propiedades termo-físicas del aire a la temperatura dada (Ver **Anexo 2**). Para calcular el número de Rayleigh se emplea la **Ecuación 33** mencionada en el marco teórico.

$$Ra = \frac{g \cdot \beta \cdot (T_s - T_\infty) \cdot L_c^3}{\gamma^2} \cdot Pr \quad (33)$$

Donde la g es valor de la gravedad ($9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$), β es el coeficiente de expansión volumétrica del aire evaluado a temperatura promedio entre la temperatura superficial de la aleta $50 \text{ }^\circ\text{C}$ y la temperatura ambiente $20 \text{ }^\circ\text{C}$, con lo que se determina un $T_f = 35 \text{ }^\circ\text{C}$ y el coeficiente de expansión ($0.0286 \frac{1}{\text{K}}$). La diferencia de temperaturas ($T_s - T_\infty$) es la superficie de la base y el aire, debido a que el valor de temperatura superficial varía es necesario asumir un valor de temperatura de la aleta ($50 \text{ }^\circ\text{C}$) para realizar el cálculo y posteriormente, determinar la temperatura real de la superficie, mediante un proceso iterativo.

Para el primer cálculo se trabaja con una diferencia de temperaturas de $30 \text{ }^\circ\text{C}$ que se obtiene al restar la temperatura asumida menos la temperatura ambiente. L_c es la longitud característica que se calcula como la relación entre el área y el perímetro de las superficies que se encuentran expuestas al aire circundante, γ es la viscosidad cinemática que se calcula al dividir la viscosidad

dinámica sobre la densidad evaluada a 35 °C ($\gamma = \frac{\mu}{\delta} = \frac{18.25 \cdot 10^{-6} \frac{\text{kg}}{\text{m}\cdot\text{s}}}{1.204 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 16.54 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$, finalmente

Pr corresponde al número de Prandlt evaluado a 35 °C.

La **Figura 52** muestra un esquema en el que se aprecia la superficie de la aleta y la superficie que no contiene aleta a partir de la cual se realizan los cálculos.

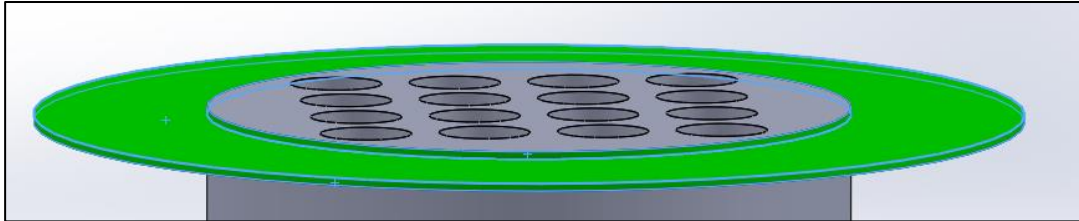


Figura 55. Superficies de módulo con aleta y sin aleta.

$$L_c = \frac{\text{Superficie de la aleta} + \text{Superficie sin aleta}}{\text{Perímetro de la aleta} + \text{Perímetro de superficie sin aleta}}$$

Para calcular la longitud característica, se determina el área superficial de la aleta más el área de la superficie que no contiene aletas y se las divide para su respectivo perímetro.

$$L_c = \frac{(2 \cdot \pi \cdot ((100 \text{ mm})^2 - (65 \text{ mm})^2)) + (2\pi \cdot 100 \text{ mm} \cdot 1.5 \text{ mm}) + (2\pi \cdot 65 \text{ mm} \cdot 3.5 \text{ mm})}{2 \cdot (2\pi \cdot 100 \text{ mm} + 1.5 \text{ mm}) + 2 \cdot (2\pi \cdot 65 \text{ mm} + 3.5 \text{ mm}) + 2 \cdot (2\pi \cdot 100 \text{ mm} + 2\pi \cdot 65 \text{ mm})}$$

$$L_c = 622 \text{ mm} = 0.622 \text{ m}$$

Al reemplazar los valores obtenidos en la **Ecuación 26**, se determina el número de Rayleigh.

$$Ra = \frac{9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 0.0286 \frac{1}{\text{C}} \cdot (50 \text{ °C} - 20 \text{ °C}) \cdot (0.622 \text{ m})^3}{(16.54 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}})^2} \cdot 0.7268$$

$$Ra = 538110365.443$$

Para calcular el número de Nusselt se emplea la **Ecuación 34**.

$$Nu = 0.15 Ra^{\frac{1}{3}} \tag{34}$$

$$Nu = 0.15(538110365.443)^{\frac{1}{3}}$$

$$\text{Nu} = 269.948$$

Para determinar el coeficiente de convección se utiliza la **Ecuación 35**.

$$h = \frac{\text{Nu} \cdot k}{L_c} \quad (35)$$

Al reemplazar los datos obtenidos de tablas de propiedades termo-físicas del aire y los valores calculados de Nusselt y L_c se puede determinar el coeficiente de convección.

$$h = \frac{269.948 \cdot 0.02525 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}}{0.639 \text{ m}} = 11.089 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

Cálculo de resistencia térmica del arreglo de aletas. Para determinar la resistencia térmica del arreglo de aletas es necesario primero determinar la eficiencia térmica de una aleta, por medio de la **Ecuación 36**.

$$n_f = C_2 \frac{K_1(mr_1)I_1(mr_{2c}) - I_1(mr_1)K_1(mr_{2c})}{I_0(mr_1)K_1(mr_{2c}) + K_0(mr_1)I_1(mr_{2c})} \quad (36)$$

Donde los subíndices K, I hacen referencia a funciones de Bessel de primer y segundo orden. El valor de la constante C_2 , m y r_{2c} se calculan mediante las siguientes expresiones.

$$C_2 = \frac{2r_1}{m(r_{2c}^2 - r_1^2)}$$

$$m = \left(\frac{2h}{kt}\right)^{\frac{1}{2}}$$

$$r_{2c} = r_2 + \frac{t}{2}$$

Al reemplazar los valores por sus respectivas variables geométricas se obtienen las constantes y se puede determinar la eficiencia de la aleta.

$$m = \left(\frac{2(11.089 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}})}{(205 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}})(0.0015 \text{ m})}\right)^{\frac{1}{2}} = 8.493$$

$$r_{2c} = 0.1 \text{ m} + \frac{0.0015 \text{ m}}{2} = 0.1015 \text{ m}$$

$$C_2 = \frac{\frac{2(0.065 \text{ m})}{(11.089)}}{((0.1015 \text{ m})^2 - (0.065 \text{ m})^2)} = 2.583$$

$$n_f = 2.583 \frac{K_1(8.493 \cdot 0.0375)I_1(8.493 \cdot 0.07925) - I_1(8.493 \cdot 0.0375)K_1(8.493 \cdot 0.07925)}{I_0(8.493 \cdot 0.0375)K_1(8.493 \cdot 0.07925) + K_0(8.493 \cdot 0.0375)I_1(8.493 \cdot 0.07925)}$$

$$n_f = 2.583 \frac{K_1(0.318)I_1(0.673) - I_1(0.318)K_1(0.673)}{I_0(0.318)K_1(0.673) + K_0(0.318)I_1(0.673)} = 0.963$$

Una vez calculado la eficiencia de una aleta, mediante la **Ecuación 37** se calcula la eficiencia térmica del arreglo.

$$n_o = 1 - \frac{NA_f}{A_t} (1 - n_f) \quad (37)$$

Donde:

$$A_f = 2\pi(r_{2c}^2 - r_1^2)$$

$$A_t = NA_f + A_b$$

Donde, A_t es el área total, N es el número de aletas, A_f es el área de las aletas y A_b es el área de la base. Al reemplazar los valores correspondientes se determina el valor de eficiencia del arreglo.

$$A_f = 2\pi(r_{2c}^2 - r_1^2)$$

$$A_f = 2\pi(0.1015^2 - 0.065^2) = 0.037 \text{ m}^2$$

$$A_{re} = 2\pi \cdot r_1 \cdot t = 6.126 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$A_b = 2\pi \cdot r_1 \cdot Lt$$

$$A_b = 2\pi \cdot 0.065 \text{ m} \cdot 0.065 \text{ m} = 0.027 \text{ m}^2$$

$$A_{\text{sin aletas}} = A_b - NA_{re}$$

$$A_{\text{sin aletas}} = 0.027 \text{ m}^2 - 13 \cdot 6.126 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 = 0.019 \text{ m}^2$$

$$A_t = 13 \cdot 0.27 + 0.019 = 0.503 \text{ m}^2$$

$$n_o = 1 - \frac{13 \cdot 0.037}{0.503} (1 - 0.975) = 0.976$$

Una vez calculada la eficiencia del arreglo, se procede a determinar la resistencia térmica del arreglo mediante la **Ecuación 38**.

$$R_{\text{Arreglo}} = \frac{1}{h \cdot A_t \cdot n_o} \quad (38)$$

$$R_{\text{Arreglo}} = \frac{1}{11.089 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \cdot 0.503 \text{ m}^2 \cdot 0.976} = 0.1836 \frac{\text{K}}{\text{W}}$$

Cálculo de temperatura del módulo. Una vez determinados todos los valores correspondientes, mediante el uso de la **Ecuación 29**, se calcula la temperatura del módulo que contiene las baterías.

$$q = \frac{T_{\text{Módulo}} - T_{\text{Ambiente}}}{R_{\text{Conducción_Pared}} + R_{\text{Conducción_Aletas}}}$$

$$56 \text{ W} = \frac{T_{\text{Módulo}} - 293.15 \text{ K}}{0.0026 \frac{\text{K}}{\text{W}} + 0.1836 \frac{\text{K}}{\text{W}}}$$

$$T_{\text{Módulo1}} = 303.577 \text{ K}$$

$$T_{\text{Módulo1}} = 30.427 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\text{error1} = \frac{T_{\text{asumido}} - T_{\text{calculado}}}{T_{\text{asumido}}} = \frac{50 \text{ }^\circ\text{C} - 30.427 \text{ }^\circ\text{C}}{50 \text{ }^\circ\text{C}} = 0.391$$

$$\% \text{ error1} = 0.391 \cdot 100 \% = 39.118 \%$$

Al conocer la temperatura de la superficie, se procede con una nueva iteración para determinar el número de Rayleigh que afecta al número de Nusselt, al valor del coeficiente convectivo y esto a su vez a la temperatura del módulo. Debido a que el valor de temperatura adoptado inicial fue de 50 °C y los resultados indican que la temperatura de la superficie de la aleta

es de 30.427 °C se realiza una nueva iteración, las propiedades termo-físicas del fluido se determinan nuevamente del promedio de temperaturas, que resulta de un Tf = 25.213 °C al realizar la interpolación se tiene:

$$Ra = \frac{9.81 \frac{m}{s^2} \cdot 0.0397 \frac{1}{C} \cdot (30.427 - 20) \cdot (0.639 m)^3}{(15.630 \cdot 10^{-6} \frac{m^2}{s})^2} \cdot 0.7295$$

$$Ra = 4951399223$$

$$Nu = 255.662$$

$$h = \frac{255.662 \cdot 0.02525 \frac{W}{m \cdot K}}{0.639 m} = 10.102 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

$$R_{Arreglo} = \frac{1}{10.102 \frac{W}{m^2 \cdot K} \cdot 0.503 m^2 \cdot 0.965} = 0.203 \frac{K}{W}$$

$$q = \frac{T_{Módulo} - T_{Ambiente}}{R_{Conducción_Pared} + R_{Conducción_Aletas}}$$

$$56 W = \frac{T_{Módulo} - 293.15 K}{0.0026 \frac{K}{W} + 0.203 \frac{K}{W}}$$

$$T_{Módulo} = 304.663 K$$

$$T_{Módulo} = 31.513 °C$$

$$error2 = \frac{T_{asumido} - T_{calculado}}{T_{asumido}} = \frac{30.427 °C - 31.513 °C}{30.427 °C} = 0.0356$$

$$\% error2 = 0.0356 \cdot 100 \% = 3.569 \%$$

En este caso, la temperatura que se obtiene de 31.513 °C, misma que representa un error de aproximadamente el 4 % puede ser aceptable, sin embargo, se realiza una nueva iteración, ahora para la selección de las propiedades termo físicas del fluido se determina una temperatura promedio Tf = 25.756 °C.

$$Ra = \frac{9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 0.0372 \frac{1}{\text{C}} \cdot (31.513 \text{ °C} - 20 \text{ °C}) \cdot (0.639 \text{ m})^3}{(15.681 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}})^2} \cdot 0.7293$$

$$Ra = 4458158623$$

$$Nu = 246.8746$$

$$h = \frac{246.874 \cdot 0.02556 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}}{0.639 \text{ m}} = 9.874 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

$$R_{\text{Arreglo}} = \frac{1}{9.874 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \cdot 0.503 \text{ m}^2 \cdot 0.965} = 0.208 \frac{\text{K}}{\text{W}}$$

$$q = \frac{T_{\text{Módulo}} - T_{\text{Ambiente}}}{R_{\text{Conducción_Pared}} + R_{\text{Conducción_Aletas}}}$$

$$56 \text{ W} = \frac{T_{\text{Módulo}} - 293.15 \text{ K}}{0.0026 \frac{\text{K}}{\text{W}} + 0.208 \frac{\text{K}}{\text{W}}}$$

$$T_{\text{Módulo}} = 304.943 \text{ °K}$$

$$T_{\text{Módulo}} = 31.793 \text{ °C}$$

$$\text{error3} = \frac{T_{\text{asumido}} - T_{\text{calculado}}}{T_{\text{asumido}}} = \frac{31.513 \text{ °C} - 31.793 \text{ °C}}{31.513 \text{ °C}} = 0.0088$$

$$\% \text{ error3} = 0.0088 \cdot 100 \% = 0.88 \%$$

Al realizar la nueva iteración, se obtiene una temperatura en la base de la aleta de 31.793 °C con un error aproximado al 0.88 %. Se trabaja con la temperatura alcanzada en la tercera iteración.

6.2.3 Cálculo de error con respecto a valores obtenidos mediante simulación régimen estacionario.

Mediante el software SolidWorks® Thermal Simulation, se procede a simular el proceso de transferencia de calor en estado estacionario, tomando en cuenta la geometría del módulo

seleccionada y las cargas aplicadas ($q = 56 \text{ W}$, $h = 9.874 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$). La **Figura 56** muestra los resultados obtenidos mediante el software, donde se puede apreciar que la temperatura que se obtiene es de $30.5 \text{ }^\circ\text{C}$.

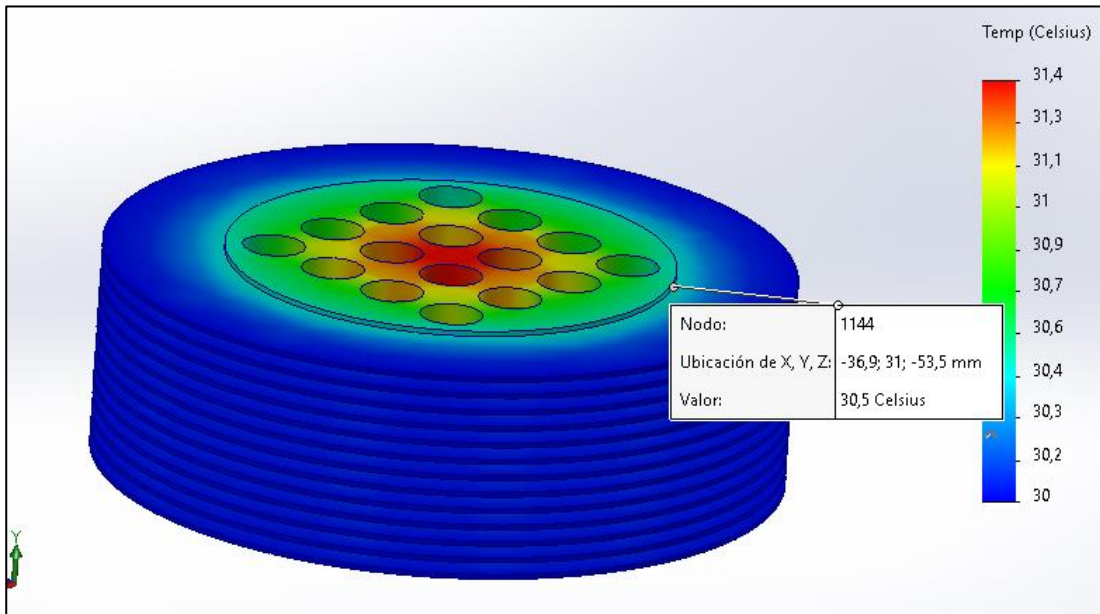


Figura 56. Resultados SolidWorks® simulation – Geometría del módulo con aletas anulares.

La **Ecuación 39**, que se muestra a continuación, permite determinar el error relativo entre el valor obtenido analíticamente y el valor obtenido mediante simulación.

$$\epsilon \% = \frac{\text{Temp}_{\text{Analítica}} - \text{Temp}_{\text{Simulación}}}{\text{Temp}_{\text{Analítica}}} \cdot 100 \quad (39)$$

$$\epsilon \% = \frac{31.793 - 30.5}{31.793} \cdot 100 = 3.48 \%$$

Los valores que se obtienen mediante cálculos analíticos y simulación son muy similares entre sí, presentando una diferencia de aproximadamente $1.15 \text{ }^\circ\text{C}$ lo que indica un error del 3.48% .

6.3. Procesamiento y Análisis de Datos Tercer objetivo: simular térmicamente el modelo geométrico propuesto de disipadores de calor aplicados a la refrigeración de módulos de baterías de ion-litio.

Los datos requeridos para llevar a cabo la simulación son aquellos que tienen que ver con la geometría del módulo donde se ubican las aletas y las distintas cargas térmicas correspondientes a la generación de calor de dicho módulo.

Generación de geometría 3D. La geometría del elemento, de acuerdo a recomendaciones de la localización de las aletas establecidas anteriormente, se realizó utilizando el software SolidWorks® Thermal Simulation en su versión de prueba. Se utilizó dicho software debido a que presenta varias ventajas con respecto a su interfaz gráfica, a la visualización de resultados y particularmente a su uso, ya que presenta un uso bastante intuitivo. La **Figura 57** muestra la geometría 3D del módulo de baterías junto con los disipadores de calor seleccionados anteriormente, el modelo se lo obtiene mediante el software SolidWorks® Thermal Simulation.

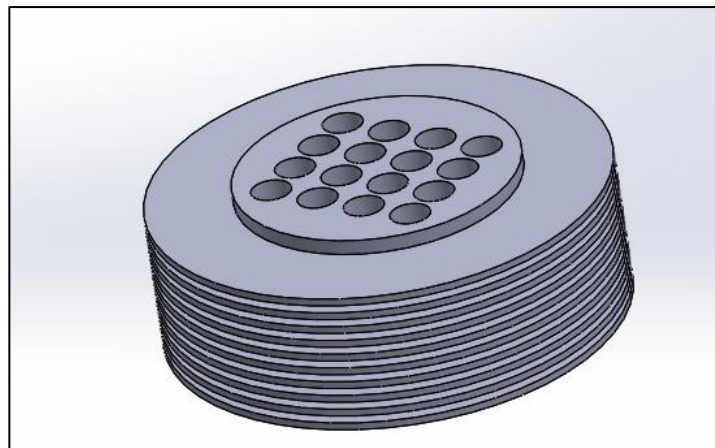


Figura 57. Módulo de baterías con aletas circulares $L = 35$ mm.

Mallado de geometría 3D. El mallado de la pieza hace referencia a establecer la cantidad y tipo de elementos finitos que se utilizan para realizar el estudio. El emplear software SolidWorks® mediante el método de los elementos finitos, permite caracterizar sistemas en los que

existe transferencia de calor, ya que se pueden realizar todo tipo de geometrías y observar cómo evoluciona el sistema térmico en el tiempo y determinar los distintos puntos críticos en el proceso de transferencia de calor. Al trabajar con el método de elementos finitos, se recomienda emplear paralelepípedos cuando se trata de aplicaciones estructurales y elementos triangulares cuando se trata de aplicaciones en las que existan distintos tipos de flujo, como es el caso del flujo de energía en procesos de transferencia de calor o flujos másicos y de caudal en aplicaciones de mecánica de fluidos (Cardona, 2019). La **Figura 58** muestra un esquema del módulo disipador seleccionado sobre el cual se aplica una malla tipo triangular con el objetivo de estudiar numéricamente la pérdida de calor.

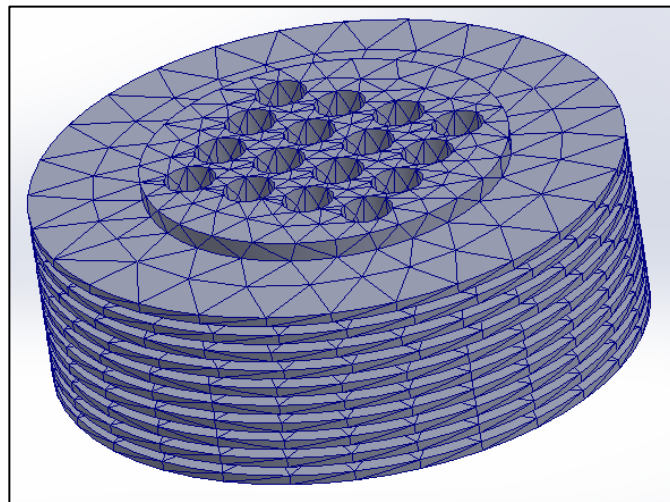


Figura 58. Malla de elementos finitos tipo triangular.

Validación de malla. Para validar el mallado utilizado se realiza una primera simulación utilizando un número y tamaño determinado de elementos finitos y luego se determina el valor de temperatura en un punto específico, posteriormente se realiza un nuevo proceso de simulación utilizando un número mayor de elementos finitos de menor tamaño y se identifica la temperatura en el mismo punto mencionado anteriormente. Este proceso se repite hasta que el valor de temperatura en el lugar seleccionado converge hacia un único punto, en caso de que el valor de

temperatura presente variaciones considerables y no converja hacia un único punto es necesario utilizar un software adicional para realizar el análisis.

Asignación de condiciones de contorno. Se refiere a las condiciones en las cuales se realiza el estudio. Para ello, en el software SolidWorks® Thermal Simulation se establece que el flujo de refrigeración es aire, el valor del coeficiente de convección es $9.874 \frac{W}{m^2 \cdot K}$ y la temperatura ambiente es de 20 °C.

Determinación de cargas térmicas. Las cargas térmicas que se utilizan para realizar la simulación son aquellas producidas por las baterías. En total el calor que se desea disipar, el mismo que producen las 16 baterías ubicadas en el módulo, es de 56 W.

Asignación de cargas térmicas. Es necesario indicar en el software el lugar sobre el cual se aplica el calor generado por las baterías. Se especifica en este punto, que todo el calor generado se transmite hacia las paredes del módulo, se toma en cuenta que el proceso de transferencia de calor es unidireccional y que la cantidad transferida hacia la tapa de las baterías se puede despreciar. La **Figura 59** muestra un esquema donde se visualizan las cargas térmicas asignadas.

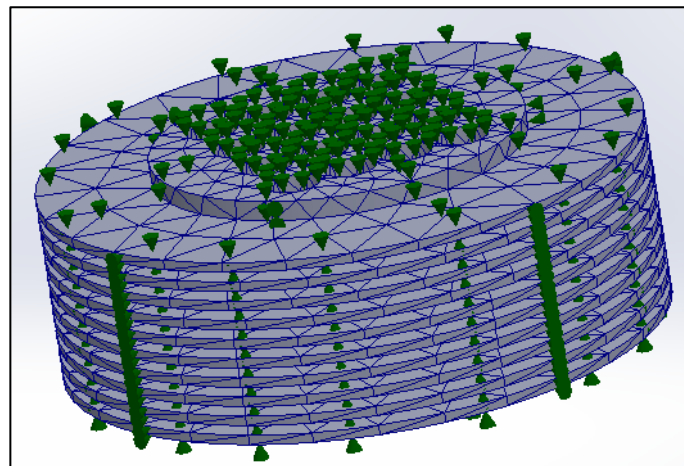


Figura 59. Cargas térmicas asignadas - SolidWorks® Thermal Simulation.

Simulación del proceso de transferencia de calor. Una vez asignadas las cargas, las condiciones y establecido el tipo de malla a utilizar y forma de elementos finitos se inicia el proceso de simulación. Para ahorrar recursos computacionales (tiempo de simulación) se trabaja con un análisis en dos dimensiones. Una de las ventajas que presenta SolidWorks® Thermal Simulation, es que el software determina de forma automática la cantidad de iteraciones necesarias para obtener resultados adecuados.

Visualización y análisis de resultados. El software SolidWorks® presenta una interfaz gráfica bastante amigable con el usuario; de forma predeterminada presenta los resultados tinturando la geometría 3D evaluada y por medio de un abanico de colores indica que tan alto o bajo se encuentra un valor específico.

Visualización y análisis de resultados estado transitorio

Para realizar la simulación en estado transitorio es indispensable introducir el tiempo del estudio, para ello se toma en cuenta la tasa de descarga máxima (10 A) y la capacidad de almacenamiento máximo de las baterías (2150 mAh). La **Ecuación 40** presentada a continuación permite calcular la duración de la batería en horas al aplicarse una corriente de descarga continua.

$$t_d = \frac{C_B}{C_D} \quad (40)$$

Donde, C_B es la capacidad de la batería en amperios hora, C_D es la corriente de descarga y t_d es el tiempo de descarga o duración de la batería. De tal forma que el tiempo de descarga, al trabajar con una corriente máxima de 10 A es:

$$t_d = \frac{2.150 \text{ Ah}}{10 \text{ A}} = 0.215 \text{ h}$$
$$t_d = 774 \text{ s}$$

Se considera que el módulo alcanzó el equilibrio térmico con el ambiente donde se localiza antes de iniciar su operación, es decir que la temperatura inicial del módulo es igual a la temperatura ambiente. Tomando en cuenta los datos de temperatura inicial y el tiempo de consumo total de la batería se realiza el proceso de simulación en estado transitorio mediante el software SolidWorks® Thermal Simulation.

En ese sentido, se trabaja con 5 esquemas de malla, las mismas que se ordenan de acuerdo al tipo de mallado (1 indica un mallado grueso y 5 indica un nivel de mallado fino). Este procedimiento se lo realiza con el fin de validar que los resultados tienden a converger en un punto (ver **Anexo 3**).

La **Tabla 13** que se presenta a continuación, muestra un resumen de los resultados obtenidos con respecto a los diferentes tipos de malla utilizados.

Tabla 13. Características de mallas utilizadas en simulación.

Tipo de Malla	Número de elementos finitos	Tamaño promedio de elemento	Número de nodos
Malla 1	11491	25 mm	21564
Malla 2	12282	20 mm	22317
Malla 3	15952	15 mm	29841
Malla 4	28819	10 mm	54654
Malla 5	64441	5 mm	84941

A partir de los datos obtenidos, se crea un gráfico en el que se ubica en el eje Y la temperatura del módulo vs tipo de malla utilizada.

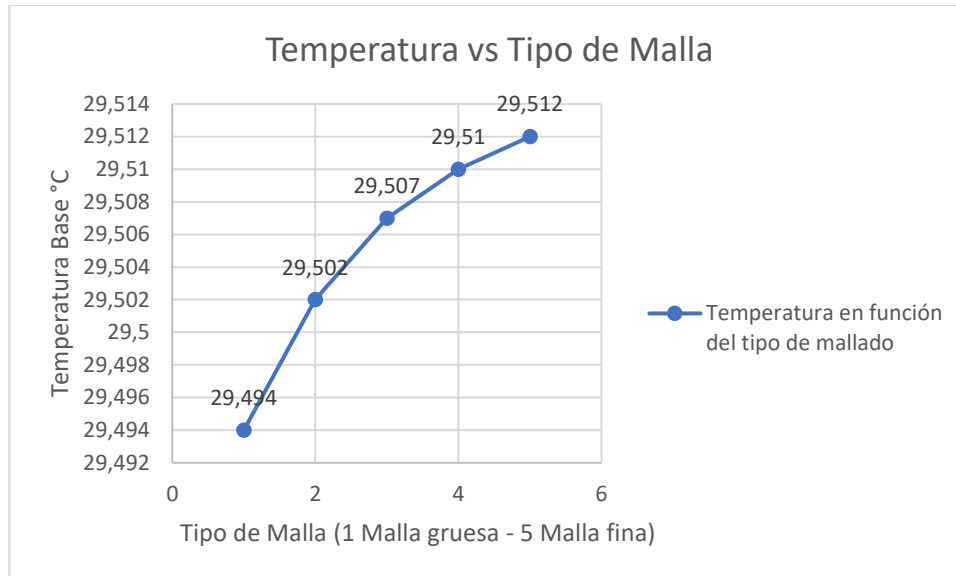


Figura 60. Temperatura base del módulo vs Tipo de Malla Utilizada.

La **Figura 70** muestra que el resultado si converge hacia un valor de temperatura único cuando se trabaja con una malla más fina que se compone de un mayor número de elementos finitos. La temperatura máxima que alcanza las paredes del módulo tiende al valor de 29.51 °C, cuando existe la mayor tasa de descarga (10 A) durante 774 s. El resultado nos indica que el módulo de baterías operará de forma efectiva ya que dicho valor es inferior a 70 °C que es su máxima temperatura de operación.

6.3.1 Cálculo de temperatura alcanzada régimen transitorio.

Para identificar el valor de temperatura que se obtiene al trabajar con métodos analíticos se calcula el número de Biot.

$$Bi = \frac{hL_c}{k} = \frac{9.874 \frac{W}{m^2 \cdot K} \cdot 0.622m}{205 \frac{W}{m \cdot K}} = 0.029$$

A continuación, se establece una ecuación basada en un análisis energético que permite obtener valores de temperatura cuando esta cambia con el tiempo. La ecuación indica que la

energía que se genera menos la energía que sale es igual a la energía que se almacena, la misma que provoca el aumento de temperatura del contenedor.

$$E_g - h(T - T_\infty)A_s = \rho V c_p \frac{dT}{dt}$$

Donde, A_s es la superficie del cilindro expuesta, ρ es la densidad del aluminio, c_p es la capacidad calorífica del aluminio, V es el volumen del contenedor, E_g es el calor generado por las baterías, h es el coeficiente convectivo y T_∞ es la temperatura del fluido.

$$A_s = \text{Area total de cilindro sin aletas} + (\text{Número de aletas} * \text{Área total de la aleta})$$

$$A_s = (13)(130 \text{ mm} * \pi)(3.5 \text{ mm}) + (13(\pi((100 \text{ mm})^2 - (65 \text{ mm})^2) * 2 + (\pi * 200 \text{ mm} * 1.5 \text{ mm})) + 2\pi * 65^2$$

$$A_s = 516423.81 \text{ mm}^2 = 0.51 \text{ m}^2$$

$$V = 13 * ((\pi * (65 \text{ mm})^2 * 3.5 \text{ mm}) + (\pi * (100 \text{ mm})^2 * 1.5 \text{ mm}))$$

$$V = 1216542.48 \text{ mm}^3 = 0.0012 \text{ m}^3$$

La ecuación mostrada anteriormente es una ecuación diferencial lineal de primer orden no homogénea. Al integrarla la solución presenta la forma:

$$\frac{T - T_\infty}{T_i - T_\infty} = \exp(-at) + \frac{\frac{b}{a}}{T_i - T_\infty} (1 - \exp(-at))$$

Donde, $a = \frac{hA_s}{\rho V c_p}$ y $b = \frac{E_{gen}}{\rho V c_p}$. Al reemplazar los valores correspondientes y tomando en cuenta

que el tiempo es 774 segundos se obtiene:

$$a = \frac{hA_s}{\rho V c_p} = \frac{(9.874 \frac{W}{m^2 \cdot K})(0.51 \text{ m}^2)}{2700 \frac{W}{m \cdot K} * 0.0012 \text{ m}^3 * 896 \frac{J}{kg \cdot K}} = 1.73 \times 10^{-3}$$

$$b = \frac{E_{gen}}{\rho V c_p} = \frac{56 \text{ W}}{2700 \frac{W}{m \cdot K} * 0.0012 \text{ m}^3 * 896 \frac{J}{kg \cdot K}} = 0.019$$

$$\frac{T - T_{\infty}}{T_i - T_{\infty}} = \exp(-at) + \frac{\frac{b}{a}}{T_i - T_{\infty}} (1 - \exp(-at))$$

$$\frac{T - 20}{20.5 - 20} = \exp(-1.73 \times 10^{-3} * 774) + \frac{0.019}{\frac{1.73 \times 10^{-3}}{20.5 - 20}} (1 - \exp(-1.73 \times 10^{-3} * 774))$$

$$T = 28.56 \text{ } ^\circ\text{C}$$

6.3.2 Cálculo de error respecto a valores obtenidos mediante simulación régimen transitorio.

Se puede apreciar que el valor que se obtiene presenta una diferencia de aproximadamente 1 ° C con respecto al valor obtenido mediante simulación. A continuación, se muestra el cálculo del error relativo.

$$\epsilon \% = \frac{\text{Temp}_{\text{Analítica}} - \text{Temp}_{\text{Simulación}}}{\text{Temp}_{\text{Analítica}}} \cdot 100$$

$$\epsilon \% = \frac{28.56 - 29.5}{28.56} \cdot 100 = 3.29 \%$$

6.3.3 Calidad de malla y evaluación de malla.

Para determinar la calidad de malla se utiliza la herramienta disponible en el software SolidWorks denominada cociente jacobiano. El cociente jacobiano mide la desviación de la forma a partir de un elemento con forma correcta determinado (uno que tiene aristas rectas con longitudes iguales). El cociente jacobiano de un elemento aumenta a medida que aumenta la curvatura de las aristas del elemento para asignar una geometría curva.

En contornos curvos, las aristas de un elemento pueden cruzarse entre sí y el elemento se distorsiona, lo que da como resultado una geometría que se entrecruza. Los elementos distorsionados tienen un cociente jacobiano negativo y generan resultados imprecisos. Una malla

de buena calidad tiene un cociente jacobiano entre 1 y 10 para la mayoría de sus elementos (90 % y superior).

La herramienta cociente jacobiano disponible en el software SolidWorks® Thermal Simulation permite determinar la cantidad de elementos que presentan un valor de cociente jacobiano superior a 5. La **Figura 61** muestra la cantidad de elementos que no superan el criterio del cociente jacobiano.

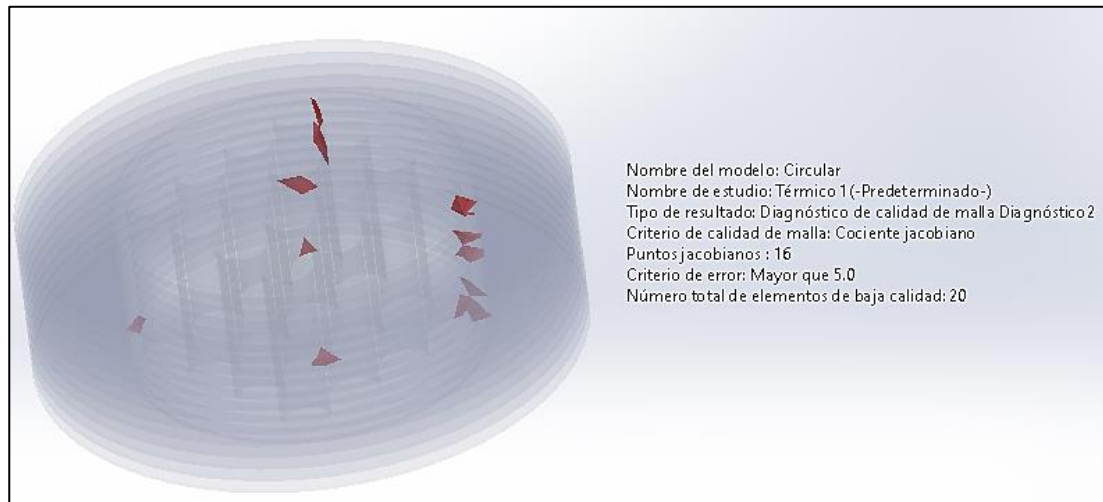


Figura 61. Resultados evaluación cociente jacobiano.

Se puede apreciar que 20 elementos presentan un cociente jacobiano mayor a 5, sin embargo, estos corresponden al 0.1 % del total del número de elementos finitos, lo que indica que la malla presenta una buena calidad. En la **Tabla 14** presentada a continuación se presentan las características de la simulación y el computador utilizado para realizar la misma.

Tabla 14. Características de simulación.

Tipo	Descripción
Densidad de malla	Media
Tipo de elemento finito	Triangular
Tamaño promedio de elemento	5 mm

Cantidad de elementos	15952
Número de nodos	29841
Tiempo de Simulación	152 segundos
Marca Computador	Toshiba
Procesador	Intel (R) Core (TM) i5-4210U
	CPU @ 1.70GHz 2.40 GHz
Memoria RAM	8 GB
Tipo de sistema	64 bits

7 Discusión de Resultados

Los resultados que se obtienen mediante la simulación en el primer objetivo varían debido a que se enfoca en determinar la mejor configuración geométrica por lo que es necesario determinar o asumir un valor de coeficiente convectivo $11 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ que se encuentra en el rango de valores típicos de coeficientes de convección natural. Debido a que todos los elementos que se evalúan en el objetivo 1 son sometidos a las mismas cargas y condiciones térmicas, se puede asegurar que presentan resultados distintos únicamente debido a variaciones geométricas.

Por otra parte, en el objetivo 2 se determina el valor del coeficiente convectivo de una forma más precisa por medio de iteraciones sucesivas, de tal forma que el coeficiente de convección varía y al aplicar dicho cambio en el modelo seleccionado se obtienen resultados en la simulación distintos. Sin embargo, los resultados que se obtienen mediante cálculos analíticos y mediante simulación al trabajar con el mismo coeficiente convectivo son muy similares.

La variación que existe entre los resultados analíticos y aquellos obtenidos mediante simulación ocurre debido a que, analíticamente se considera al módulo como un cuerpo que transmite calor a una tasa de 56 W , mientras que en la simulación se indica que cada batería emite calor a una tasa de 3.5 W (16 baterías).

El estudio realizado por Liu, Y (2022), denominado “Investigación experimental y numérica de capacidad de almacenamiento térmico en aletas anulares”, indica que, en caso de convección natural o velocidades del fluido bajas, es recomendable emplear aletas de tipo anular. El estudio sugiere una longitud de aletas de 35 mm localizado en una base circular de 50 mm , un distanciamiento de 5 mm y un espesor de 1 mm . Con respecto a la cantidad de aletas, se sugiere emplear el mayor número posible, ya que de esta forma el área de transferencia de calor se incrementa. De acuerdo al estudio mencionado, se puede inferir que las características geométricas

que se determinaron son correctas ya que los resultados con respecto a longitud, distanciamiento y número de aletas son similares. La característica que presenta mayor variación es el espesor de las aletas, que en el presente estudio se determinó en 1.5 mm. Al variar el espesor en 0.5 mm la cantidad de calor que se transfiere, no se incrementa de forma considerable, sin embargo, el cuerpo adquiere mayor resistencia a esfuerzos mecánicos que pueden producir distintas cargas sobre las aletas como el esfuerzo cortante y esfuerzo a la tracción.

El material seleccionado para el presente estudio es el aluminio 1060, entre los principales tipos de aluminio tenemos los de fundición y de forja, que presente una buena combinación de características de conductividad y económicas. Si se le compara con el acero, este presenta mayor resistencia y dureza, sin embargo, su peso aumenta considerablemente, además, el acero presenta un valor de conductividad típico de $50 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ lo que es prácticamente la cuarta parte del valor de la conductividad del aluminio. Con respecto al costo de fabricación, el acero presenta un mayor costo de fabricación, esto debido a que el módulo con aletas propuesto en el presente estudio se fabrica mediante métodos de fundición, por lo que al trabajar con acero se requiere una mayor cantidad de energía para alcanzar su punto de fusión en comparación al aluminio.

El aluminio 1060 es un tipo de aleación de grado 1000, lo que significa que su contenido de aluminio es del 99%. Es conocido por su alta resistencia a la corrosión, así como por su excelente conductividad térmica y eléctrica, además de ser muy ligero. Sin embargo, debido a su alta pureza, presenta una baja resistencia a esfuerzos mecánicos y no puede ser fortalecido mediante tratamientos térmicos. Esto se traduce en ventajas en términos de precio. El aluminio 1060 es ideal para aplicaciones que requieren transferencia de calor, como radiadores, disipadores de calor y otras situaciones en las que la eficiencia térmica es fundamental, gracias a su notable conductividad térmica.

El cobre presenta una conductividad térmica superior a la del aluminio; sin embargo, su precio es considerablemente más alto. La empresa Fundición Macará, ubicada en el sector Belén de la ciudad de Loja y dedicada a la fundición de metales, informa que el aluminio puro 1060 se vende en bloques circulares por peso, con un costo de dos dólares estadounidenses por libra. Con las dimensiones propuestas en el diseño del arreglo, el peso total del bloque circular alcanzaría las 12.5 libras, lo que se traduce en un costo total de 25 dólares estadounidenses.

Por otro lado, el uso del cobre, a pesar de sus ventajas en aplicaciones que requieren una mayor disipación de calor, resulta costoso debido a la alta energía necesaria para su fundición. Su precio aproximado es de 10 dólares por libra, y es menos común en el mercado debido a su costo. Este material es especialmente valorado en aplicaciones que implican la conducción de fluidos bajo condiciones elevadas de presión y temperatura. Para una mejor comprensión de los costos asociados a las dimensiones del arreglo, se puede visualizar la cotización detallada en el **Anexo 5**.

En cuanto al mecanizado del sistema se obtuvo información en el taller; MECÁNICA INDUSTRIAL RC del maestro Richard Cale, ubicado en el sector Las Pititas de la ciudad de Loja, especializado en piezas mecánicas, donde el valor estimado del mecanizado de aluminio es de 150 dólares estadounidenses, mientras que, para el cobre asciende a 200 dólares. Los detalles de la cotización del proceso de fabricación se pueden visualizar en el **Anexo 6**.

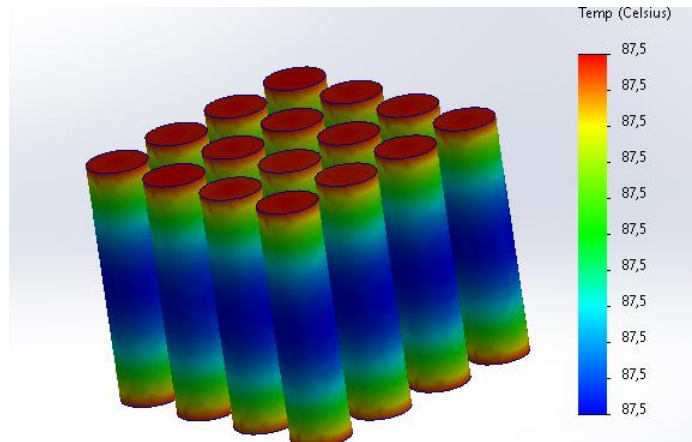


Figura 62. Simulación de módulo refrigerado por convección.

Se puede apreciar que, en el caso de que las baterías no se encuentren en un módulo y únicamente intercambian energía con el medio ambiente, es decir por convección, estas alcanzan una temperatura de equilibrio de 87.5 °C en su superficie, la misma que pueda desencadenar una fuga térmica debido a su elevado valor.

Al ubicar las baterías en un módulo contenedor fabricado en aluminio 1060 que posee un elevado valor de conductividad térmica 205 (W/m · K), este permite que el calor transferido se disipe por fenómenos conductivos. Es necesario que las baterías sean posicionadas mediante el uso de un contenedor. Sin embargo, se aprecia que al emplear geometrías de módulos contenedores circulares y cuadradas, la temperatura en la base aumenta a 136 °C en el caso de un contenedor cilíndrico y a 156 °C en el caso de un contenedor cubico.

Para el análisis se empleó el contenedor que presenta la temperatura más baja, que corresponde al contenedor cilíndrico. Una vez que a este se le agregan las aletas, se incrementa considerablemente el área de transferencia de calor y se alcanza una temperatura de 30.5 °C en la superficie, brindando una temperatura adecuada de operación de las baterías.

8 Conclusiones

La deducción de la geometría de los disipadores de calor aplicada al módulo de batería se fundamentó en una exhaustiva revisión de la literatura sobre sistemas de enfriamiento pasivo que involucran superficies extendidas. Esta revisión incluyó análisis de diversos modelos de aletas, tales como rectangulares, anulares, parabólicas, triangulares y cuadradas, bajo condiciones de frontera y contorno similares a las aplicadas en este estudio. Como resultado, se determinó que las aletas anulares y rectangulares son las más eficientes en la disipación de calor.

Adicionalmente, mediante simulaciones realizadas en el software SolidWorks® Thermal Simulation se pudo verificar que un módulo de batería con geometría circular presenta una temperatura menor de 20 °C en comparación con un módulo de geometría cuadrada. Esta información respalda la elección de la geometría cilíndrica para el módulo de batería.

En cuanto al material de fabricación, se concluyó que el aluminio 1060 es la opción más adecuada debido a su bajo costo, que se traduce en total de 12 dólares estadounidenses, las propiedades mecánicas y alta conductividad térmica, son características que lo convierten en un material ampliamente utilizado en aplicaciones de este tipo.

El módulo de batería propuesto está diseñado para albergar 16 baterías de ion de litio, organizadas con una separación horizontal y vertical de 24 mm, dentro de un radio de 65 mm. Esta disposición optimiza la distribución de temperatura, lo que permite una eficiente disipación del calor generado durante su funcionamiento.

Posteriormente, para identificar la geometría más adecuada, se fue variando parámetros como el espesor, la longitud, el número de aletas y el espaciamiento. Este análisis determinó que las características constructivas más convenientes para este estudio son las siguientes:

Se acoplan aletas anulares al sistema, con una configuración específica: 13 aletas de 1,5 mm de espesor, 35 mm de longitud y separadas entre sí por 3.5 mm.

En el estudio se trabajó con un arreglo de aletas cuadradas y un arreglo de aletas anulares, de los cuales, fue escogido este último, debido a sus buenas características de disipación de calor y su relativa facilidad de fabricación. El arreglo de aletas tipo anular contiene 13 aletas, de 1,5 mm de espesor, 35 mm de longitud y separadas entre sí 3.5 mm.

El diseño térmico de la configuración geométrica de los disipadores de calor tipo aleta para la refrigeración del módulo de baterías de litio ha sido realizado de manera exhaustiva. Se ha seleccionado y evaluado un disipador de calor tipo anular, considerando tanto la refrigeración por convección y conducción unidimensional en régimen estacionario. Los cálculos muestran un coeficiente convectivo promedio de $9.87 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$, y se ha determinado que la resistencia conductiva del módulo es de $0.0026 \frac{\text{K}}{\text{W}}$ por lo que puede ser despreciada en el análisis.

Al comparar los valores de temperatura en la base del módulo, se ha observado una ligera discrepancia entre los resultados analíticos ($31.79 \text{ }^\circ\text{C}$) y los obtenidos mediante simulación ($32.9 \text{ }^\circ\text{C}$), con un error del 3.48 %. Aunque esta diferencia puede atribuirse a las simplificaciones en los cálculos analíticos o a las condiciones de contorno no completamente representadas en el cálculo, el diseño térmico cumple con los requisitos de rendimiento establecidos para garantizar una adecuada refrigeración del módulo de baterías de litio.

Se pudo comprobar mediante la simulación del módulo contenedor de baterías de iones de litio que, al aplicar 56 W sobre las paredes del mismo por un tiempo de 774 segundos, este se calienta hasta alcanzar una temperatura de aproximadamente $29.51 \text{ }^\circ\text{C}$. Se toma en consideración que en el tiempo 0 el módulo se encuentra a temperatura ambiente, y en el tiempo 774 s las baterías ya no generan más calor ya que se encuentran totalmente descargadas, la discrepancia entre

cálculos analíticos y simulación para el estado transitorio de 1.07 °C arrojando un error del 3,29 %.

El estudio concluye indicando que, de no usar aletas en el modelo circular propuesto, la temperatura que se alcanzaría por la operación de las mismas, sería de 136 °C, lo que afectaría seriamente su funcionamiento ya que supera su temperatura de operación, lo que implica que pueda generarse el fenómeno de fuga térmica.

Se puede concluir que la refrigeración debido al módulo de baterías de ion litio posee un alta eficacia en cuanto a disipación de calor por medio de aletas, sin embargo, resultaría de mejor manera la refrigeración al no aplicar una base sólida, ya que al observar los resultados obtenidos mediante simulación, se evidencia un incremento en la temperatura base, la sugerencia sería aplicar la geometría de la aleta estudiada directamente a la superficie de la batería para evaluar su desempeño térmico.

El sistema de refrigeración basado en aletas para módulos de baterías de ion-litio demuestra una alta eficacia en la disipación de calor. Sin embargo, los resultados de las simulaciones indican que el uso de una base sólida puede provocar un aumento en la temperatura de las baterías. Por lo tanto, se sugiere implementar la geometría de la aleta estudiada directamente en la superficie de la batería para evaluar su desempeño térmico.

Estas conclusiones se basan en un riguroso análisis y proporciona una guía eficaz para el diseño y la construcción de sistemas de enfriamiento para módulos de baterías.

9 Recomendaciones

Se recomienda fabricar el módulo de baterías propuesta en el documento, y mediante la descarga controlada de las baterías, determinar el valor de la temperatura de la base del módulo y comparar con los resultados obtenidos.

Se recomienda realizar un estudio similar en el que, a partir de las características establecidas y realizadas, se proponga un método de fabricación del módulo de almacenamiento de baterías.

Se recomienda realizar un estudio de costos asociados a los distintos rubros que intervienen en el proceso de fabricación del módulo, y luego de realizar un estudio de mercado, determinar si sería factible una entrada al mercado con este producto.

10 Bibliografía

- Altimiras, P. (2021). *Why is lithium so important to the transition to a carbon-free world*.
<https://www.politico.eu/sponsored-content/why-is-lithium-so-important-to-the-transition-to-a-carbon-free-world/>
- Cardona, A. (2019). *Introducción al método de los elementos finitos*.
https://cimec.org.ar/foswiki/pub/Main/Cimec/CursoFEM/cursofem_3.pdf
- Delgado, E. (2022). Caracterización de baterías ion litio utilizadas en la movilidad eléctrica. *Caracterización de baterías ion litio utilizadas en la movilidad eléctrica.*, 2-68.
- Delgado, E. (2019). Diseño y montaje de un banco de ensayos de baterías de iones de litio para la realización de prácticas docentes. <https://uvadoc.uva.es/handle/10324/37906>.
- Díez, M. (2021). *Análisis térmico del sistema de refrigeración de un módulo de baterías mediante CFD*.
- G.R. Liu, S. Q. (2014). *Computational Modeling*.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780080983561000011>
- Hamel, J. (2011). Celdas, pilas y baterías de ion litio. 40-47.
- Harish, A. (08 de 12 de 2023). *FEM and FEA Explained*. Simscale:
<https://www.simscale.com/blog/what-is-finite-element-method/>
- Iglesias, A., Lago, A., Nogueiras, C., Martínez, J., Marcos, C., Quintans, M., Moure, M., & Valdés. (2012). Modelado y Simulación de una Batería de Ion-Litio. *Modelado y Simulación de una Batería de Ion-Litio*, 464-469.
- Incropera, F., & De Witt, D. (1999). *Fundamentos de transferencia de calor*. México: Prentice Hall.
- Kreith, F., Manglik, R., & Bohn, M. (2012). *Principios de transferencia de calor*. México: Editec S.A. de C.V. <http://latinoamerica.cengage.com>
- Kummitha, O. (2023). Enfriamiento térmico del módulo de batería de celdas cilíndricas de iones de litio con disposición de deflectores para análisis numérico de enfriamiento por flujo de aire. *Journal of Energy Storage*.

- Laboratories, U. (2023). *Netzch*. <https://analyzing-testing.netzsch.com/es/training-know-how/glosario/thermal-runaway>
- Midtgard, K. (2024). *What is Solidworks?*. <https://www.technia.com/blog/what-is-solidworks/>
- Nitta, N. (2015). *Li-ion battery materials: present and future*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1369702114004118>
- Olmo, E. (2019). *Caracterización de baterías de litio para el estudio del envejecimiento*. Recuperado el 2023, de Caracterización de baterías de litio para el estudio del envejecimiento.: https://scholar.google.es/scholar?hl=es&as_sdt=0,5&q=caracterizacion+de+baterias+de+litio+para+el+estudio+del+envejecimiento#d=gs_cit&t=1696295558368&u=%2Fscholar%3Fq%3Dinfo%3AanpWZQjOcysJ%3Ascholar.google.com%2F%26output%3Dcite%26scirp%3D0%26hl%3Des
- Oosten, A. (2020). *Temperature effects on batteries*. <https://www.intercel.eu/frequently-asked-questions/temperature-effects-on-batteries/#:~:text=Battery%20life%20is%20reduced%20at,the%20good%20and%20bad%20times.>
- Ortiz, D. (2022), *Introducción al CFD. (ESSS Engineering Simulation and Scientific Software)*, 2022
- Öztop, M. (2022). Control of temperature distribution for Li-ion battery modules via longitudinal fins. *Journal of Energy Storage, Volume 52*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.est.2022.104760>.
- Oztop., & Şahinaslan. (2022). *Control de la distribución de temperatura para módulos de baterías de Li-ion mediante*.
- Quintero, V., Che, O., Ching, E., Auciello, O., & Obaldía, E. (2021). *Baterías de ion litio: características y aplicaciones*.
- Ramírez, F. (26 de Abril de 2014). *Análisis térmico de sistemas de almacenamiento energético basados en baterías de ión-litio*. Google Académico: https://scholar.google.es/scholar?hl=es&as_sdt=0%2c5&q=an%3%81lisis+t%3%89mico+de+sistemas+de+almacenamiento+energ%3%89tico+basados+en+bater%3%8das+de+i%3%93n-

litio&btnq=#d=gs_cit&t=1697092039602&u=%2fscholar%3fq%3dinfo%3ar-eye7etyhij%3ascholar.goog

Rodríguez, J., Peña, L., Pacheco, J., Ramírez, J., & Balcázar, J. (2010). Análisis térmico de disipadores de calor en SolidWorks empleando diferentes configuraciones de aletas. *Ingenio y conciencia*.

Rodríguez, A., Ortiz, M., & Thomas, T. (2020). Baterías de ion litio: presente y futuro. *Baterías de ion litio: presente y futuro*, 165-178.

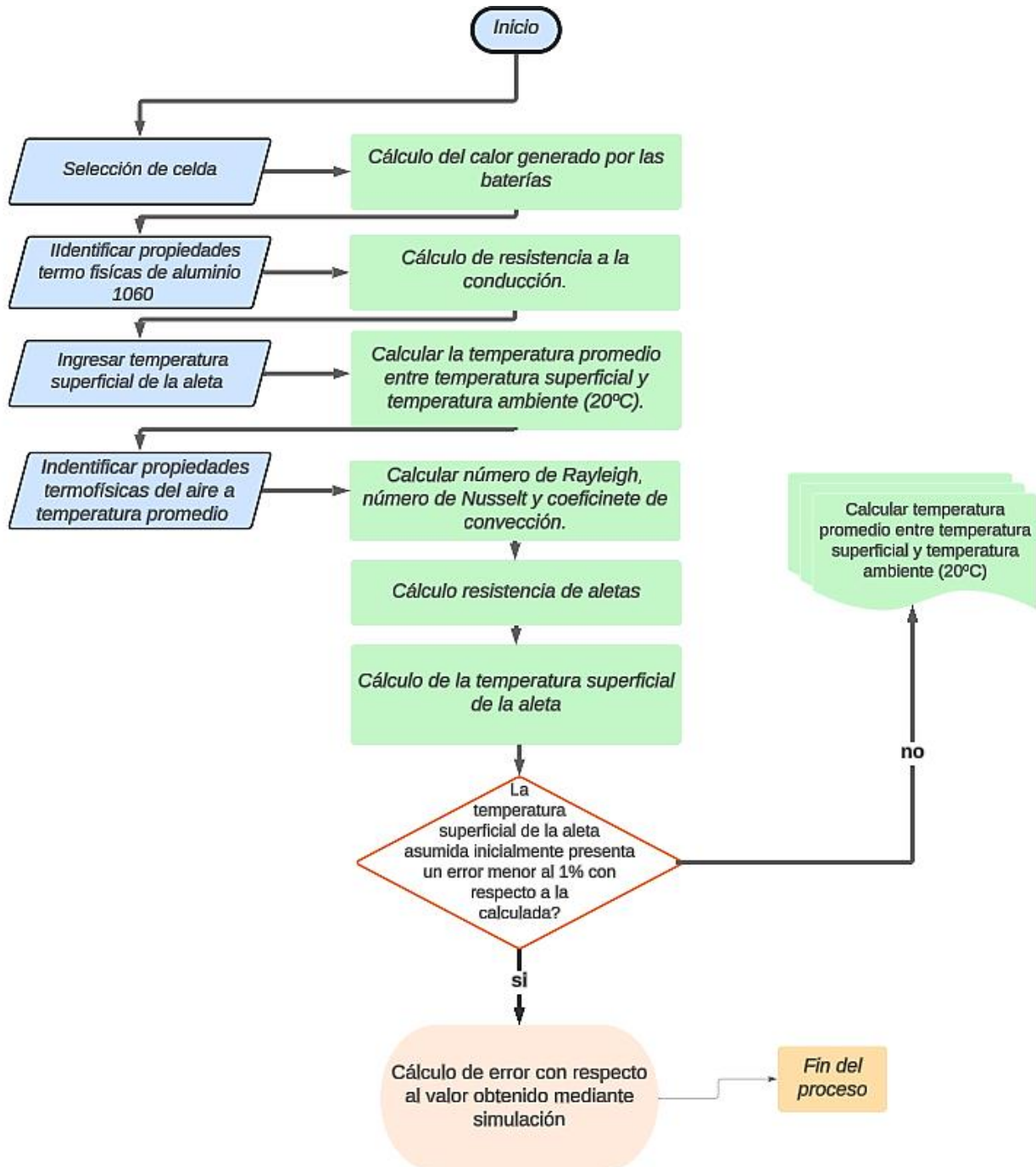
Rout, M. (2012). *Science Direct*. <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/eulerian-approach#:~:text=The%20Eulerian%20approach%20to%20shape%20optimization%20differs%20from%20the%20Lagrangian,the%20grid%2C%20which%20are%20fixed>.

Sun, J. (2019). *Basic Finite Element Mesh Explained*. <https://www.midasbridge.com/en/blog/1d-2d-3d-element-comparison-in-fem#:~:text=Meshing%20is%20the%20process%20to,connectivity%20at%20the%20element%20boundaries>.

Underwriters Laboratories. (2023). <https://ul.org/research/electrochemical-safety/getting-started-electrochemical-safety/what-thermal-runaway>

11 Anexos

Anexo 1. Flujograma de proceso iterativo.



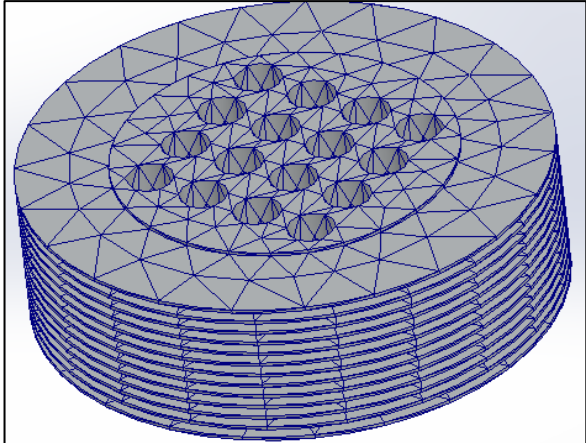
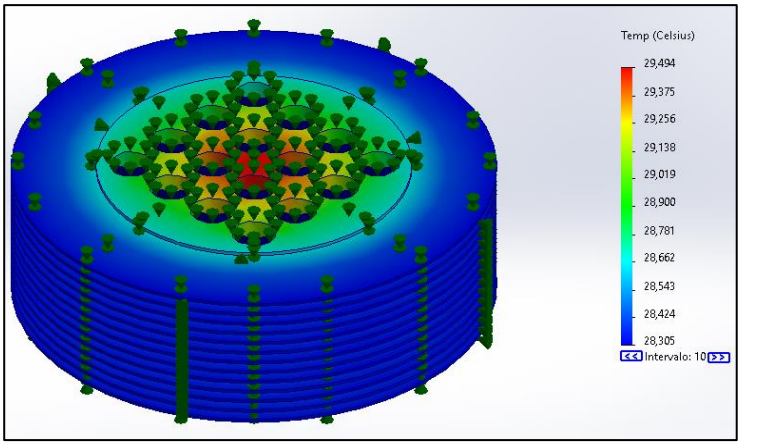
Anexo 2. Propiedades termo-físicas del aire seco a presión atmosférica.

T (°C)	ρ (kg/m ³)	c_p (kJ/kg·K)	$\mu \cdot 10^6$ (N·s/m ²)	$\nu \cdot 10^6$ (m ² /s)	$k \cdot 10^3$ (W/m·K)	$\alpha \cdot 10^6$ (m ² /s)	Pr
-150	2.867	0.9825	8.636	3.013	11.71	4.157	0.7246
-100	2.039	0.9656	11.9	5.835	15.82	8.034	0.7263
-90	1.927	0.9753	12.49	6.482	16.62	8.842	0.733
-80	1.828	0.9835	13.07	7.153	17.42	9.692	0.7381
-70	1.738	0.9901	13.64	7.85	18.22	10.59	0.7414
-60	1.656	0.9952	14.2	8.572	19.01	11.53	0.7433
-50	1.582	0.999	14.74	9.317	19.79	12.52	0.744
-40	1.514	1.002	15.27	10.08	20.57	13.56	0.7436
-30	1.452	1.004	15.79	10.88	21.34	14.65	0.7425
-20	1.394	1.005	16.3	11.69	22.11	15.78	0.7408
-10	1.341	1.006	16.8	12.52	22.88	16.96	0.7387
0	1.292	1.006	17.29	13.38	23.64	18.17	0.7362
5	1.269	1.006	17.54	13.82	24.01	18.8	0.735
10	1.247	1.006	17.78	14.26	24.39	19.44	0.7336
15	1.225	1.007	18.02	14.71	24.76	20.08	0.7323
20	1.204	1.007	18.25	15.16	25.14	20.74	0.7309
25	1.184	1.007	18.49	15.61	25.51	21.4	0.7296
30	1.164	1.007	18.72	16.08	25.88	22.08	0.7282
35	1.146	1.007	18.95	16.54	26.25	22.76	0.7268
40	1.117	1.007	19.18	17.02	26.62	23.45	0.7255
45	1.11	1.007	19.41	17.49	26.99	24.16	0.7241
50	1.092	1.007	19.63	17.97	27.35	24.87	0.7228
55	1.076	1.007	19.86	18.46	27.72	25.59	0.7215
60	1.06	1.007	20.08	18.95	28.08	26.31	0.7202
65	1.044	1.007	20.3	19.45	28.45	27.05	0.719
70	1.029	1.007	20.52	19.95	28.81	27.79	0.7177
75	1.014	1.008	20.74	20.45	29.17	28.55	0.7166
80	0.9996	1.008	20.96	20.97	29.53	29.31	0.7154
85	0.9857	1.008	21.17	21.48	29.88	30.07	0.7143
90	0.9721	1.008	21.39	22	30.24	30.85	0.7132
95	0.9589	1.009	21.6	22.52	30.6	31.63	0.7121
100	0.946	1.009	21.81	23.05	30.95	32.42	0.7111
110	0.9213	1.01	22.23	24.12	31.65	34.02	0.7092
120	0.8979	1.011	22.64	25.21	32.35	35.64	0.7073
130	0.8756	1.012	23.05	26.32	33.05	37.3	0.7057
140	0.8544	1.013	23.45	27.44	33.74	38.98	0.7041
150	0.8343	1.014	23.85	28.59	34.43	40.68	0.7027
160	0.815	1.016	24.24	29.74	35.11	42.4	0.7014
170	0.7966	1.017	24.63	30.92	35.79	44.15	0.7003
180	0.779	1.019	25.01	32.11	36.46	45.92	0.6992
190	0.7622	1.021	25.39	33.32	37.13	47.71	0.6983
200	0.7461	1.023	25.77	34.54	37.79	49.53	0.6974
210	0.7306	1.025	26.14	35.78	38.45	51.36	0.6967
220	0.7158	1.027	26.51	37.04	39.1	53.21	0.696
230	0.7016	1.029	26.88	38.31	39.75	55.08	0.6955
240	0.6879	1.031	27.24	39.6	40.4	56.97	0.695
250	0.6748	1.033	27.6	40.9	41.04	58.88	0.6946
260	0.6621	1.035	27.95	42.22	41.67	60.81	0.6942
270	0.6499	1.037	28.3	43.55	42.31	62.75	0.694
280	0.6382	1.04	28.65	44.9	42.93	64.72	0.6938
290	0.6269	1.042	29	46.26	43.56	66.69	0.6936
300	0.6159	1.044	29.34	47.64	44.18	68.69	0.6935

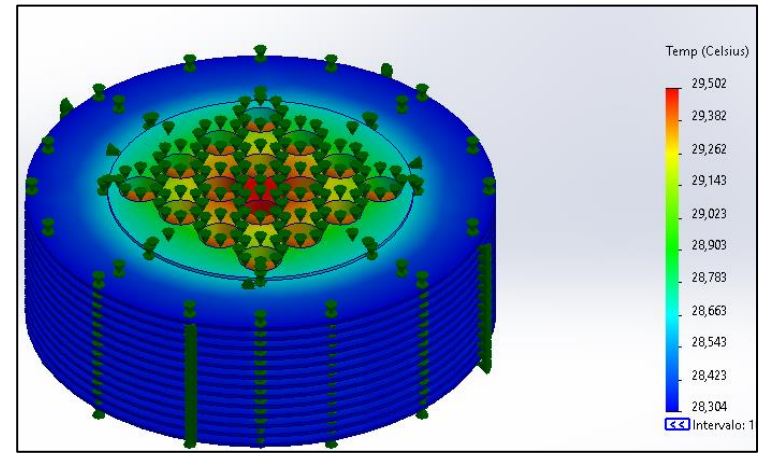
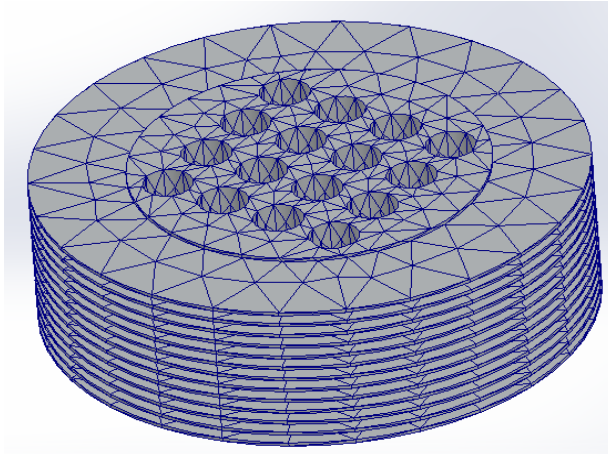
Fuente: ÇENGEL, Yunus A. y John M. CIMBALA, “Mecánica de fluidos: Fundamentos y aplicaciones”, 1ª edición, McGraw-Hill, 2006. Tabla A-9

Anexo 3. Resultados de simulación al trabajar con los distintos tipos de malla mencionados.

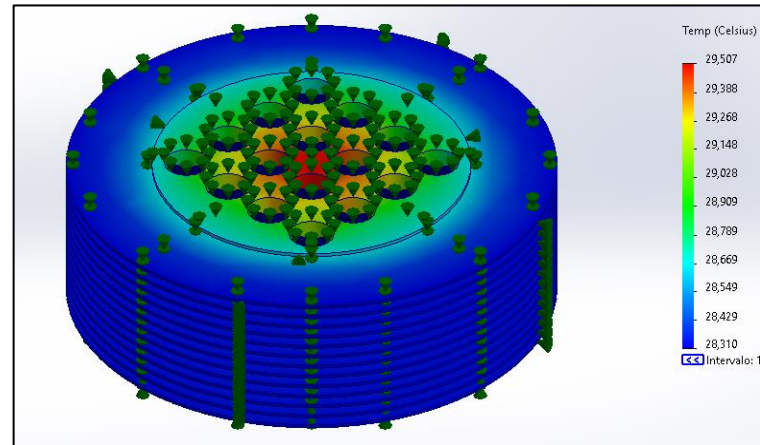
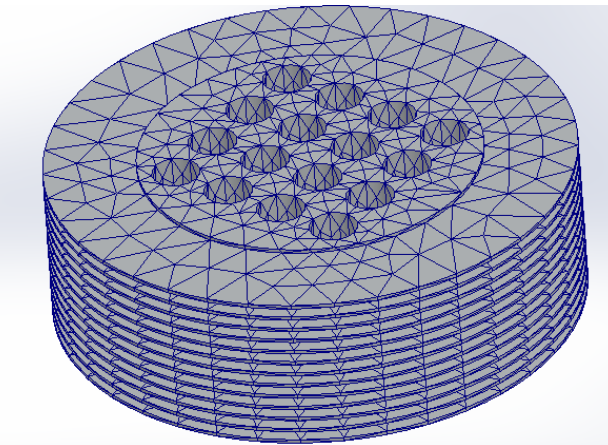
Tabla 15. Resultados obtenidos mediante el software SolidWorks®.

Tipo	Mallado	Simulación en software
Malla tipo 1 – 11491 elementos.		

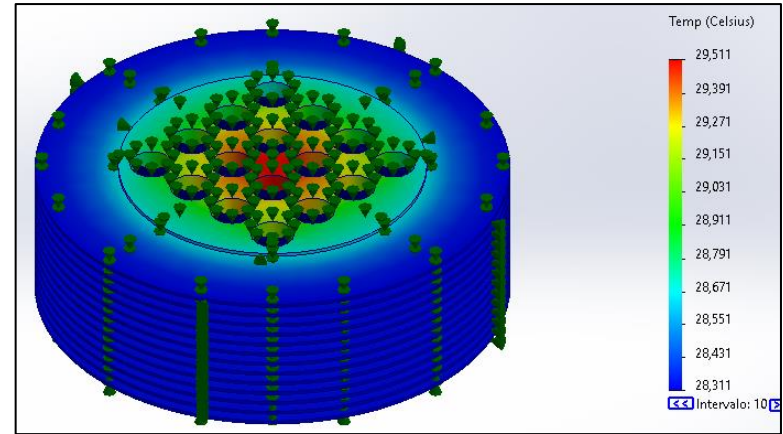
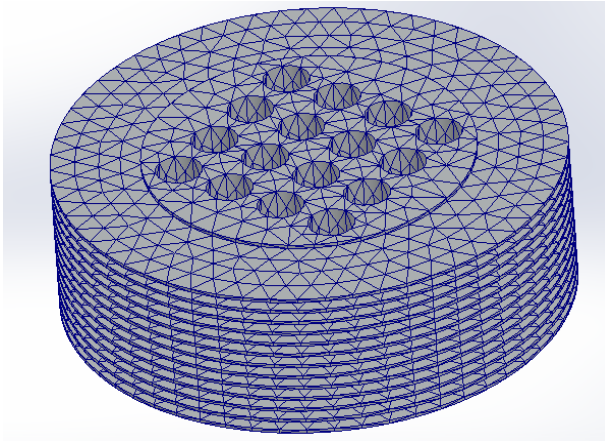
Malla tipo 2
– 12282
elementos



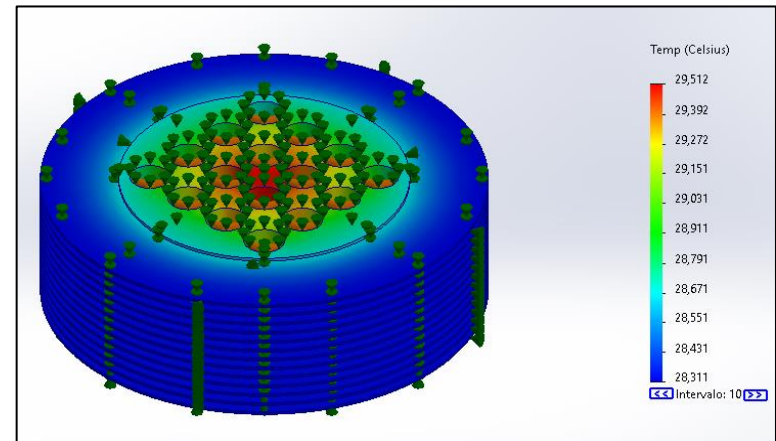
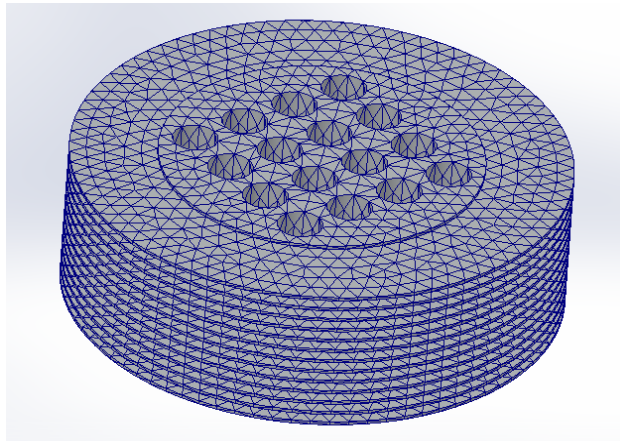
Malla tipo 3
– 15952
elementos



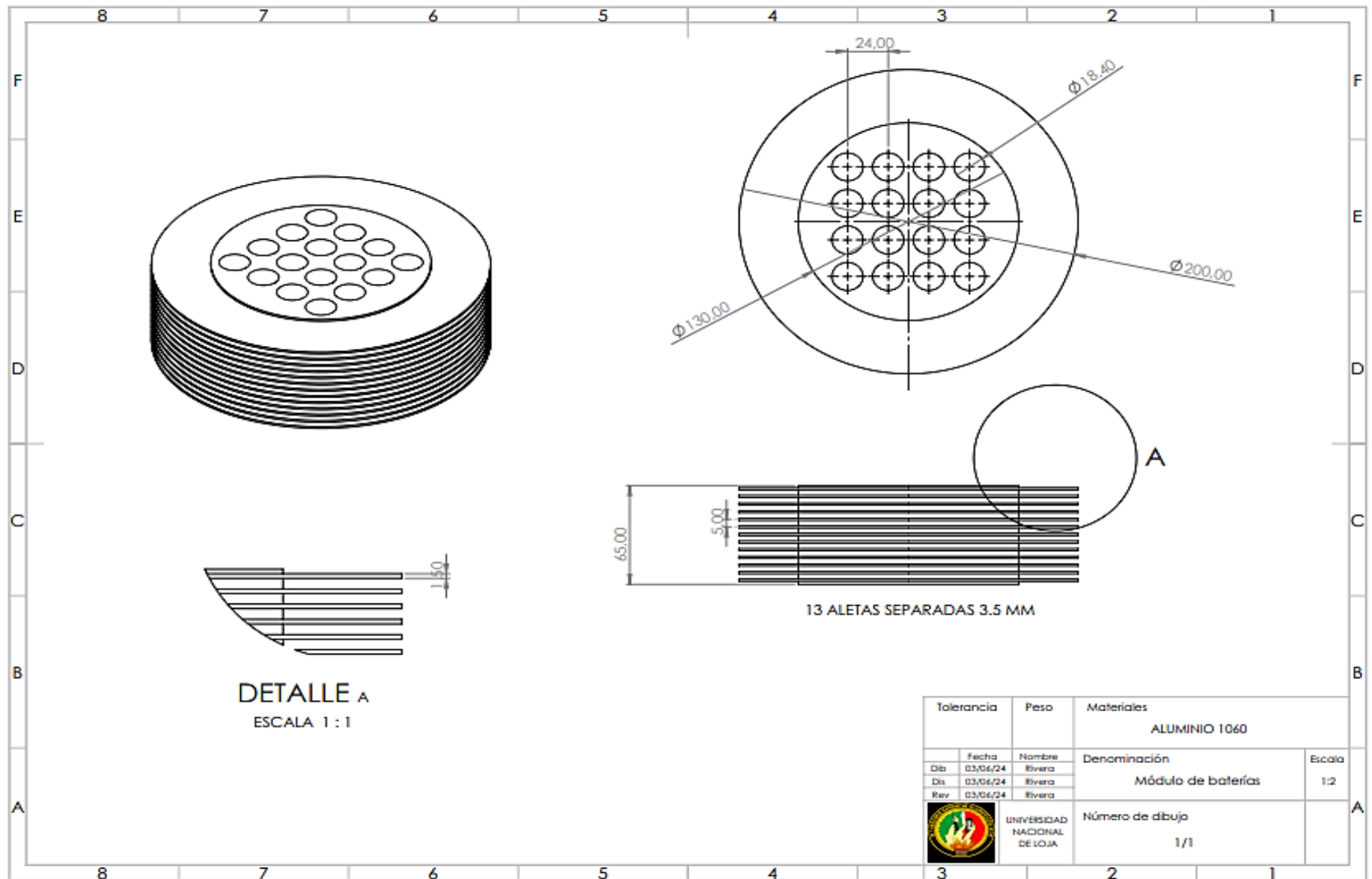
Malla tipo 4
– 54654
elementos.



Malla tipo 5
– 64441
elementos.



Anexo 4. Módulo de baterías propuesto.



DETALLE A
ESCALA 1 : 1

13 ALETAS SEPARADAS 3.5 MM

Tolerancia	Peso	Materiales	
		ALUMINIO 1060	
	Fecha	Nombre	Denominación
Dib	03/06/24	Iviera	Módulo de baterías
Dis	03/06/24	Iviera	
Rev	03/06/24	Iviera	
		Número de dibujo	Escala
		1/1	1:2



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE LOJA

Anexo 5. Costos asociados al material utilizado.



BALCAZAR LALANGUI HERMENES
FUNDICION MACARA
 Dirección Matriz: BARRIO BELEN: CALLE AV. ISIDRO AYORA SN Y HABANA
 Dirección Establecimiento: Barrio: BELEN Calle: AV. ISIDRO AYORA SN Y HABANA
 Contribuyente Especial Nro:
 OBLIGADO A LLEVAR CONTABILIDAD: NO

R.U.C.: 1102446612001

FACTURA

No. 001-003-000000024

NÚMERO DE AUTORIZACIÓN

2110202401110244661200120010030000000241234567812

FECHA AUTORIZACION

21/10/2024 10:15:51

AMBIENTE: PRODUCCION

EMISIÓN: NORMAL

CLAVE DE ACCESO



2110202401110244661200120010030000000241234567812

Razón Social / Nombres y Apellidos: **JORGE ALEXANDER RIVERA YAGUANA** Identificación: **1150025839**
 Fecha Emisión: **21/10/2024** Guía Remisión:
 Dirección Cliente: **CLODOVEO JARAMILLO**

Cod. Principal	Cod. Auxiliar	Descripción	Cant	Precio Unitario	Descuento	Total Sin Impuestos
0022		LINGOTE DE ALUMINIO	1	25	0.00	25.00

Forma Pago	Valor
OTROS CON UTILIZACION DEL SISTEMA FINANCIERO	25.00

SUBTOTAL 15%	0.00
SUBTOTAL 0%	25.00
SUBTOTAL no objeto de	0.00
SUBTOTAL exento de IVA	0.00
SUBTOTAL SIN IMPUESTOS	25.00
TOTAL Descuento	0.00
IVA 15%	0.00
IMPORTE TOTAL	25.00

Información Adicional
 Telefono **0969052918**
 Email **jorge.a.rivera@gmail.com**

Anexo 7. Certificado de traducción del resumen.

Loja, 21 de septiembre de 2024

CERTIFICACIÓN DE TRADUCCIÓN

Doctora.
Erika Lucía González Carrión, Ph.D.

CERTIFICO:

En mi calidad de traductora del idioma Inglés, con capacidades que pueden ser probadas a través de las traducciones realizadas para revistas de alto impacto como: Comunicar(Q1): <https://bit.ly/3v0JggL>, así como a través de la Certificación de conocimiento del Inglés, nivel B2, que la traducción del Resumen (Abstract) del Trabajo de Titulación denominado: **“ANÁLISIS DE UN SISTEMA DE DISIPADORES DE CALOR PARA LA REFRIGERACIÓN TÉRMICA EN MÓDULOS DE BATERÍAS DE ION-LITIO TIPO 18650.”**, de autoría del estudiante: **Jorge Alexander Rivera Yaguana** con CI: **1150025839**, es correcta y completa, según las normas internacionales de traducción de textos.

Es cuanto puedo certificar en honor a la verdad, facultando al interesado, **Jorge Alexander Rivera Yaguana**, hacer uso legal del presente, según estime conveniente.

Atentamente,



Firmado digitalmente por:
ERIKA LUCÍA
GONZÁLEZ
CARRIÓN

Dra. Erika González Carrión. PhD.