



unl

Universidad
Nacional
de Loja

Universidad Nacional de Loja

Facultad de la Energía, las Industrias
y los Recursos Naturales No Renovables

Carrera de Electromecánica

Diseño y construcción de un banco de tubos con generación de calor para emulación de estrategias de enfriamiento en un banco de baterías enfriadas por aire.

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

AUTOR:

Juan Carlos Garrochamba Pullaguari

DIRECTOR:

Ing. Edwin Bladimir Paccha Herrera, PhD

Loja-Ecuador

2025

Educamos para Transformar

Certificación

Loja, 16 de enero de 2025

Ing. Edwin Bladimir Paccha Herrera, PhD

DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

CERTIFICO:

Que he revisado y orientado todo el proceso de elaboración del Trabajo de Integración Curricular denominado: **“Diseño y construcción de un banco de tubos con generación de calor para emulación de estrategias de enfriamiento en un banco de baterías enfriadas por aire”**, previo a la obtención del título de **Ingeniero Electromecánico**, de la autoría del estudiante **Juan Carlos Garrochamba Pullaguari**, con **cédula de identidad Nro. 1105205627**, una vez que el trabajo cumple con todos los requisitos exigidos por la Universidad Nacional de Loja, para el efecto, autorizo la presentación del mismo para su respectiva sustentación y defensa.



Firmado electrónicamente por:
**EDWIN BLADIMIR
PACCHA HERRERA**

Ing. Edwin Bladimir Paccha Herrera, PhD.

DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

Autoría

Yo, **Juan Carlos Garrochamba Pullaguari**, 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 mi Trabajo de Integración Curricular en el Repositorio Institucional - Biblioteca Virtual.

Firma:

A handwritten signature in blue ink, consisting of several stylized, overlapping loops and lines, enclosed within a faint circular outline.

Cédula de identidad: 1105205627.

Fecha: 16 de enero de 2025

Correo electrónico: Juan.garrochamba@unl.edu.ec.

Teléfono: 0981559002.

Carta de autorización por parte del autor, para consulta, reproducción parcial o total y/o publicación electrónica del texto completo, del Trabajo de Integración Curricular

Yo, **Juan Carlos Garrochamba Pullaguari**, declaro ser autor del Trabajo de Integración Curricular denominado: **“Diseño y construcción de un banco de tubos con generación de calor para emulación de estrategias de enfriamiento en un banco de baterías enfriadas por aire”**, 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 en el Repositorio Institucional.

Los usuarios pueden consultar los contenidos 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, en la ciudad de Loja, a los dieciséis días del mes de enero de dos mil veinticinco.



Firma:

Autor: Juan Carlos Garrochamba Pullaguari.

Cédula de identidad: 1105205627.

Dirección: Barrio motupe.

Correo electrónico: juan.garrochamba@unl.edu.ec

Teléfono: 0981559002.

DATOS COMPLEMENTARIOS:

Director del Trabajo de Integración Curricular: Ing. Edwin Bladimir Paccha Herrera, PhD.

Dedicatoria

El presente trabajo de investigación se lo dedico primeramente a Dios y a mi Familia quienes a lo largo de mi formación académica me han sabido apoyar con su sabiduría y su paciencia, por ser un pilar fundamental, brindándome siempre fortaleza y las ganas para cumplir cada una de las metas que me he propuesto.

Especialmente va dedicado a mi madre Rosa Virginia Pullaguari y a mi hermana Maria Beatriz por todo el amor, dedicación, consejos y apoyo incondicional que me han dado durante toda mi vida, a mis preciados hermanos Carmen, Patricio, Luis, Diego por haberme formado con valores para poder enfrentarme a la vida.

Juan Carlos Garrochamba Pullaguari

Agradecimiento

Mi sincera gratitud a la Universidad Nacional de Loja, al personal Docente y Administrativo de la Carrera de Ingeniería Electromecánica, que me supieron brindar su apoyo y conocimientos, por el arduo trabajo que realizan para que los estudiantes reciban una educación de calidad, brindando siempre lo mejor de cada uno de ellos.

Mi especial agradecimiento al Ing. Edwin Bladimir Paccha Herrera, PhD., que con paciencia, apoyo y ética profesional transmitió sus valiosos conocimientos, y supo guiarme en el desarrollo y culminación del presente trabajo de integración curricular.

Juan Carlos Garrochamba Pullaguari

Índice de Contenidos

Portada	i
Certificación	ii
Autoría	iii
Carta de Autorización	iv
Dedicatoria	v
Agradecimiento	vi
Índice de Contenidos	vii
Índice de Tablas:	xi
Índice de Figuras:	xii
Índice de Anexos:	xv
Simbología	xvi
1 Título	1
2 Resumen	2
Abstract	3
3 Introducción	4
4 Marco Teórico	6
4.1 Baterías de iones de litio	6
4.1.1 Componentes externos e internos de una batería recargable de Li-ion 18650 (18 mm de diámetro y 65 mm de altura)	7
4.1.2 Organización, detalles técnicos y tamaño de la batería de ion de litio 18650	8
4.1.3 Generación de calor en baterías de litio	10
4.1.4 Transferencia de calor en banco de tubos	10
4.1.4.1 Mecanismos de transferencia de calor.	11
4.1.4.2 Régimen de flujo y patrones de flujo.	11
4.1.4.3 Disposición geométrica del banco de tubos.	11
4.1.4.4 Efectos de la geometría de los tubos.	11
4.1.4.5 Correlaciones empíricas y modelos numéricos.	11
4.1.4.6 Optimización y mejora de la transferencia de calor.	11
4.1.4.7 Aplicaciones industriales de banco de tubos.	12
4.1.4.8 Principios de funcionamiento.	12
4.1.4.9 Materiales para el ánodo	12
4.1.4.10 Materiales para el cátodo.	12
4.1.4.11 Electrolitos.	13

4.1.4.12	Seguridad y estabilidad térmica.	13
4.1.4.13	Ciclo de vida y degradación.	13
4.1.4.14	Gestión térmica.	13
4.1.4.15	Reciclaje y sostenibilidad.	13
4.1.4.16	Aplicaciones y tendencias futuras.	14
4.2	Principio de funcionamiento y rangos de operación de las baterías de litio .	14
4.2.1	Rangos de Operación de las Baterías de Iones de Litio	14
4.2.1.1	Rango de temperatura:	14
4.2.1.2	Rango de voltaje	15
4.2.1.3	Rango de corriente	15
4.2.1.4	Rango de carga (SOC)	16
4.3	Sistemas de enfriamiento de baterías de litio	18
4.3.1	Tipos de sistemas de enfriamiento en módulos de baterías de iones de litio	19
4.3.1.1	Refrigeración líquida.	19
4.3.1.2	Enfriamiento por aire.	19
4.4	Dinámica computacional de fluidos (CFD)	20
4.5	Estudios previos de desempeño térmico de bancos de baterías de litio con enfriamiento por aire.	20
5	Metodología	23
5.1	Área de estudio	23
5.2	Equipos y materiales	23
5.2.1	Recursos tecnológicos	23
5.2.1.1	Softwares	23
5.2.1.2	Sensores	23
5.2.2	Equipos Técnicos	24
5.2.3	Materiales de construcción	24
5.3	Procedimiento	24
5.3.1	Describir condiciones físicas de operación de un módulo de baterías de iones de litio con base en la revisión literaria.	27
5.3.2	Construir un prototipo experimental de un banco de tubos para emular el desempeño térmico de un banco de baterías cilíndricas con enfriamiento por aire.	28
5.3.3	Evaluar el desempeño del banco de tubos con generación de calor interna para recrear condiciones de operación de baterías con dife- rentes configuraciones geométricas.	29
5.4	Procesamiento y análisis de datos	30
5.4.1	Primer objetivo	30
5.4.1.1	Información sobre las condiciones físicas de operación de un módulo de baterías de iones de litio.	30
5.4.1.2	Selección del tipo de batería de ion de litio	32
5.4.2	Sistemas y componentes principales del banco de tubos	32
5.4.2.1	Planteamiento de los parámetros del sistema de enfria- miento.	32
5.4.2.2	Características del ventilador VN-351.	33
5.4.2.3	Generación de calor.	33
5.4.2.4	Características de la niquelina eléctrica.	34

5.4.2.5	Selección de material utilizado en reemplazo de las BIL.	34
5.4.2.6	Diseño conceptual del prototipo de prueba	35
5.4.2.7	Plancha de madera	35
5.4.2.8	Moldes con espaciamento entre celdas.	36
5.4.2.9	Moldes.	36
5.4.2.10	Barra cilíndrica de aluminio	37
5.4.2.11	Fase experimental para definir los parámetros de operación del prototipo.	38
5.4.3	Segundo objetivo	40
5.4.3.1	Diseño de detalle	40
5.4.3.2	Barra de aluminio.	41
5.4.3.3	Molde uno en impresión 3D.	41
5.4.3.4	Molde dos en impresión 3D.	42
5.4.3.5	Molde tres en impresión 3D.	43
5.4.3.6	Planchas de madera.	44
5.4.4	Tercer objetivo	45
5.4.4.1	Evaluar el desempeño del banco de tubos.	45
5.4.4.2	Análisis de costos del prototipo final.	45
5.4.5	Implementar un modelo numérico con base en dinámica computacional de fluidos (CFD) para evaluar el desempeño del módulo de baterías de litio enfriado por aire	45
5.4.5.1	Establecer disposiciones de las celdas de litio dentro de un módulo para evaluar.	46
5.4.5.2	Análisis de independencia de mallas.	50
5.4.6	Modelo matemático	50
5.4.6.1	Valores iniciales y condiciones de frontera.	52
5.5	Error RMSE	53
6	Resultados	54
6.1	Condiciones de operación de las baterías de ion de litio	54
6.2	Construcción de los componentes del sistema	54
6.3	Validación del sistema	56
6.3.1	Resultados del diseño 1	56
6.3.2	Resultados del diseño 2	60
6.3.3	Resultados del diseño 3	65
6.4	Resultados generales de los tres diseños	71
6.5	Resultados generados mediante Ansys	72
6.5.1	Resultados del diseño 1	72
6.5.2	Resultados del diseño 2	77
6.5.3	Resultados del diseño 3	82
6.5.4	Resultados generales de los tres diseños en simulación y experimentales	87
6.6	Error entre los resultados experimentales y los generados mediante simulación	91
7	Discusión	93
8	Conclusiones	96
9	Recomendaciones	97

10 Bibliografía	98
11 Anexos	103

Índice de Tablas:

Tabla 1.	Dimensiones técnicas de la batería recargable de Li-ion 18650.	9
Tabla 2.	Especificaciones de la batería de Li-ion 18650.	9
Tabla 3.	Materiales y elementos utilizados para la construcción del prototipo. .	24
Tabla 4.	Especificaciones técnicas de la batería 18650.	32
Tabla 5.	Características del ventilador.	33
Tabla 6.	Especificaciones del anemómetro KESTREL 3000.	33
Tabla 7.	Características de la niquelina.	34
Tabla 8.	Propiedades termofísicas del aluminio.	35
Tabla 9.	Componentes del prototipo.	40
Tabla 10.	Costos de materiales y construcción del sistema.	45
Tabla 11.	Análisis de independencia de mallas para el modelo 1.	50
Tabla 12.	Análisis de independencia de mallas para el modelo 2.	50
Tabla 13.	Análisis de independencia de mallas para el modelo 3.	50
Tabla 14.	Error RMSE entre resultados experimentales y resultados generados mediante simulación.	92

Índice de Figuras:

Figura 1.	Esquema de funcionamiento de una batería de ion litio.	6
Figura 2.	Elementos que conforman la batería 18650.	7
Figura 3.	Dimensiones de la batería de Li-ion 18650.	8
Figura 4.	Características de descarga por temperatura.	15
Figura 5.	Características de cargas de la batería de ion de litio.	16
Figura 6.	Características de descargas de la batería de ion de litio.	17
Figura 7.	Perfil de temperatura experimental en un banco de 15 celdas descar- gadas a 1 C en condiciones de convección natural y luego enfriado por convección forzada (velocidad del aire = 1,5 m/s).	18
Figura 8.	Diagrama de flujo de la metodología a seguir en el presente trabajo de tesis.	27
Figura 9.	Flujo de proceso para la búsqueda de información sobre las condiciones físicas de operación de un módulo de baterías de iones de litio.	28
Figura 10.	Flujo de proceso para la construcción del prototipo correspondiente al segundo objetivo.	29
Figura 11.	Flujo de proceso para evaluar el desempeño del banco de tubos con generación de calor interna para recrear condiciones de operación de baterías con diferentes configuraciones geométricas.	30
Figura 12.	Metodología para el procesamiento de datos	30
Figura 13.	Niquelina eléctrica.	34
Figura 14.	Esquema del contorno de aislamiento.	35
Figura 15.	Diseño 1 desarrollado en Inventor.	36
Figura 16.	Diseño 2 desarrollado en Inventor.	37
Figura 17.	Diseño 3 desarrollado en Inventor.	37
Figura 18.	Medidas de la barra cilíndrica de aluminio.	38
Figura 19.	Barra cilíndrica de aluminio.	41
Figura 20.	Molde uno en impresión 3D.	42
Figura 21.	Molde dos en impresión 3D.	43
Figura 22.	Molde tres en impresión 3D.	44
Figura 23.	Contorno de madera.	45
Figura 24.	Metodología para el procesamiento y pre-procesamiento CFD.	46
Figura 25.	Modelo uno rectangular con distancia entre centro de 25 mm	46
Figura 26.	Modelo dos rectangular con distancia entre centro de 35 mm.	47
Figura 27.	Modelo tres rectangular con distancia entre centro de 45 mm.	47
Figura 28.	Batería ion de litio 18650, las unidades están dadas en mm.	48
Figura 29.	Modelo 3D del diseño 1 realizado en SpaceClaim.	48
Figura 30.	Modelo 3D del diseño 2 realizado en SpaceClaim.	49
Figura 31.	Modelo 3D del diseño 3 realizado en SpaceClaim.	49
Figura 32.	Condiciones iniciales y de contorno.	53
Figura 33.	Diseño conceptual del banco de tubos.	55
Figura 34.	Ensamble del banco de tubos.	55
Figura 35.	Mediciones experimentales del diseño 1.	56

Figura 36.	Diferencia de temperatura al final del proceso entre celdas para el diseño 1.	57
Figura 37.	Mediciones de temperatura para el diseño 1 con espaciamiento entre celdas de 25 mm al final del proceso.	57
Figura 38.	Convección natural celdas 1, 2, 3 y 4.	58
Figura 39.	Convección natural celdas 5, 6, 7 y 8.	59
Figura 40.	Convección natural celdas 9, 10, 11 y 12.	59
Figura 41.	Convección natural celdas 13, 14, 15 y 16.	60
Figura 42.	Mediciones experimentales del diseño 2.	61
Figura 43.	Diferencia de temperatura entre celdas al final del proceso para el diseño 2.	61
Figura 44.	Mediciones para el diseño 2 con espaciamiento entre celdas de 35 mm, proceso de convección natural, celdas 1, 2, 3 y 4.	62
Figura 45.	Mediciones para el diseño 2 con espaciamiento entre celdas de 35 mm, proceso de convección natural, celdas 5, 6, 7 y 8.	63
Figura 46.	Mediciones para el diseño 2 con espaciamiento entre celdas de 35 mm, proceso de convección natural, celdas 9, 10, 11 y 12.	63
Figura 47.	Mediciones para el diseño 2 con espaciamiento entre celdas de 35 mm, proceso de convección natural, celdas 13, 14, 15, 16.	64
Figura 48.	Mediciones de temperatura para el diseño 2 con espaciamiento entre celdas de 35 mm al final del proceso.	65
Figura 49.	Mediciones experimentales del diseño 3.	66
Figura 50.	Diferencia de temperatura entre celdas para el diseño 3.	66
Figura 51.	Mediciones para el diseño 3 con espaciamiento entre celdas de 45 mm, proceso de convección natural, celdas 1, 2, 3 y 4.	67
Figura 52.	Mediciones para el diseño 3 con espaciamiento entre celdas de 45 mm, proceso de convección natural, celdas 5, 6, 7 y 8.	68
Figura 53.	Mediciones para el diseño 3 con espaciamiento entre celdas de 45 mm, proceso de convección natural, celdas 9, 10, 11 y 12.	68
Figura 54.	Mediciones para el diseño 3 con espaciamiento entre celdas de 45 mm, proceso de convección natural, celdas 13, 14, 15 y 16.	69
Figura 55.	Mediciones de temperatura para el diseño 3 con espaciamiento entre celdas de 45 mm al final del proceso.	70
Figura 56.	Comparación de temperatura al final del proceso entre los tres modelos celda 1, 2, 3 y 4.	71
Figura 57.	Comparación de temperatura al final del proceso entre los tres modelos celda 5, 6, 7 y 8.	71
Figura 58.	Comparación de temperatura al final del proceso entre los tres modelos celda 9, 10, 11 y 12.	72
Figura 59.	Comparación de temperatura al final del proceso entre los tres modelos celda 13, 14, 15 y 16.	72
Figura 60.	Simulación del proceso de convección natural y forzada para el diseño 1.	73
Figura 61.	Simulación del diseño 1 con espaciamiento entre celdas de 25 mm, temperatura al final del proceso.	74
Figura 62.	Simulación del diseño 1 con espaciamiento entre celdas de 25 mm, convección natural de las celdas 1, 2, 3, 4.	75
Figura 63.	Simulación del diseño 1 con espaciamiento entre celdas de 25 mm, convección natural de las celdas 5, 6, 7, 8.	75

Figura 64.	Simulación del diseño 1 con espaciamiento entre celdas de 25 mm, convección natural de las celdas 9, 10, 11, 12.	76
Figura 65.	Simulación del diseño 1 con espaciamiento entre celdas de 25 mm, convección natural de las celdas 13, 14, 15, 16.	76
Figura 66.	Resultados de simulación numérica del diseño 1 con espaciamiento entre celdas de 25 mm.	77
Figura 67.	Simulación del proceso de convección natural y forzada para el diseño 2.	78
Figura 68.	Simulación del diseño 2 con espaciamiento entre celdas de 35 mm, proceso de convección forzada.	79
Figura 69.	Simulación del diseño 2 con espaciamiento entre celdas de 35 mm, proceso de convección natural celdas 1, 2, 3 y 4.	80
Figura 70.	Simulación del diseño 2 con espaciamiento entre celdas de 35 mm, proceso de convección natural celdas 5, 6, 7 y 8.	80
Figura 71.	Simulación del diseño 2 con espaciamiento entre celdas de 35 mm, proceso de convección natural celdas 9, 10, 11 y 12.	81
Figura 72.	Simulación del diseño 2 con espaciamiento entre celdas de 35 mm, proceso convección natural celdas 13, 14, 15 y 16.	81
Figura 73.	Resultados de simulación numérica del diseño 2 con espaciamiento entre celdas de 35 mm.	82
Figura 74.	Simulación del proceso de convección natural y forzada para el diseño 3.	83
Figura 75.	Simulación del diseño 3 con espaciamiento entre celdas de 45 mm, proceso de convección forzada.	84
Figura 76.	Simulación del diseño 3 con espaciamiento entre celdas de 45 mm, proceso de convección natural celdas 1, 2, 3 y 4.	85
Figura 77.	Simulación del diseño 3 con espaciamiento entre celdas de 45 mm, proceso de convección natural celdas 5, 6, 7 y 8.	85
Figura 78.	Simulación del diseño 3 con espaciamiento entre celdas de 45 mm, proceso de convección natural celdas 9, 10, 11 y 12.	86
Figura 79.	Simulación del diseño 3 con espaciamiento entre celdas de 45 mm, proceso de convección natural celdas 13, 14, 15 y 16.	86
Figura 80.	Resultados de simulación numérica del diseño 3 con espaciamiento entre celdas de 45 mm.	87
Figura 81.	Comparación entre prueba experimental y simulación en convección forzada para el diseño 1.	88
Figura 82.	Comparación entre prueba experimental y simulación en convección forzada para el diseño 2.	88
Figura 83.	Comparación entre prueba experimental y simulación en convección forzada para el diseño 3.	89
Figura 84.	Comparación entre prueba experimental y simulación en convección natural para el diseño 1.	90
Figura 85.	Comparación entre prueba experimental y simulación en convección natural para el diseño 2.	90
Figura 86.	Comparación entre prueba experimental y simulación en convección natural para el diseño 3.	91

Índice de Anexos:

Anexo 1.	Datos de temperatura del modelo 1, distancia entre celdas de 25 mm . .	103
Anexo 2.	Datos de temperatura del modelo 2, distancia entre celdas de 35 mm . .	104
Anexo 3.	Datos de temperatura del modelo 3, distancia entre celdas de 45 mm . .	105
Anexo 4.	Código para la obtención de datos en Excel	106
Anexo 5.	Medición de la velocidad del viento que ingresa al módulo de 16 celdas .	107
Anexo 6.	Certificación de traducción del resumen	108

Simbología

Acrónimos

BIL	Batería de iones de litio
CFD	Dinámica de fluidos computacional, del inglés <i>Computational fluid dynamics</i>

Constantes y variables

h	Coefficiente de transferencia de calor ($\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$)
R_{cond}	Resistencia de conducción (K W^{-1})
R_{int}	Resistencia interna de una celda

(Ω)

T	Temperatura (K)
t	Tiempo (s)
T_f	Temperatura de flujo de aire ($^{\circ}\text{C}$)

Símbolos griegos

ρ	Densidad ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
σ	Constante de Steffan-Boltzmann $\sigma=5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$

Subíndices

amb	Ambiente
-------	----------

1. Título

Diseño y construcción de un banco de tubos con generación de calor para emulación de estrategias de enfriamiento en un banco de baterías enfriadas por aire.

2. Resumen

El presente trabajo de titulación tuvo como propósito diseñar un prototipo de banco de tubos con generación de calor para emular el comportamiento térmico de un pack de baterías Li-ion 18650. En la fase de diseño, se desarrollaron los componentes del sistema, desde la base del banco hasta las barras de aluminio que representan las características geométricas de la batería de ion de litio. Para la validación se realizaron pruebas con el objetivo de observar las celdas que alcanzan las temperaturas máximas. Además, se estudiaron tres casos diferentes que se caracterizan por la distancia entre las barras de aluminio. El objetivo principal es desarrollar un sistema que permita investigar el comportamiento de las celdas mediante un método de enfriamiento por aire. El prototipo simula la generación de calor interna de las baterías mediante el uso de niquelinas eléctricas y esto permitió el estudio del método utilizado. La convección forzada con una corriente de aire a 3,1 m/s resultó efectiva en la reducción de temperaturas en los tres diseños, demostrando que el enfriamiento por aire es una estrategia viable. Las simulaciones realizadas en el software Ansys Fluent y las pruebas experimentales demostraron similitud en el perfil de temperatura aunque una diferencia alejada en cuanto a los valores. La construcción del proyecto se llevó a cabo utilizando materiales accesibles en la ciudad y con ayuda del taller mecánico de la carrera de Electromecánica se logró realizar las piezas que fueron diseñadas. En cuanto al componente principal que fueron las niquelinas se optó por adquirirlas fuera de la ciudad debido a las dimensiones requeridas por el prototipo.

Palabras claves: Baterías de iones de litio, emular, enfriamiento por aire, prototipo experimental, convección forzada.

Abstract

The purpose of this thesis work was to design a prototype heat-generating tube bank to emulate the thermal behavior of an 18650 Li-ion battery pack. In the design phase, the system components were developed, from the bank base to the aluminum bars that represent the geometric characteristics of the lithium-ion battery. For validation, tests were conducted to observe the cells that reach maximum temperatures. Additionally, three different cases characterized by the distance between aluminum bars were studied. The main objective is to develop a system that allows investigation of cell behavior through an air cooling method. The prototype simulates the internal heat generation of batteries through the use of electrical heating elements, which enabled the study of the method used. Forced convection with an airflow of 3.1 m/s proved effective in reducing temperatures in all three designs, demonstrating that air cooling is a viable strategy. The simulations performed in Ansys Fluent software and experimental tests showed similarity in temperature profile although with a significant difference in values. The project construction was carried out using materials accessible in the city, and with the help of the Electromechanical program's mechanical workshop, the designed pieces were successfully manufactured. Regarding the main component, the heating elements, it was necessary to acquire them from outside the city due to the dimensions required by the prototype.

Keywords: Lithium-ion batteries, emulate, air cooling, experimental prototype, forced convection.

3. Introducción

A medida que la sociedad progresa hacia una electrificación más ecológica, las baterías se han vuelto fundamentales en el almacenamiento de energía. Desde su introducción en la década de 1990, las baterías de iones de litio (Li-ion) han ganado prominencia, convirtiéndose en la opción preferida para una amplia gama de aplicaciones, que abarcan desde dispositivos móviles hasta vehículos eléctricos y drones. Estas baterías destacan por su mayor densidad de energía, tasas reducidas de autodescarga y vida útil prolongada en comparación con otras tecnologías recargables.

Una batería de iones de litio puede tender a sobrecalentarse y es susceptible a sufrir daños por altos voltajes. El resultado puede ser fuga térmica y combustión en algunos casos. Por lo tanto, es esencial disponer de un sistema eficiente de gestión térmica de la batería, para mantener la temperatura de la batería dentro de un rango seguro que está limitado entre -20 y 60 °C y minimizar la variación de temperatura entre celdas, mejorando así la seguridad de la batería (Ojeda, 2017).

El proyecto puede contribuir a la solución de problemas relacionados con la gestión térmica y la eficiencia energética en los equipos que dependan del uso de las baterías de ion de litio. Cengel y Ghajar (2020) destacan que estos aspectos son desafíos clave en numerosas industrias y operaciones locales. El desarrollo de sistemas de enfriamiento optimizados y eficientes puede traducirse en ahorros significativos de energía, reducción de emisiones contaminantes y mejora de la productividad. Además, el proyecto podría generar conocimientos y soluciones prácticas adaptadas a las condiciones y necesidades específicas de las industrias locales, fomentando así el desarrollo sostenible y la competitividad de estas empresas en el mercado.

La gestión térmica de las baterías de ion de litio se puede dividir en: enfriamiento por aire, refrigeración natural, refrigeración líquida y refrigeración directa. El presente proyecto se centra en la refrigeración de las baterías de iones de litio por aire.

En el estudio desarrollado por Huang et al. (2020), encontraron que el enfriamiento por aire forzado puede reducir eficazmente la temperatura máxima y la distribución de temperatura no uniforme del banco de baterías. Además, Jiang et al. (2021) evidenciaron que un diseño optimizado de canales de aire mejora significativamente la uniformidad de temperatura y el rendimiento térmico del banco de baterías. Por otra parte, Li et al. (2022) descubrieron que la orientación del flujo de aire tiene un impacto significativo en la disipación de calor y la uniformidad de temperatura del banco de baterías. También, Zheng et al. (2022) demostraron que el diseño de canales en un mismo orden, mejoró la disipación de calor y redujo la temperatura máxima del banco de baterías en comparación

con diseños convencionales. Mientras que, Liu et al. (2023) demostraron que el uso de aletas en los canales de aire mejoró la transferencia de calor y redujo la temperatura máxima del banco de baterías en comparación con diseños sin aletas.

El presente documento de investigación se enfoca en el diseño y construcción de un prototipo de banco de tubos con generación de calor para ensayos de estrategia de enfriamiento con la finalidad de lograr la construcción de un sistema similar a un pack de baterías de Ion de Litio 18650, que beneficie en los temas de investigación relacionados al sistema de enfriamiento por aire. Al implementar un sistema de refrigeración por aire a las BIL se logra generar una corriente de aire, introduciéndolo en el interior del pack de baterías (forzando un cierto caudal de aire por medio de un ventilador) y hacerlo recircular por su interior para generar el intercambio térmico. Esta corriente de aire termina saliendo al exterior para permitir la entrada de más caudal de aire fresco.

Objetivo general:

- Diseñar y construir un banco de tubos con generación de calor para emular el desempeño térmico de un banco de baterías con enfriamiento por aire.

Objetivos específicos:

- Describir condiciones físicas de operación de un módulo de baterías de iones de litio con base en la revisión literaria.
- Construir un prototipo experimental de un banco de tubos para emular el desempeño térmico de un banco de baterías cilíndricas con enfriamiento por aire.
- Evaluar el desempeño del banco de tubos con generación de calor interna para recrear condiciones de operación de baterías con diferentes configuraciones geométricas.

El documento se estructuró de la siguiente manera: en el primer capítulo se presentó el marco teórico, donde se explicaron los conceptos básicos y las características de las baterías de ion de litio. En el segundo capítulo se detalló la metodología utilizada para el diseño y construcción del prototipo. El tercer capítulo incluyó los resultados obtenidos a partir de las pruebas experimentales y simulaciones. Finalmente, en el cuarto capítulo se presentaron las discusiones, conclusiones y recomendaciones del estudio realizado.

4. Marco Teórico

4.1. Baterías de iones de litio

Las baterías de iones de litio se definen como dispositivos utilizados para almacenar electricidad. Augusto (2020) menciona que los iones de litio pasan del ánodo al cátodo de la batería a través de un electrólito que también contiene litio durante el proceso de descarga. Estas baterías pertenecen a una familia de baterías recargables muy utilizadas que han atraído mucha la atención en los últimos años debido a su largo ciclo de vida y su alta densidad energética. Antes de que las primeras baterías comerciales de iones de litio estuvieran disponibles en 1991.

Tomando como referencia el óxido de litio y cobalto (LiCoO_2) como material del cátodo, el principio de funcionamiento de la batería se puede describir como se observa en la **Figura 1**. Durante el proceso de carga, el potencial oxida el centro metálico del cátodo y el material da algunos iones de litio a través del electrólito hasta que queden incrustados. Estos iones permanecen en el ánodo hasta el proceso de descarga, donde el material del cátodo se reduce gracias a un circuito externo que conduce electrones, y los iones de litio salen del ánodo, y vuelve a estar incrustado en el cátodo. En los procesos de oxidación y reducción en el cátodo, el movimiento de los electrones a través del circuito externo corresponde a la corriente utilizada para realizar el trabajo.

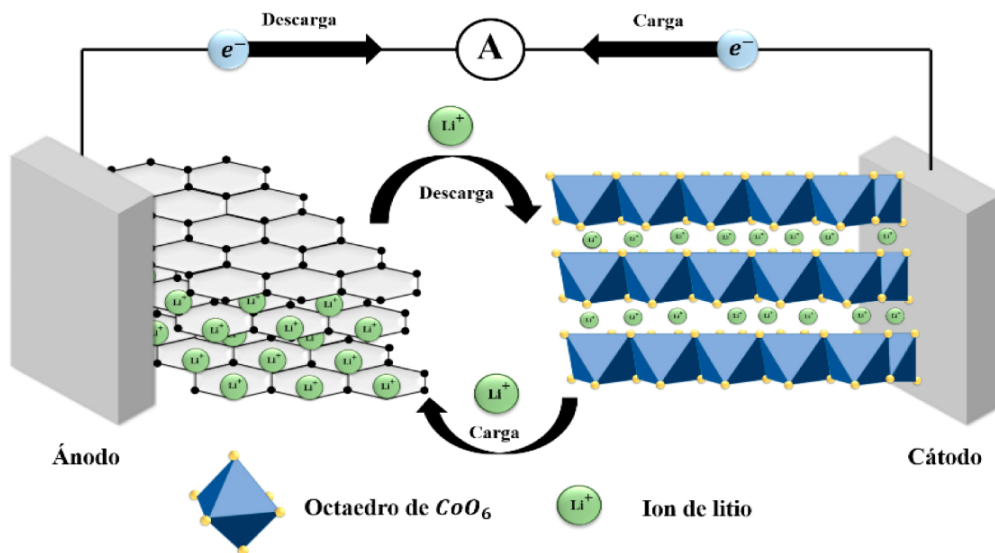


Figura 1. Esquema de funcionamiento de una batería de ion litio.

Fuente: Tomado de Augusto, 2020.

El mecanismo de almacenamiento de energía en una celda de iones de litio se fundamenta en el fenómeno químico denominado intercalación, esta involucra la inserción y/o extracción de iones de litio (Li^+) que cuentan con una carga previa dentro de las estructuras moleculares de los electrodos.

En el proceso de carga de estas celdas, el electrodo negativo es eléctricamente reducido, de tal manera que los (Li^+) se insertan (los iones de litio viajan del electrodo positivo al negativo) en las capas individuales del elemento que está formado el ánodo (Pilco, 2018). Por otro lado, el proceso de descarga ocurre exactamente lo contrario, es decir, los (Li^+) abandonan el ánodo para regresar al electrodo positivo; Debido a que la celda está eléctricamente aislada los electrones deben seguir el camino exterior hacia los colectores de corriente.

4.1.1. Componentes externos e internos de una batería recargable de Li-ion 18650 (18 mm de diámetro y 65 mm de altura)

En la **Figura 2** se puede apreciar todos los componentes internos y externos de la batería 18650.

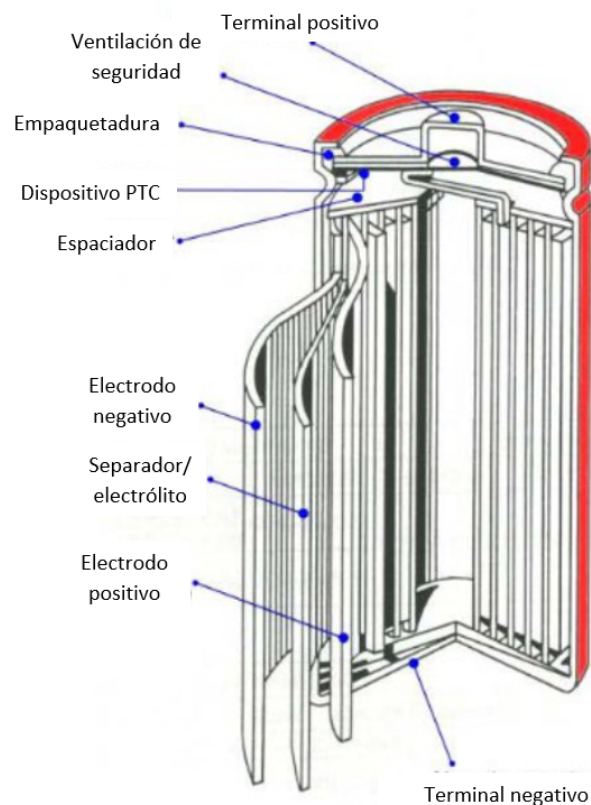


Figura 2. Elementos que conforman la batería 18650.

Fuente: Tomado de Gongora, 2013.

Cuatro de los elementos más notables en la **Figura 2** se destacan y se describen a continuación:

- El ánodo suele ser de grafito.
- El cátodo es de una aleación de litio (LiFPO_4 , LiCoO_2 , LiMn_2O_4).

- El electrolito es una sal de litio en un disolvente orgánico (un polímero en las baterías de polímero de litio).
- Separador es generalmente un polímero poroso.

4.1.2. Organización, detalles técnicos y tamaño de la batería de ion de litio 18650

De acuerdo con Ojeda (2017), la batería Li-ion 18650 se caracteriza por ser de bajo mantenimiento, sus características distintivas incluyen una alta capacidad de almacenamiento de energía y una notable resistencia a la descarga lo que la convierte en una opción óptima para el avance de este estudio.

La incidencia de la memoria en las baterías de Li-ion es considerablemente menor en comparación con otros tipos de baterías. Además, su disposición resulta más adecuada para los objetivos de este estudio, como se muestra en la **Figura 3**.

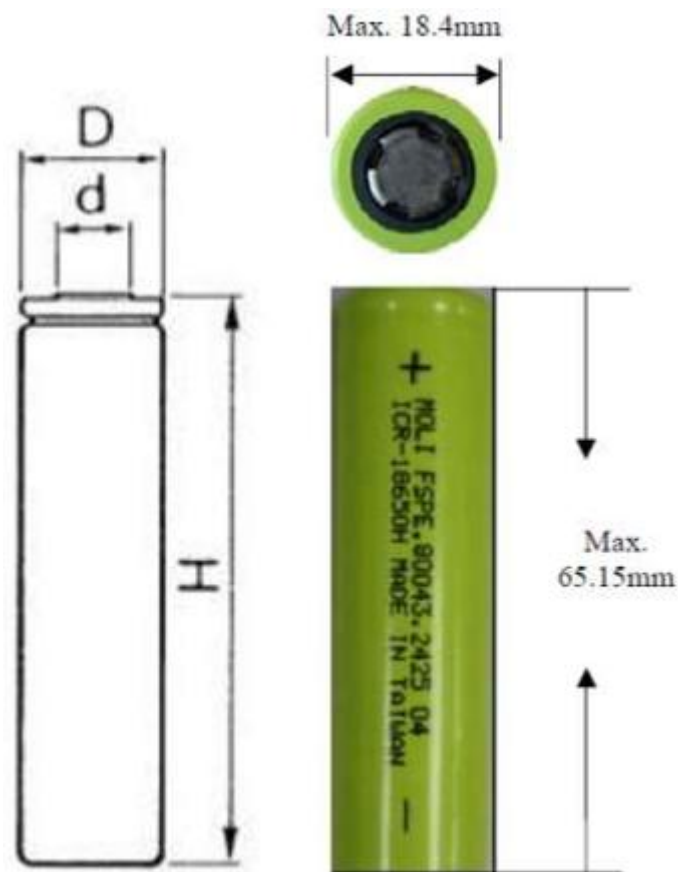


Figura 3. Dimensiones de la batería de Li-ion 18650.

Fuente: Tomado de Ojeda, 2017.

Las dimensiones técnicas de la batería de Li-Ion 18650 se presentan en la **Tabla 1**.

Tabla 1. Dimensiones técnicas de la batería recargable de Li-ion 18650.

	H	64.7 mm Min. 65.15 mm Max
Dimensiones técnicas	D	18.05 mm Min. – 18.4 mm Max.
	d	9.0 mm

Fuente: Tomado de Ojeda, 2017.

Las especificaciones técnicas de una batería de Li-Ion 18650 de 2600 mAh se exhiben en la **Tabla 2**.

Tabla 2. Especificaciones de la batería de Li-ion 18650.

Descripción	Valor
Capacidad nominal	2600 mAh (0.2C, 2.75 V descarga)
Capacidad mínima	2550 mAh (0.2C, 2.75 V descarga)
Voltaje de carga	4.2± 0.05 V
Voltaje nominal	3.7 V
Método de carga	CC-CV (Voltaje constante con corriente limite)
Corriente de carga	Carga estándar: 1300 mA Carga rápida: 2600 mA
Tiempo de carga	Carga estándar: 3 h Carga rápida: 2.5 h
Corriente de carga máxima	2600 mA (Temperatura ambiente 25°C)
Corriente de descarga máxima	5200 mA (Temperatura ambiente 25°C)
Corte de voltaje en la descarga	2.75 V
Peso de la batería	47 g Max
Dimensiones de la celda	Altura: 65.00 mm Mas Diámetro: 18.40 mm Max
Temperatura de operación	Carga 0 a 45 °C Descarga: -20 a 60 °C
Temperatura de almacenamiento	1 año: -20–25 °C 3 meses: -20–45 °C height 1 mes: -20–60 °C

Fuente: Tomado de Ojeda, 2017.

Las baterías experimentan dificultades en condiciones extremadamente frías y cálidas, sin embargo, en temperaturas bajas, los procesos de difusión iónica y movimiento pueden sufrir obstáculos y también pueden tener lugar reacciones secundarias perjudiciales. Por otro lado, temperaturas elevadas favorecen otras reacciones secundarias, como la generación de corrosión y gases.

Como se detalla en la **Tabla 2**, el rango de temperaturas para el funcionamiento de descarga de una batería generalmente presenta límites inferiores y superiores más amplios en comparación con el rango de operación durante la carga; Las baterías de Li-ion, por ejemplo, tienen un rendimiento óptimo en el rango de temperatura de -20 a 60 °C.

4.1.3. *Generación de calor en baterías de litio*

Choudhari et al. (2020) indican que la generación de calor es descrita por la **Ecua-ción 1**.

$$Q_g = I^2 R_i - T \frac{\Delta S}{F} \quad (1)$$

Donde:

Q_g : Tasa de generación interna de calor por unidad de volumen.

R_i : Resistencia interna.

I : Corriente de la celda.

F : Número de Faraday.

ΔS : Variación de entropía.

T : Temperatura de la celda.

La generación de calor dentro de las baterías de iones de litio es importante porque afecta la temperatura de la batería, lo que a su vez tiene un impacto en cómo diseñamos y controlamos la temperatura de la batería, diseñar una batería de iones de litio es complicado debido a que involucra muchos procesos diferentes a diferentes escalas, por ejemplo, las reacciones químicas ocurren en una parte muy pequeña de la batería a nivel de átomos y hay muchos factores que influyen en cómo funcionan.

4.1.4. *Transferencia de calor en banco de tubos*

La transferencia de calor en banco de tubos es un fenómeno crucial en numerosas aplicaciones industriales, como intercambiadores de calor, calderas, condensadores y sistemas de refrigeración, este proceso implica la transferencia de energía térmica entre un fluido y un arreglo de tubos, lo que permite el intercambio de calor entre dos fluidos separados físicamente; El diseño y optimización adecuados de los bancos de tubos son fundamentales para lograr una transferencia de calor eficiente y, en consecuencia, un mejor rendimiento energético y una mayor eficiencia operativa (Chu et al., 2020).

4.1.4.1 Mecanismos de transferencia de calor. La transferencia de calor en un banco de tubos se produce a través de tres mecanismos principales: conducción, convección y radiación. La conducción ocurre dentro de los tubos y a través de las paredes de los mismos, mientras que la convección implica la transferencia de calor entre las superficies de los tubos y el fluido circundante. La radiación térmica puede desempeñar un papel importante en aplicaciones de alta temperatura (Sahin et al., 2020).

4.1.4.2 Régimen de flujo y patrones de flujo. El régimen de flujo y los patrones de flujo son factores críticos que influyen en la transferencia de calor en un banco de tubos, el régimen de flujo puede ser laminar o turbulento, dependiendo del número de Reynolds del fluido; El flujo turbulento, caracterizado por fluctuaciones y remolinos, generalmente mejora la transferencia de calor en comparación con el flujo laminar (Xu et al., 2020). Además, los patrones de flujo, como el flujo a contracorriente, paralelo o cruzado, pueden afectar significativamente la eficiencia de la transferencia de calor (Jiang et al., 2021).

4.1.4.3 Disposición geométrica del banco de tubos. La disposición geométrica del banco de tubos, incluyendo el espaciado entre tubos, el ángulo de inclinación y la configuración de los tubos (en línea o desplazados), tiene un impacto significativo en la transferencia de calor, una disposición óptima puede mejorar la turbulencia del fluido, aumentar el área de transferencia de calor y minimizar la caída de presión (Gao et al., 2021).

4.1.4.4 Efectos de la geometría de los tubos. La geometría de los tubos, como el diámetro, la longitud y la rugosidad superficial, también influye en la transferencia de calor. Tubos con mayor diámetro pueden aumentar el área de transferencia de calor, mientras que tubos más rugosos pueden mejorar la turbulencia del fluido y, por lo tanto, incrementar la transferencia de calor por convección (Khalid et al., 2020).

4.1.4.5 Correlaciones empíricas y modelos numéricos. Para predecir y analizar la transferencia de calor en bancos de tubos, se han desarrollado numerosas correlaciones empíricas y modelos numéricos. Estas herramientas permiten calcular parámetros clave, como los coeficientes de transferencia de calor, las caídas de presión y las temperaturas de operación (Zhen et al., 2021). Sin embargo, es importante tener en cuenta las limitaciones y suposiciones de estos modelos, ya que pueden no ser aplicables a todas las condiciones de operación (Ding et al., 2020).

4.1.4.6 Optimización y mejora de la transferencia de calor. La optimización y mejora de la transferencia de calor en bancos de tubos es un área de investigación activa. Se han explorado diversas técnicas, como la adición de aletas, la utilización de superficies

extendidas, el uso de aditivos en el fluido y la implementación de geometrías complejas (Wang et al., 2022). Estas técnicas tienen como objetivo aumentar el área de transferencia de calor, mejorar la turbulencia del fluido y, en última instancia, incrementar la eficiencia térmica del sistema (Huang et al., 2021).

4.1.4.7 Aplicaciones industriales de banco de tubos. Los bancos de tubos se utilizan en una amplia gama de aplicaciones industriales, incluyendo intercambiadores de calor en centrales eléctricas, plantas químicas, refinerías de petróleo, sistemas de refrigeración y sistemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado (HVAC) (Xu et al., 2021). El diseño y optimización adecuados de los bancos de tubos son cruciales para lograr una operación eficiente y rentable en estas aplicaciones (Zhang et al., 2020).

La transferencia de calor en bancos de tubos es un proceso complejo que implica diversos mecanismos y factores, como el régimen de flujo, los patrones de flujo, la disposición geométrica, las propiedades de los tubos y las condiciones operativas; Una comprensión profunda de estos factores y la implementación de técnicas de optimización son fundamentales para mejorar la eficiencia térmica y el rendimiento energético en las aplicaciones industriales que involucran bancos de tubos.

4.1.4.8 Principios de funcionamiento. Las baterías de iones de litio son un tipo de batería recargable que utiliza iones de litio como portadores de carga. Estas baterías constan de un ánodo (electrodo negativo), un cátodo (electrodo positivo) y un electrolito que permite el movimiento de iones de litio (Choi & Aurbach, 2020). Durante la carga, los iones de litio se desplazan del cátodo al ánodo, mientras que durante la descarga, los iones de litio se mueven en la dirección opuesta, generando así una corriente eléctrica.

4.1.4.9 Materiales para el ánodo El ánodo es un componente clave en las baterías de iones de litio, ya que determina la capacidad y la vida útil de la batería; El grafito ha sido el material de ánodo más utilizado debido a su bajo costo, buena conductividad eléctrica y capacidad para alojar iones de litio (Wang et al., 2020). Sin embargo, se han explorado materiales alternativos, como el silicio y los compuestos de litio-metal, con el objetivo de aumentar la capacidad de almacenamiento de energía (Hu et al., 2021).

4.1.4.10 Materiales para el cátodo. El cátodo desempeña un papel crucial en la determinación de la densidad de energía y el voltaje de la batería; Los materiales más comunes para el cátodo son los óxidos de metales de transición, como el óxido de litio-cobalto ($LiCoO_2$), el óxido de litio-níquel-manganeso-cobalto (NMC) y el óxido de litio-hierro-fosfato ($LiFePO_4$) (Choi & Aurbach, 2020). Estos materiales ofrecen diferentes características en términos de densidad de energía, estabilidad térmica y seguridad, lo

que permite diseñar baterías para diferentes aplicaciones.

4.1.4.11 Electrolitos. El electrolito es un componente fundamental que facilita el movimiento de iones de litio entre el ánodo y el cátodo. Los electrolitos más utilizados son mezclas de sales de litio, como el hexafluorofosfato de litio ($LiPF_6$), disueltas en disolventes orgánicos, como carbonatos de etileno y dimetilo (Xu et al., 2020). Estos electrolitos deben ser estables químicamente, tener una alta conductividad iónica y ser compatibles con los materiales del ánodo y el cátodo.

4.1.4.12 Seguridad y estabilidad térmica. La seguridad y la estabilidad térmica son aspectos críticos en las baterías de iones de litio. Estas baterías pueden experimentar reacciones exotérmicas peligrosas si se someten a condiciones de abuso, como sobredescarga, sobrecalentamiento o cortocircuito (Lin et al., 2021). Se han realizado esfuerzos para mejorar la seguridad mediante el uso de materiales más estables, el diseño de sistemas de gestión de baterías avanzados y la incorporación de dispositivos de protección contra sobrecalentamiento y cortocircuitos.

4.1.4.13 Ciclo de vida y degradación. El ciclo de vida y la degradación de las baterías de iones de litio son aspectos importantes que afectan su rendimiento a largo plazo. Durante los ciclos de carga y descarga, se producen cambios estructurales y químicos en los materiales del ánodo y el cátodo, lo que puede provocar una disminución gradual de la capacidad de la batería (Jiang et al., 2020). Además, factores como la temperatura, las tasas de carga/descarga y el envejecimiento pueden acelerar la degradación de la batería.

4.1.4.14 Gestión térmica. La gestión térmica es crucial para garantizar un rendimiento óptimo y una vida útil prolongada de las baterías de iones de litio. Las fluctuaciones de temperatura pueden afectar negativamente la capacidad, la resistencia interna y la seguridad de la batería (Wang et al., 2022). Por lo tanto, se han desarrollado sistemas de gestión térmica que incorporan refrigeración líquida, refrigeración por aire o sistemas de calefacción para mantener las baterías dentro de un rango de temperatura adecuado.

4.1.4.15 Reciclaje y sostenibilidad. A medida que aumenta la demanda de baterías de iones de litio, el reciclaje y la sostenibilidad se han convertido en temas de gran importancia. El reciclaje de las baterías usadas permite recuperar materiales valiosos, como cobalto, níquel y litio, reduciendo así el impacto ambiental y los costos de producción (Nazer et al., 2021). Además, se están explorando métodos de fabricación más sostenibles y el uso de materiales más abundantes y respetuosos con el medio ambiente.

4.1.4.16 Aplicaciones y tendencias futuras. Las baterías de iones de litio se utilizan en una amplia gama de aplicaciones, incluyendo dispositivos electrónicos portátiles, vehículos eléctricos y sistemas de almacenamiento de energía renovable. A medida que la demanda de energía limpia y eficiente continúa creciendo, se prevé que las baterías de iones de litio desempeñen un papel fundamental en la transición hacia una economía baja en carbono (Larcher, Tarascon, 2020).

Las baterías de iones de litio son una tecnología clave para el almacenamiento de energía, con un gran potencial para impulsar la transición hacia fuentes de energía renovables y la electrificación del transporte. Sin embargo, aún existen desafíos importantes en cuanto a la seguridad, el rendimiento, el costo y la sostenibilidad que deben abordarse mediante investigaciones continuas y avances en los materiales, el diseño y los procesos de fabricación.

4.2. Principio de funcionamiento y rangos de operación de las baterías de litio

Las baterías de iones de litio son un tipo de batería recargable que utilizan iones de litio como portadores de carga. El principio de funcionamiento se basa en el movimiento de los iones de litio entre el ánodo (electrodo negativo) y el cátodo (electrodo positivo) durante los procesos de carga y descarga (Choi- Aurbach, 2020).

Durante la carga, los iones de litio se desplazan desde el cátodo al ánodo, donde se alojan en la estructura del material anódico. Este proceso implica una reacción de oxidación en el cátodo y una reacción de reducción en el ánodo.

Durante la descarga, los iones de litio se mueven en la dirección opuesta, desde el ánodo hacia el cátodo, generando así una corriente eléctrica que puede ser utilizada para alimentar dispositivos o circuitos externos (Nitta et al., 2015).

El electrolito, que es un conductor iónico, facilita el movimiento de los iones de litio entre el ánodo y el cátodo, mientras que los colectores de corriente y los separadores desempeñan funciones de conducción eléctrica y aislamiento, respectivamente (Winter-Brodd, 2004).

4.2.1. Rangos de Operación de las Baterías de Iones de Litio

Las baterías de iones de litio tienen varios rangos de operación que deben ser considerados para garantizar un rendimiento óptimo y una vida útil prolongada. Estos rangos incluyen:

4.2.1.1 Rango de temperatura:

- Temperatura de carga: Típicamente entre 0 °C y 45 °C (Waldmann et al., 2016).
- Temperatura de descarga: Generalmente entre -20 °C y 60 °C (Bandhauer et al., 2011).
- Temperaturas fuera de estos rangos pueden afectar negativamente la vida útil y la seguridad de la batería.

En la **Figura 4** se encuentra representado las características de descarga de las baterías de ion de litio por temperatura.

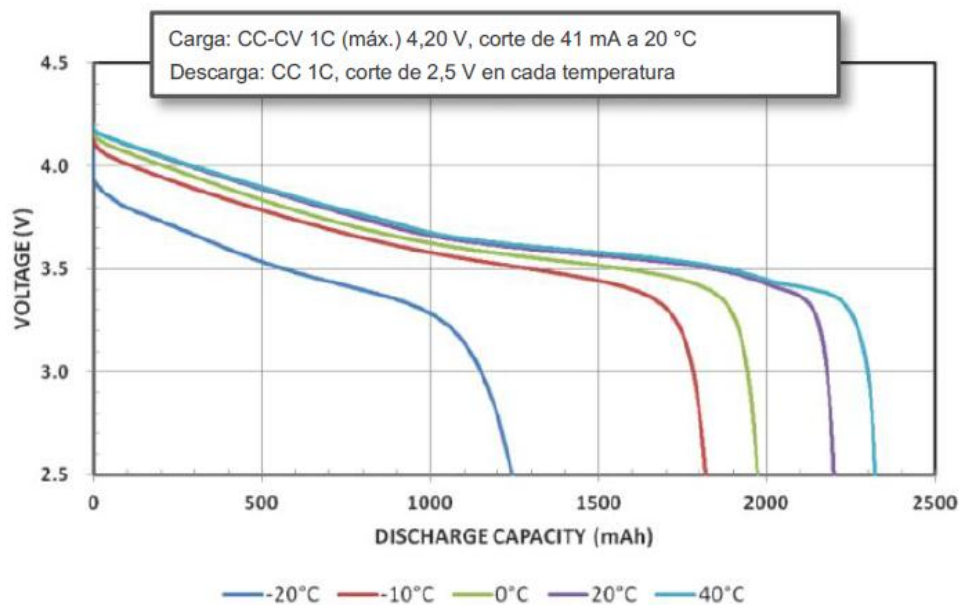


Figura 4. Características de descarga por temperatura.

Fuente: Panasonic Corporation, 2008.

4.2.1.2 Rango de voltaje El voltaje de carga máximo y el voltaje de descarga mínimo son parámetros cruciales en las baterías de iones de litio. Un voltaje de carga superior a 4,2 V por celda puede provocar la degradación de los materiales del electrodo y la descomposición del electrolito, lo que conduce a un envejecimiento acelerado y posibles riesgos de seguridad. Por otro lado, descargar por debajo de 2,5 V por celda puede causar la formación de depósitos en el ánodo, reduciendo la capacidad y la vida útil de la batería. Operar fuera de estos rangos establecidos puede dañar irreversiblemente la batería, disminuyendo su rendimiento y acortando su ciclo de vida. Por lo tanto, es esencial respetar estas limitaciones de voltaje para garantizar un funcionamiento seguro y prolongar la longevidad de las baterías de iones de litio.

4.2.1.3 Rango de corriente

- Corriente de carga: Depende de la capacidad y el diseño de la batería, pero generalmente entre 0,5 C y 1 C (Bandhauer et al., 2011).
- Corriente de descarga: Varía según la aplicación, pero típicamente entre 0,2 C y 2 C (Pistoia, 2014).
- Corrientes excesivas pueden generar calor y dañar la batería.

4.2.1.4 Rango de carga (SOC)

- SOC mínimo: Generalmente entre 10 y 20 % para evitar sobredescarga (Bandhauer et al., 2011).
- SOC máximo: Típicamente entre 80 % y 90 % para evitar sobrecarga (Pistoia, 2014).
- Operar fuera de estos rangos puede acortar la vida útil de la batería.

Estos rangos de operación pueden variar ligeramente según el tipo de batería de iones de litio, los materiales utilizados y la aplicación específica. Es crucial respetar estos rangos y seguir las recomendaciones del fabricante para garantizar un rendimiento óptimo, una vida útil prolongada y un funcionamiento seguro de las baterías de iones de litio, en la **Figura 5** y **Figura 6** se encuentran representadas las características de carga y descarga respectivamente de las baterías de ion de litio.

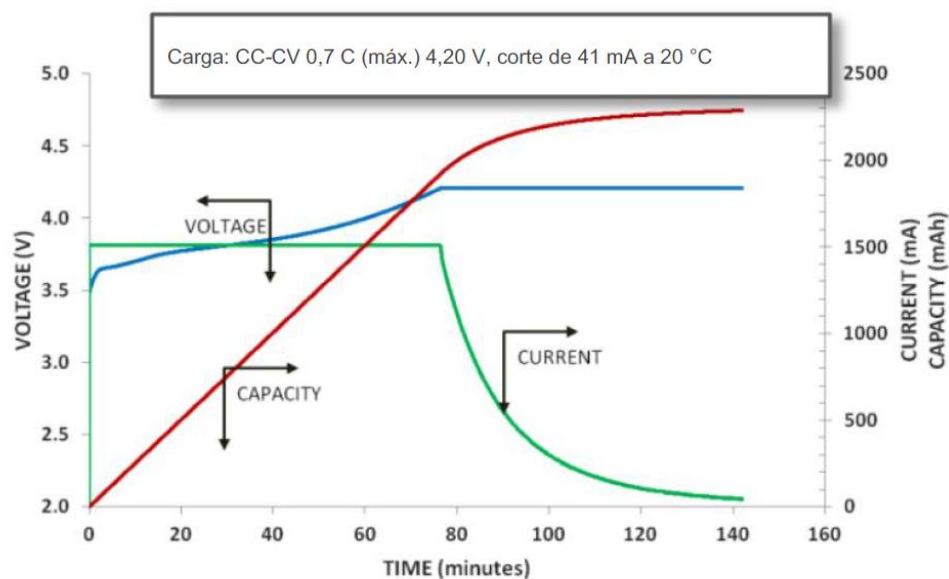


Figura 5. Características de cargas de la batería de ion de litio.

Fuente: Panasonic Corporation, 2008.

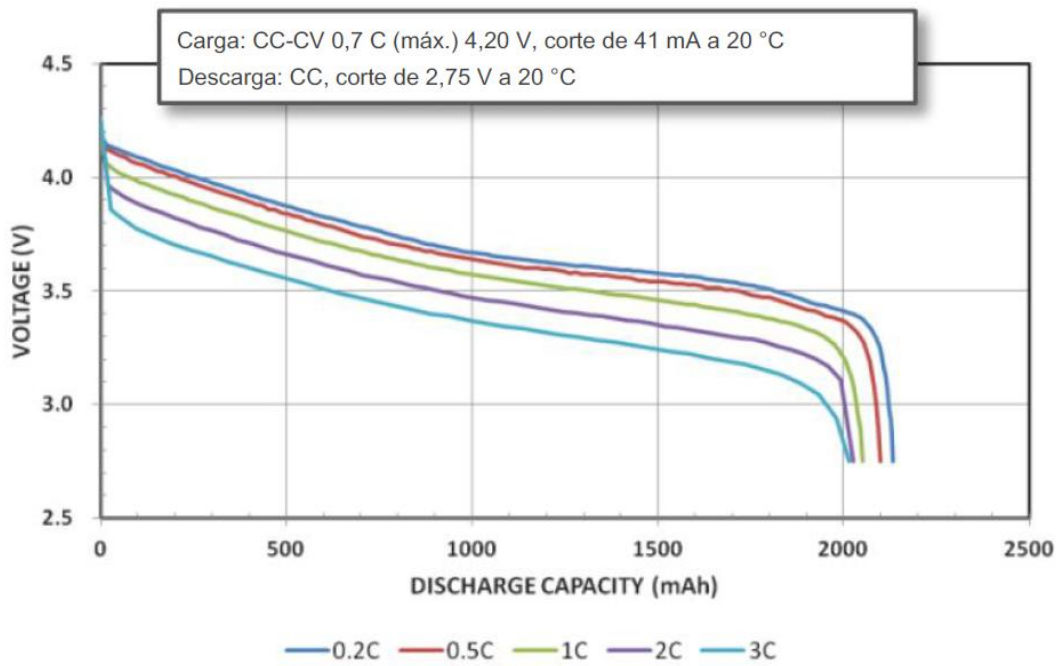


Figura 6. Características de descargas de la batería de ion de litio.

Fuente: Panasonic Corporation, 2008.

Paccha et al. (2024) realizaron experimentos con 15 celdas cilíndricas dispuestas en serie para convección libre y forzada. La convección forzada se realiza a través de dos ventiladores axiales y la velocidad del viento se fija en 1,5 m/s y 2,7 m/s. Durante el proceso de enfriamiento, la temperatura de cada celda del módulo se estima mediante un algoritmo de filtro de partículas en modo de convección forzada. Se utilizó una tasa de corriente de descarga de 0,25 C, 0,5 C y 1 C, la temperatura de las celdas al final del proceso se observa en la **Figura 7**.

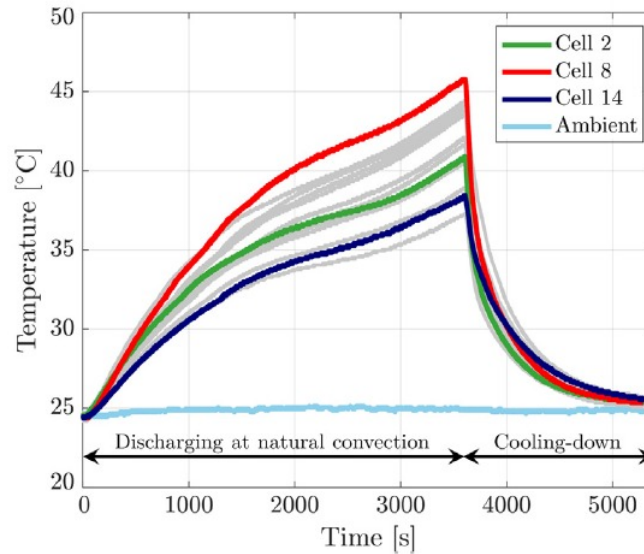


Figura 7. Perfil de temperatura experimental en un banco de 15 celdas descargadas a 1 C en condiciones de convección natural y luego enfriado por convección forzada (velocidad del aire = 1,5 m/s).

Fuente: Tomado de Paccha et al, 2024.

4.3. Sistemas de enfriamiento de baterías de litio

El exceso de calor reduce el ciclo de vida de un paquete de batería. A temperaturas superiores a 50 °C, la eficiencia de carga y la vida útil de la batería se deterioran más rápidamente debido al calor (Chu et al., 2020).

Según Valdes (2015), se pueden clasificar los métodos de enfriamiento en dos categorías principales: los sistemas activos y los sistemas pasivos. En el caso de los sistemas activos, se incluyen aquellos que dependen de una fuente externa de energía para operar, como la refrigeración por evaporación, la absorción o la convección forzada mediante dispositivos como ventiladores.

4.3.1. *Tipos de sistemas de enfriamiento en módulos de baterías de iones de litio*

Los sistemas de enfriamiento de baterías de iones de litio son un proceso que aumenta y mejora la vida útil de las baterías de litio. Esto se logra ajustando los niveles y la distribución de la temperatura. Este proceso se llama gestión térmica de la batería. Las baterías de iones de litio no proporcionan un alto rendimiento cuando están muy calientes.

4.3.1.1 Refrigeración líquida. Según Chu et al. (2020), el sistema de refrigeración el fluido utiliza un flujo constante de refrigerante para eliminar el calor generado en la batería. El refrigerante se caracteriza por una mayor capacidad calorífica específica y una mayor eficiencia de intercambio de calor, lo que hace que sea más fácil satisfacer las necesidades de refrigeración y calefacción de la batería que usar aire.

4.3.1.2 Enfriamiento por aire. El sistema de refrigeración por aire utiliza el aire como medio de intercambio de calor para que el aire atraviese la superficie de la batería y lleve consigo el calor generado por la batería (Chu et al., 2020). Según Winshare (2018), el enfriamiento del aire se puede dividir en convección natural y convección forzada debido a diferentes métodos de ventilación. La convección natural es el uso de aire frío externo que pasa a través de la superficie de cada celda de la batería para intercambiar calor para lograr propósitos de enfriamiento. El enfriamiento por convección forzada utiliza dispositivos mecánicos que ayudan a disipar el calor, aunque estos necesitan usar parte de la energía de la batería del sistema. Este método es más confiable y sencillo de mantener en comparación con la convección natural.

El aire como medio de enfriamiento de refrigeración todavía se utiliza en una amplia gama de aplicaciones de sistemas de gestión térmica, debido a su bajo costo y peso.

De acuerdo con Lopez (2020) el enfriamiento por aire se clasifican en convección forzada y convección natural

- **Convección natural.** En convección natural el flujo resulta solamente de la diferencia de temperaturas de fluido en la presencia de una fuerza gravitacional; la densidad de un fluido disminuye con el aumento de la temperatura. En un campo gravitacional, dichas diferencias en densidad causadas por las diferencias de temperaturas originan fuerzas de flotación.
- **Convección forzada.** En la convección forzada se obliga al fluido a fluir mediante medios externos, es decir, se añade algún tipo de mecanismo como un ventilador o algún sistema de bombeo, ya sea de succión o transversal, dicho mecanismo acelera la velocidad de las corrientes de convección natural, lo cual no genera mayor potencia

calorífica con un sistema o con otro. La diferencia con los demás métodos de enfriamiento radica en que, con un sistema de ventilación forzada, el calor se distribuye de manera más uniforme y el ambiente alcanza una temperatura cálida en menos tiempo.

La convección forzada se clasifica a su vez en externa e interna dependiendo de si el flujo de fluido es interno o externo. El flujo de un fluido se clasifica según su movimiento: puede ser impulsado dentro de un canal confinado o desplazarse sobre una superficie. Cuando ocurre sobre una superficie, se denomina flujo externo. El flujo por un tubo o ducto es flujo interno si ese fluido está limitado por completo por superficies sólidas. El flujo de líquidos en un tubo se conoce como flujo en canal abierto si ese tubo está parcialmente lleno con el líquido y se tiene una superficie libre.

4.4. Dinámica computacional de fluidos (CFD)

Díez (2021) menciona que la dinámica de fluidos computacional (Computational Fluid Dynamics) es la rama de la mecánica de fluidos que emplea modelos matemáticos computacionales para el estudio de flujos fluidos, donde intervienen fenómenos de transferencia de calor, combustión o reacciones químicas, entre otros.

El objetivo principal es resolver las ecuaciones de conservación (Navier Stokes), que determinan el estado termodinámico del fluido en determinadas condiciones. Además, no siempre es posible una solución analítica. Debido a la complejidad del problema real, es necesario utilizar Métodos numéricos.

Los programas CFD utilizan métodos numéricos para aproximar funciones utilizando polinomios. Además, se utilizan varios algoritmos para converger la solución. Cuanto mayor sea el grado del polinomio utilizado, menos iteraciones serán necesarias para la convergencia y menor será el error.

4.5. Estudios previos de desempeño térmico de bancos de baterías de litio con enfriamiento por aire.

Los sistemas de enfriamiento por aire son ampliamente utilizados en bancos de baterías de litio debido a su simplicidad, bajo costo y facilidad de implementación. Sin embargo, el manejo térmico adecuado es crucial para garantizar un rendimiento óptimo, una vida útil prolongada y un funcionamiento seguro de estas baterías. Numerosos estudios han investigado el desempeño térmico de bancos de baterías de litio con enfriamiento por aire.

Uno de los primeros estudios en este campo fue realizado por Rao y Newman (1997), quienes desarrollaron un modelo térmico para un módulo de baterías de iones

de litio enfriado por aire. Este modelo permitió evaluar la distribución de temperatura en el módulo y determinar los requisitos de enfriamiento necesarios para mantener las temperaturas dentro de los límites operativos.

Posteriormente, Ye et al. (2015) investigaron experimentalmente el desempeño térmico de un banco de baterías de iones de litio enfriado por aire. Los autores evaluaron la influencia de diferentes configuraciones de flujo de aire, tasas de descarga y condiciones ambientales en la distribución de temperatura dentro del banco de baterías. Los resultados mostraron que una configuración de flujo de aire optimizada podía mejorar significativamente el desempeño térmico y la uniformidad de temperatura.

Xu et al. (2020) investigaron el efecto de la configuración de canales de aire en el rendimiento térmico de un banco de baterías de litio como resultado demostraron que la configuración de canales de aire puede mejorar significativamente la disipación de calor y el rendimiento térmico del banco de baterías.

En cambio, Huang et al. (2020) analizaron el rendimiento térmico de un banco de baterías de litio con enfriamiento por aire forzado los cuales encontraron que el enfriamiento por aire forzado puede reducir eficazmente la temperatura máxima y la distribución de temperatura no uniforme del banco de baterías.

Jiang et al. (2021) investigaron el rendimiento térmico de un banco de baterías de litio con enfriamiento por aire a través de un diseño de canales optimizado del cual el diseño optimizado de canales de aire mejoró significativamente la uniformidad de temperatura y el rendimiento térmico del banco de baterías.

En otro estudio, Chen et al. (2020) desarrollaron un modelo numérico y experimental para investigar el enfriamiento por aire en un banco de baterías de iones de litio. Los autores analizaron el efecto de diferentes configuraciones de canales de aire, velocidades de flujo de aire y patrones de descarga en la distribución de temperatura y el rendimiento térmico del banco de baterías. Los resultados demostraron que una configuración adecuada de los canales de aire y una velocidad de flujo óptima podían mejorar significativamente la disipación de calor y la uniformidad de temperatura.

Li et al. (2022) analizaron el efecto de la orientación del flujo de aire en el enfriamiento de un banco de baterías de litio y encontraron que la orientación del flujo de aire tiene un impacto significativo en la disipación de calor y la uniformidad de temperatura del banco de baterías.

Otro estudio relevante fue realizado por Xun et al. (2022), quienes investigaron el desempeño térmico de un banco de baterías de iones de litio enfriado por aire en un

vehículo eléctrico. Los autores desarrollaron un modelo térmico acoplado y validado experimentalmente para evaluar la influencia de diferentes condiciones de carga, velocidades del vehículo y condiciones ambientales en la distribución de temperatura del banco de baterías. Los resultados mostraron que el enfriamiento por aire era efectivo para mantener las temperaturas dentro de los límites operativos en la mayoría de las condiciones evaluadas.

El estudio realizado por Wang et al. (2023) quienes estudiaron el efecto de la configuración de las baterías en el rendimiento térmico de un banco de baterías de litio con enfriamiento por aire encontrando que la configuración de las baterías tiene un impacto significativo en la disipación de calor y la uniformidad de temperatura del banco de baterías. En otro estudio, Liu et al. (2023) Investigaron el rendimiento térmico de un banco de baterías de litio con enfriamiento por aire a través de un diseño de canales con aletas, demostraron que el uso de aletas en los canales de aire mejoró la transferencia de calor y redujo la temperatura máxima del banco de baterías en comparación con diseños sin aletas.

Estos estudios han contribuido a una mejor comprensión del desempeño térmico de los bancos de baterías de litio enfriados por aire y han proporcionado información valiosa para el diseño y optimización de estos sistemas. Sin embargo, aún existen desafíos y áreas de investigación continua, como la mejora de la uniformidad de temperatura, la optimización del diseño de los canales de aire y la integración de estrategias de enfriamiento más avanzadas.

5. Metodología

5.1. Área de estudio

El proyecto se llevó a cabo en el taller mecánico de la carrera de Ingeniería Electromecánica dentro de la facultad de la energía, las industrias y los recursos naturales no renovables perteneciente a la Universidad Nacional de Loja, ubicado en la ciudad de Loja. El laboratorio cuenta con instalaciones adecuadas para la construcción y prueba del banco de tubos, incluyendo equipos de medición de temperatura, caudal de aire y potencia eléctrica.

5.2. Equipos y materiales

El banco de tubos está diseñado para emular el comportamiento térmico de un módulo de baterías 18650, con dimensiones y configuración similares, para ello, se utilizó tubos de aluminio con resistencias eléctricas en su interior para generar calor, asimismo, el banco cuenta con una entrada y salida de aire para simular el enfriamiento por convección forzada; Para la construcción del banco de tubos se utilizaron recursos digitales y manuales, los recursos principales utilizados fueron:

5.2.1. Recursos tecnológicos

5.2.1.1 Softwares

- ANSYS Fluent: Es un software avanzado de simulación de dinámica de fluidos computacional (CFD) que forma parte del paquete de software ANSYS, este programa permite modelar y analizar el comportamiento de fluidos (líquidos y gases), transferencia de calor y otros fenómenos físicos relacionados (como reacciones químicas y transferencia de masa) en diversas condiciones.
- Software Autodesk Inventor: Se obtuvo una licencia académica directamente de la página Autodesk para llevar a cabo la creación de piezas en 3D y se realizó el ensamblaje respectivo.
- Software AutoCAD: AutoCAD fue empleado para crear los planos de las distintas piezas y obtener las cotas que deben existir entre las mismas.
- Software para impresión 3D UltiMaker Cura: Cura es un software de impresión 3D fácil de usar, utilizado para la creación de piezas físicas realizadas en el Software Inventor.

5.2.1.2 Sensores

- Sensor de temperatura: El DS18B20 es un sensor de temperatura digital que se comunica mediante el protocolo 1-Wire, que requiere solo un pin de datos para la

comunicación y permite conectar múltiples sensores en un solo bus.

5.2.2. *Equipos Técnicos*

- Multímetro digital: El multímetro digital se utilizó para comprobar la tensión que alimenta el sistema de calentamiento.
- Arduino uno: Es un microcontrolador que se utilizó para adquirir datos para posteriormente manejarlos dentro del programa Excel.
- Impresora 3D: Equipo tecnológico utilizado para la creación de piezas físicas.
- Torno: Equipo mecánico utilizado para cilindrar la barra de aluminio, perforarla y refrentarla.
- Anemómetro: Es un instrumento utilizado para medir la velocidad del viento y, en algunos casos, su dirección, siendo una herramienta común en estaciones meteorológicas y se emplea en estudios climáticos.

5.2.3. *Materiales de construcción*

En la **Tabla 3** se describen los materiales y elementos utilizados para la construcción del prototipo.

Tabla 3. Materiales y elementos utilizados para la construcción del prototipo.

Materiales	Descripciones	Dimensiones
Barra de aluminio	Se las utiliza para representar Las baterías de iones de litio 18650.	Ø20 mm
Niquelinas	Debido a su alta resistencia se las utiliza para generar calor.	200 Ω -Potencia de 200 W
Ventilador	Componente utilizado para generar una corriente de aire	Voltaje: 12 V Intensidad: 180 mA
Variador de tensión	Para poder elevar la temperatura de las niquelinas es necesario utilizar el variador de tensión con el fin de obtener una temperatura promedio a la que se necesita.	110 V - 20 V

5.3. **Procedimiento**

Para el adecuado diseño del prototipo del banco de tubos se estructuró y cumplió con la siguiente metodología:

Búsqueda de información. – Se realizó consultas referentes a niveles de ope-

ración y niveles de temperatura de las baterías de ion de litio 18650 mediante búsqueda online (fichas técnicas, tesis, artículos, etc.), para la conceptualización de un dimensionamiento de un banco de baterías.

Reconocimiento de tipos de baterías de ion de litio. - Obteniendo la información adecuada se realizó un estudio de los tipos de baterías de ion de litio 18650 y otros productos similares por medio de sus fichas técnicas, para posteriormente analizar sus parámetros operacionales como: características de carga y descarga, características de ciclo de vida y más.

Selección del tipo de batería de ion de litio. - Aquí se realizó un proceso comparativo de selección mediante una matriz de criterios técnicos para así definir un modelo y marca de baterías de ion de litio las cuales se puedan lograr replicar sus condiciones de operación.

Definir los sistemas y componentes principales del banco de tubos. - Se examinó y sintetizó los sistemas y componentes más importantes con los cuales el prototipo puede desarrollarse correctamente, y luego se analiza cómo funcionan para una mejor comprensión de cada uno, esta información es fundamental para proponer un diseño con sus respectivas geometrías.

Diseño conceptual del prototipo de prueba. - Se realiza una propuesta de prototipo en base a un diseño análogo existente en la industria para con ello, proyectar la forma y distribución de los sistemas que compone el banco de tubos.

Fase experimental para definir los parámetros de operación del prototipo. - Se efectúa un proceso experimental, variando los niveles de temperatura en el tubo representativo, variando la distancia entre cada tubo, realizando combinaciones de posición dentro del banco del tubo.

Diseño del prototipo final. - En este apartado se ejecutó mecanismos eficaces, teniendo en cuenta las dimensiones del banco de tubos, además se eligen teorías de cálculo adecuadas, teniendo en cuenta las condiciones a las que se verá sometido el sistema, con el fin de ajustar adecuadamente sus dimensiones. Además, se debe considerar normas que permitan la selección de los demás componentes, con respeto al rango de temperatura, tipo de carga, material, etc.

Accionamiento eléctrico del prototipo. - Se consideró la aparamenta eléctrica del prototipo en cuestión que permita el accionamiento correcto del sistema, para este apartado se utilizó un variador de tensión de 110 V a 20 V para alimentar las niquelinas, con el objetivo de obtener una temperatura promedio a las baterías de ion de litio 18650.

Pruebas operacionales. - En este apartado se evaluó el funcionamiento acorde a los parámetros de operación determinados en la etapa experimental para constatar el funcionamiento adecuado del prototipo.

Diseño de detalle. - Aquí se expuso el resultado final de los sistemas y componentes del prototipo mediante la demostración en físico y explicación técnica detallada de los mismos, para con ello dar por culminado el prototipo.

Análisis de costos del prototipo final. - Se llevó a cabo un examen detallado de los gastos relacionados con los materiales, componentes, elementos y la metodología de construcción de la máquina con el propósito de calcular su valor.

Simulación en Ansys Fluent. - Se llevaron a cabo simulaciones de los tres diferentes casos de estudio, configurando en el programa las geometrías diseñadas para el banco de tubos, bajo las mismas condiciones de operación establecidas durante la fase experimental.

La **Figura 8** muestra en síntesis la metodología a seguir para la resolución del presente trabajo de integración curricular.

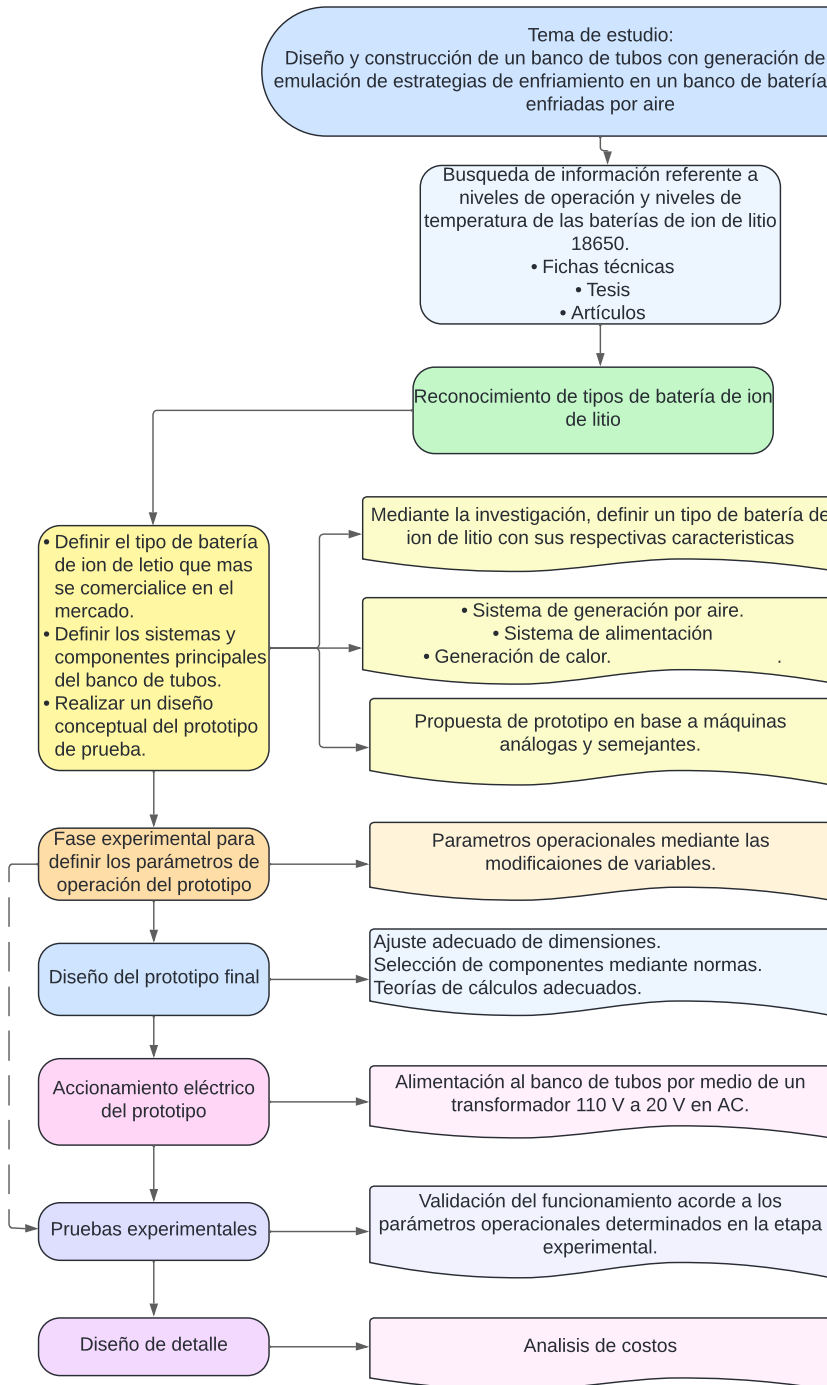


Figura 8. Diagrama de flujo de la metodología a seguir en el presente trabajo de tesis.

5.3.1. *Describir condiciones físicas de operación de un módulo de baterías de iones de litio con base en la revisión literaria.*

Para el desarrollo del presente objetivo se inicia con una búsqueda bibliográfica acerca de las condiciones físicas de operación en un módulo de baterías de iones de litio; La búsqueda bibliográfica se centra en identificar las condiciones de operación y resultados obtenidos por investigaciones ya realizadas por otros autores, para obtener una informa-

ción relevante y actualizada se realiza un proceso de selección de artículos considerando la actualidad y aplicabilidad. En la **Figura 9** se encuentra ilustrado el flujo de proceso seguido durante el proceso de búsqueda de información.

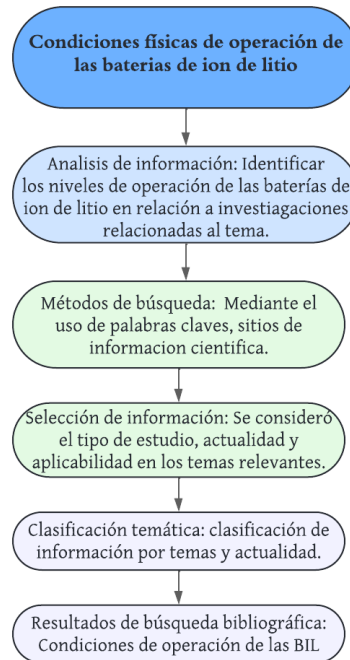


Figura 9. Flujo de proceso para la búsqueda de información sobre las condiciones físicas de operación de un módulo de baterías de iones de litio.

5.3.2. Construir un prototipo experimental de un banco de tubos para emular el desempeño térmico de un banco de baterías cilíndricas con enfriamiento por aire.

En la **Figura 10** se encuentra representado la metodología empleada para lograr el segundo objetivo enfocado en la construcción de un prototipo experimental de banco de tubos; Este proceso se inicia en la búsqueda de diseños y piezas ya existentes para formar packs de baterías de ion litio, dispositivos para generación de calor, fuentes de alimentación, sistema de adquisición de datos, tipos de sensores, sistemas de enfriamiento, entre otros factores.

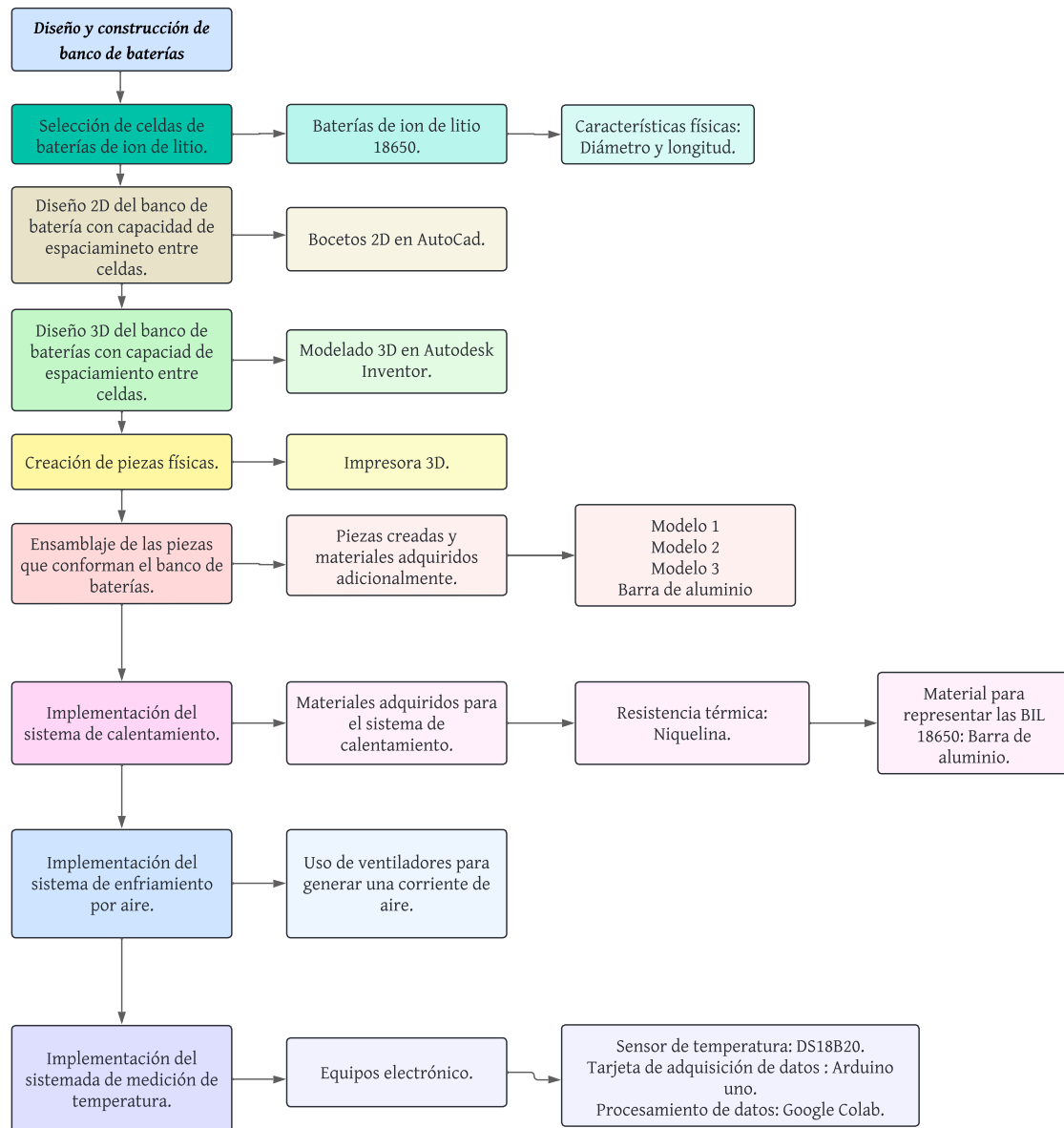


Figura 10. Flujo de proceso para la construcción del prototipo correspondiente al segundo objetivo.

5.3.3. *Evaluar el desempeño del banco de tubos con generación de calor interna para recrear condiciones de operación de baterías con diferentes configuraciones geométricas.*

La **Figura 11** presenta un esquema detallado de la metodología empleada en el tercer objetivo que tienen como fin evaluar el desempeño del banco de tubos. El banco de tubos está diseñado con la capacidad de agrupar 16 baterías de litio 18650 en este caso representado por una barra cilíndrica de aluminio. Además, tiene la capacidad para recrear tres tipos de configuraciones a diferentes distancias entre ellas.

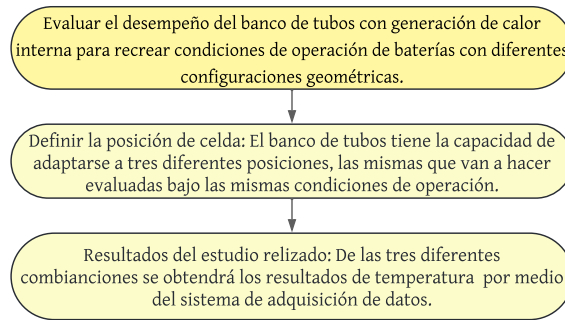


Figura 11. Flujo de proceso para evaluar el desempeño del banco de tubos con generación de calor interna para recrear condiciones de operación de baterías con diferentes configuraciones geométricas.

5.4. Procesamiento y análisis de datos

En la **Figura 12** presenta la metodología general propuesta para el estudio de un módulo de baterías cilíndricas 18650 y del sistema de enfriamiento por aire, inicia con la selección de celda, abarcando propiedades físicas y tasas de descargas, seguido por la exploración de disposiciones geométricas, la implementación de un sistema de enfriamiento por aire y un sistema de adquisición de datos.

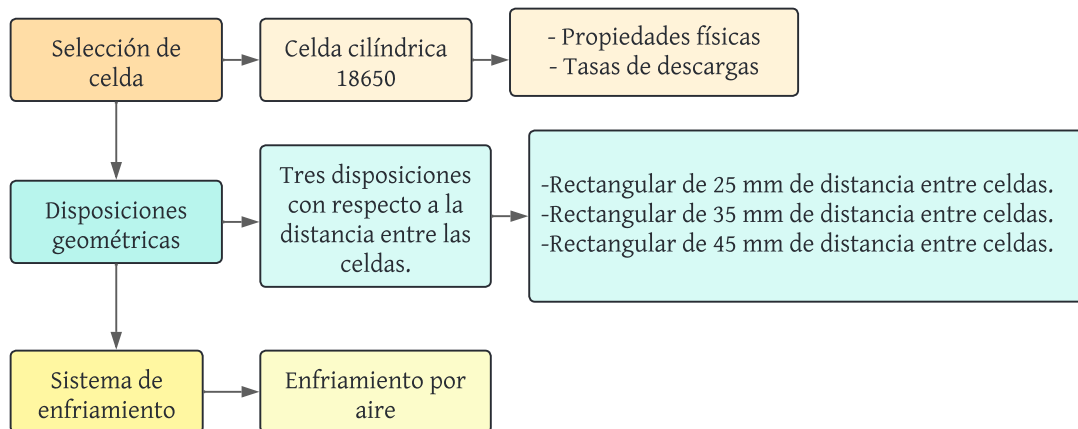


Figura 12. Metodología para el procesamiento de datos

5.4.1. Primer objetivo

5.4.1.1 Información sobre las condiciones físicas de operación de un módulo de baterías de iones de litio. El uso de aire como método de gestión térmica, aunque menos eficiente en comparación con el uso de líquidos, se destaca por sus ventajas en términos de mínima utilización de materiales y menores costos de operación lo que lo convierte en una alternativa de estudio.

Se realizó una recopilación de información de estudios realizados con aplicación de enfriamiento de baterías de ion de litio mediante la circulación de aire, investigaciones plasmadas en tesis y artículos científicos, como se describen:

En cuanto al rango de temperatura, Waldmann et al. (2016) señalan que la temperatura de carga típica oscila entre 0 °C y 45 °C, mientras que la temperatura de descarga generalmente se encuentra entre -20 °C y 60 °C. Operar fuera de estos rangos puede afectar negativamente la vida útil y la seguridad de la batería. Bandhauer et al. (2011) resaltan que las temperaturas extremas pueden provocar reacciones secundarias perjudiciales y acelerar la degradación de la batería.

El rango de voltaje es otro factor crítico en las baterías de iones de litio. Según Chen et al. (2020), un voltaje de carga superior a 4,2 V por celda puede provocar la degradación de los materiales del electrodo y la descomposición del electrolito, lo que conduce a un envejecimiento acelerado y posibles riesgos de seguridad. Por otro lado, descargar por debajo de 2,5 V por celda puede causar la formación de depósitos en el ánodo, reduciendo la capacidad y la vida útil de la batería (Ding et al., 2020).

El rango de corriente también desempeña un papel importante en el rendimiento de las baterías de iones de litio. Bandhauer et al. (2011) indican que la corriente de carga depende de la capacidad y el diseño de la batería, pero generalmente se encuentra entre 0,5 C y 1 C. En cuanto a la corriente de descarga, Pistoia (2014) menciona que varía según la aplicación pero típicamente oscila entre 0,2 C y 2 C. Corrientes excesivas pueden generar calor y dañar la batería.

El estado de carga (SOC) es otro parámetro a considerar. Bandhauer et al. (2011) sugieren que el SOC mínimo generalmente se encuentra entre el 10 % y el 20 % para evitar la sobredescarga, mientras que Pistoia (2014) indica que el SOC máximo típicamente se sitúa entre el 80 % y el 90 % para evitar la sobrecarga. Operar fuera de estos rangos puede acortar la vida útil de la batería.

Además de estos factores, otros estudios han explorado aspectos adicionales que influyen en el rendimiento de las baterías de iones de litio. Rao y Newman (1997) investigaron la importancia de la gestión térmica en las baterías, destacando la necesidad de una disipación de calor eficiente para mantener un rendimiento óptimo y prolongar la vida útil. Ye et al. (2015) analizaron numéricamente la optimización de un sistema de gestión térmica con tubos de calor para baterías de iones de litio, demostrando su efectividad en la regulación de la temperatura.

Xun et al. (2022) realizaron un estudio numérico y experimental acoplado sobre la gestión térmica de un paquete de baterías de iones de litio enfriado por aire para vehículos

eléctricos; Sus resultados destacaron la importancia de optimizar el diseño del sistema de enfriamiento para garantizar una distribución de temperatura uniforme y un rendimiento térmico adecuado.

5.4.1.2 Selección del tipo de batería de ion de litio

- **Batería 18650 con química LiFePO4:** RS Components Chile (2024) comentó que las baterías LiFePO4 se derivan de la tecnología de iones de litio y son baterías mucho más seguras que las que usan LiCoO2 y manganeso. Es una batería estable y segura con un rango de temperatura de -20 °C a 70 °C, excelente estabilidad térmica y química y una vida útil más larga que otras baterías.

Las características principales de la batería 18650 con química LiFePO4 se muestran en la **Tabla 4** a continuación:

Tabla 4. Especificaciones técnicas de la batería 18650.

Batería 18650	
Modelo	LiFePO4
Tamaño	18650
Tensión nominal	3,2 V
Capacidad	1,8 Ah
Químico	Fosfato de litio
Rango de temperatura de funcionamiento	-20 a 45 °C

5.4.2. *Sistemas y componentes principales del banco de tubos*

5.4.2.1 Planteamiento de los parámetros del sistema de enfriamiento. Para identificar los parámetros necesarios para el funcionamiento del sistema de enfriamiento, se estableció un método para generar la corriente de aire.

Alarcón y Tirado (2017) recalcan que la elección de un ventilador para la realización de las pruebas experimentales de enfriamiento en un banco de baterías se justifica simplemente por el hecho de que este cumpla con las características de un ventilador común que se utilizaría en este tipo de aplicaciones, lo anterior puesto que se desea que el experimento sea lo más cercano posible a la realidad.

Se decide elegir un ventilador VN-351, debido a dos razones principalmente, la primera es que ofrece una relación caudal-tamaño bastante buena, logrando alcanzar velocidades bastante altas para su pequeño tamaño; La segunda es que la utilización en este tipo de aplicaciones ya fue demostrada en otras investigaciones.

5.4.2.2 Características del ventilador VN-351. En la **Tabla 5** se encuentran las características del ventilador.

Tabla 5. Características del ventilador.

Modelo de ventilador	Voltaje funcional (DC)	Corriente	Dimensiones	Descripción
VN-351	12 V	180 mA	80 × 80 × 25 mm	Ventilador de plástico de caja de alta fluidez de 2½"

Cabe destacar que, la velocidad del ventilador varía dependiendo del voltaje con que se está alimentando, tuvo que ser medida por medio del instrumento adecuado para la medición (se utilizó un anemómetro de rotor de menor tamaño que el ventilador). La velocidad calculada por el anemómetro fue de 3,1 m/s. En el **Anexo 4** se muestra la medición realizada.

- **Anemómetro KESTREL 3000**

RS Components. (2005) menciona que el Anemómetro Kestrel 3000 realiza mediciones de velocidad del viento, temperatura y sensación térmica. Además, mide tres medidas muy importantes: humedad relativa, índice de estrés térmico y temperatura.

El anemómetro utilizado es el Kestrel 3000, en la **Tabla 6** se puede observar las especificaciones técnicas con respecto a la velocidad del aire.

Tabla 6. Especificaciones del anemómetro KESTREL 3000.

Atributo	Valor
Número de Modelo	KESTREL 3000
Velocidad Máxima del Aire	40 m/s
Precisión Máxima de la Velocidad del Aire	±3 %
Resolución de la Velocidad del Aire	0,1 m/s

5.4.2.3 Generación de calor. Entre los métodos para generar calor se tiene el uso de placas Peltier. Las placas peltier, quienes permiten que sus propiedades trabajen juntas, esto significa que puedo calentar un lado usando energía eléctrica, el enfriamiento por el otro lado, y de la misma manera si enfrío un lado de la placa se obtendrá una diferencia de potencial entre sus terminales y calor en el lado opuesto a la que se está enfriando. Mientras que, la función de la resistencia eléctrica o niquelina es transformar la energía eléctrica en energía térmica, esto se debe a que al momento de hacer circular una corriente eléctrica a través de la niquelina, esta encontrará resistencia a su paso, para vencer esta

resistencia se realiza un trabajo lo cual produce un consumo de energía, el resultado de este trabajo se traduce en una elevación de temperatura de la niquelina por la cual circula la corriente eléctrica.

Para la generación de calor se utiliza las niquelinas eléctricas por su capacidad de generar calor a altas temperaturas. En la **Figura 13** se encuentra la representación de la niquelina.



Figura 13. Niquelina eléctrica.

Fuente: Elaboración propia.

5.4.2.4 Características de la niquelina eléctrica. La **Tabla 7** presenta las características generales de la resistencia eléctrica, recalando que los valores corresponden al valor máximo en las cuales pueden operar.

Tabla 7. Características de la niquelina.

Parámetro	Formato/Rango
Voltaje de alimentación	220 V
Potencia	200 W
Resistencia	0,223 k Ω

5.4.2.5 Selección de material utilizado en reemplazo de las BIL. Liu et al., (2022) señala que el aluminio posee características termofísicas muy favorables en la transferencia de calor, estas características se muestran en la **Tabla 8**.

Tabla 8. Propiedades termofísicas del aluminio.

Propiedad	Valor
Densidad ($\rho \times m^{-3}$)	2719
Calor específico C ($J \times kg^{-1} \times K^{-1}$)	871
Conductividad térmica k ($W \times m^{-1} \times K^{-1}$)	202,4

5.4.2.6 Diseño conceptual del prototipo de prueba Para definir el módulo propuesto se ha considerado elementos y medidas ya existentes para crear packs de baterías de ion de litio, los elementos definidos para el módulo son.

- Planchas de madera.
- Moldes con espaciamento entre celdas.
- Barras cilíndricas de aluminio.
- Plancha acrílica.

5.4.2.7 Plancha de madera Para las paredes que aíslan la temperatura de las barras de aluminio con la temperatura ambiente se las diseño en planchas de madera de 15mm de espesor, una altura de 180mm y una longitud propuesta de 198mm y 192mm respectivamente en largo y ancho.

En la **Figura 14** se aprecia las medidas utilizadas para el contorno del banco de pruebas.

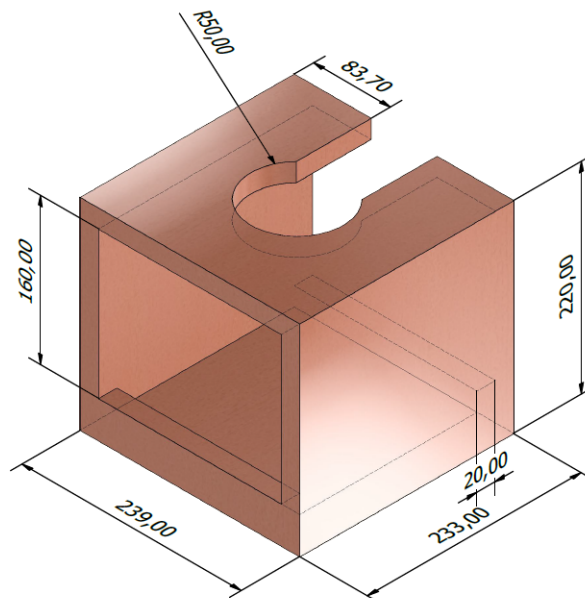


Figura 14. Esquema del contorno de aislamiento.

5.4.2.8 Moldes con espaciamento entre celdas. Los moldes son una parte muy importante dentro del estudio realizado, de estos moldes se logra realizar tres tipos de casos; primer caso basado en un análisis con separación entre celdas de 25 mm de centro a centro; segundo caso, corresponde a una distancia entre celda de 35 mm y el último caso se basa en una distancia de 45 mm entre centros de celda a celda.

5.4.2.9 Moldes. En las **Figuras 15, 16, y 17** se encuentran los planos de los moldes propuestos con sus respectivas dimensiones; los moldes fueron desarrollados en software inventor para después ser imprimidos mediante una impresora 3D.

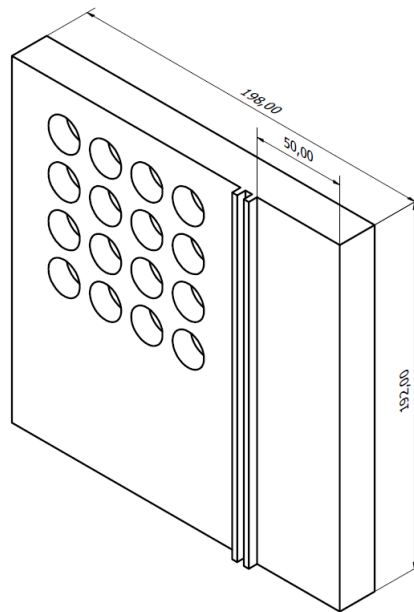


Figura 15. Diseño 1 desarrollado en Inventor.

Fuente: Elaboración propia.

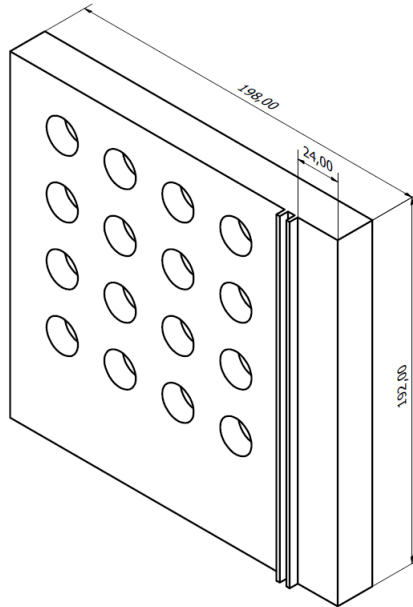


Figura 16. Diseño 2 desarrollado en Inventor.

Fuente: Elaboración propia.

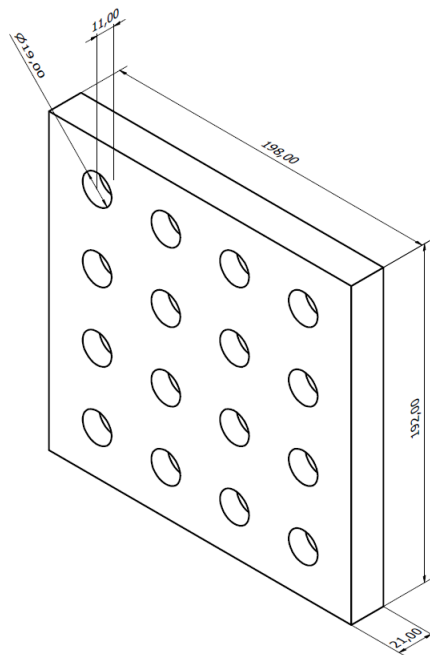


Figura 17. Diseño 3 desarrollado en Inventor.

Fuente: Elaboración propia.

5.4.2.10 Barra cilíndrica de aluminio Las barras de aluminio cilíndricas vienen con diámetros establecidos de fábrica, con ayuda del Torno se efectuó el refrentado, cilindrada y perforación. En la **Figura 18** se muestran las medidas del terminado de la barra cilíndrica.

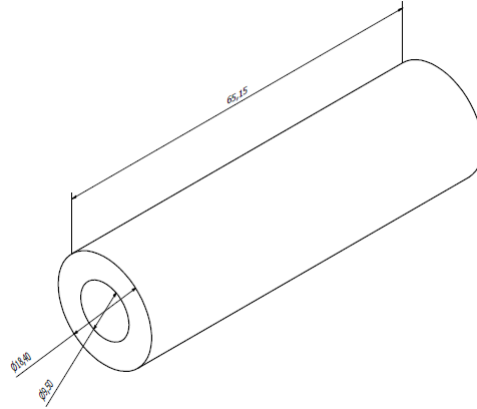


Figura 18. Medidas de la barra cilíndrica de aluminio.

5.4.2.11 Fase experimental para definir los parámetros de operación del prototipo. En el caso de generación de calor se debe elevar hasta un rango de -20 a 60 °C, por eso el valor de alimentación cambia a una fuente de 20 V, variando así las características generales. Por lo tanto, a continuación, se detallan los cálculos empleados para conocer la generación de calor.

La generación de calor es volumétrica porque representa la cantidad de calor generado por unidad de volumen en el material en el que se está realizando el análisis experimental, por lo tanto, se calcula el volumen de la barra de aluminio mediante la **Ecuación 2**.

$$V_c = \pi \times r^2 \times h \quad (2)$$

$$V_c = \pi \times 9,15^2 \times 65,15$$

$$V_c = 17135,8827 \text{ mm}^3$$

En este caso, la barra de aluminio tiene una perforación de $4,5$ mm de radio por ende se debe calcular esa área para luego ser restarla del volumen de la barra principal.

$$V_{c1} = \pi \times 4,75^2 \times 65,15$$

$$V_{c1} = 4617,974 \text{ mm}^3$$

El volumen final de la celda se calcula mediante la **Ecuación 3**:

$$V_{cel} = V_c - V_{C1} \quad (3)$$

$$V_{cel} = 17135,8827 \text{ mm}^3 - 4617,974 \text{ mm}^3$$

$$V_{cel} = 12991,219 \text{ mm}^3$$

$$V_{cel} = 0,00001299 \text{ m}^3$$

Se determina la generación de calor por medio de la potencia utilizada por las 16 niquelinas utilizadas para generar calor; para obtener la corriente que consume todo el módulo se hizo uso del amperímetro obteniendo una corriente de 1,29 A. Mediante el uso de la **Ecuación 4** se calculó la potencia consumida.

$$P = V \times I \quad (4)$$

$$P = 19 \text{ V} \times 1,29 \text{ A}$$

$$P = 24,51 \text{ W}$$

La potencia consumida corresponde a las 16 celdas del banco, entonces para obtener la potencia que consume cada celda se utiliza la **Ecuación 5** y se divide la potencia para las 16 celdas.

$$P_{celda} = \frac{P}{N_{celdas}} \quad (5)$$

$$P_{celda} = \frac{24,51 \text{ W}}{16}$$

$$P_{celda} = 1,393 \text{ W}$$

Con ayuda de la **Ecuación 6**, la potencia individual de cada celda y el volumen de la celda se logró calcular la generación de calor o término de fuente a lo que corresponde a la potencia sobre el volumen.

$$Q_g = \frac{P_{celda}}{V_{cel}} \quad (6)$$

$$Q_g = \frac{1,393 \text{ W}}{0,00001299 \text{ m}^3}$$

$$Q_g = 107206,592 \frac{\text{W}}{\text{mm}^3}$$

5.4.3. Segundo objetivo

5.4.3.1 Diseño de detalle En la **Tabla 9** se presenta una lista de los componentes del sistema de enfriamiento propuesto y la función que desempeñan.

Tabla 9. Componentes del prototipo.

Elemento de componente	Cant.	Descripción	Proceso de adquisición
Ventilador	1	Elemento para generar una corriente de aire.	Mercado local.
Barra de aluminio	16	Barra cilíndrica de aluminio, para dimensionarla a las medidas de la BIL 18650.	Mercado local de diseño y construcción.
Impresión 3D	3	Moldes creados mediante software para obtenerlos diferentes casos de estudio.	Diseño y construcción.
Planchas de madera	1	Elemento utilizado para aislar el sistema de la temperatura ambiente	Diseño y construcción
Niquelina	16	Este elemento se utiliza para generar calor, el cual depende de ciertos parámetros.	Mercado local
Sensor de temperatura	18	Como parte del sistema adquisición de datos Se utilizaron sensores para obtener datos de temperatura.	Mercado local
Fuente de alimentación	1	Elemento que forma parte del sistema de generación de calor.	Mercado local
Arduino uno	1	Microcontrolador utilizado para la toma de datos de temperatura.	Mercado local
Bornera	2	Elemento utilizado para derivar el voltaje a las 16 niquelinas.	Mercado local
interruptor termomagnético	1	Se lo utiliza como parte de protección eléctrica.	Mercado local
Resistencia	2	Este elemento forma parte del sistema de adquisición de datos como elemento de protección de los sensores.	Mercado local

Para la construcción de prototipo de prueba se construye cada uno de los componentes diseñados, según las características y dimensiones previamente determinadas, los componentes construidos se aprecian a continuación.

5.4.3.2 Barra de aluminio. En la **Figura 19** se encuentra el material formado a las dimensiones diseñadas, las características son las siguientes:

- Diámetro superior: 18,40 mm.
- Diámetro interior: 9,5 mm.
- Longitud: 65,15 mm.
- Material: aluminio sólido.



Figura 19. Barra cilíndrica de aluminio.

5.4.3.3 Molde uno en impresión 3D. En la **Figura 20** se encuentra el molde uno a las dimensiones diseñadas, las características son las siguientes:

- Dimensiones: 198 mm × 192 mm.
- Espesor: 21 mm.
- Diámetro de las circunferencias: 19 mm.
- Distancia entre centros de circunferencia: 25 mm.
- Material: filamento.

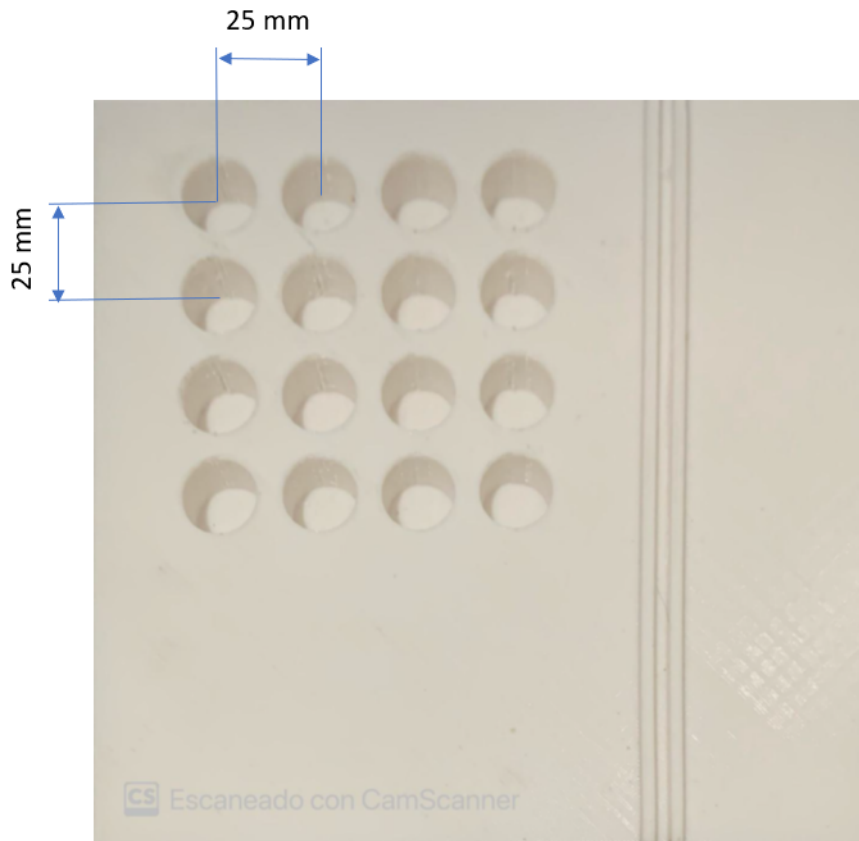


Figura 20. Molde uno en impresión 3D.

5.4.3.4 Molde dos en impresión 3D. En la **Figura 21** se encuentra el molde dos con las dimensiones diseñadas, las características son las siguientes:

- Dimensiones: 198 mm × 192 mm.
- Espesor: 21 mm.
- Diámetro de las circunferencias: 19 mm.
- Distancia entre centros de circunferencia: 35 mm.
- Material: filamento.

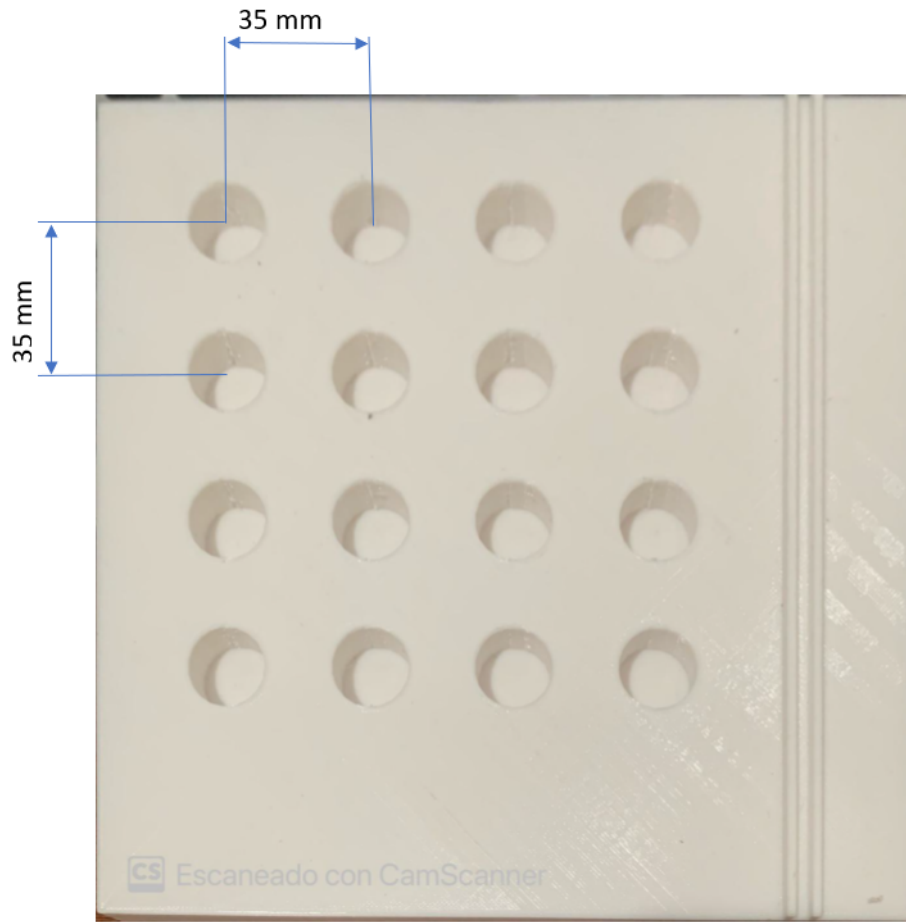


Figura 21. Molde dos en impresión 3D.

5.4.3.5 Molde tres en impresión 3D. En la **Figura 22** se encuentra el molde tres con las dimensiones diseñadas, las características son las siguientes:

- Dimensiones: 198 mm × 192 mm.
- Espesor: 21 mm.
- Diámetro de las circunferencias: 19 mm.
- Distancia entre centros de circunferencia: 45 mm.
- Material: filamento.

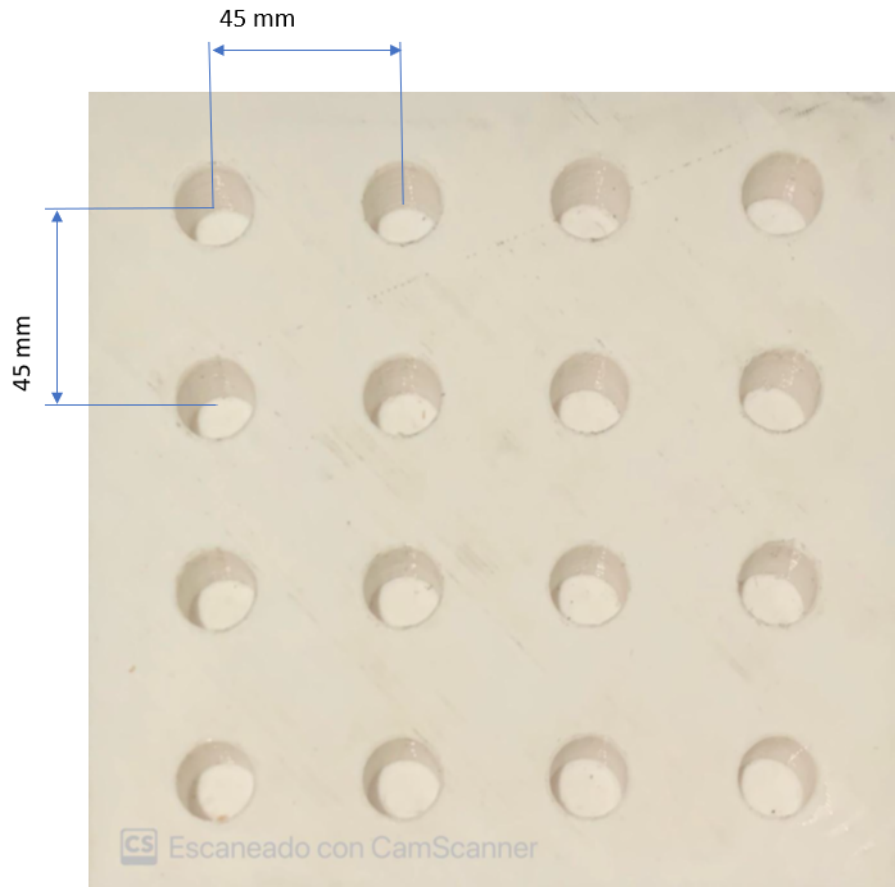


Figura 22. Molde tres en impresión 3D.

5.4.3.6 Planchas de madera. En la **Figura 23** se encuentra las paredes de madera con las dimensiones diseñadas, las características son las siguientes:

- Dimensiones: 239 mm × 233 mm.
- Espesor de la plancha: 15 mm.
- Material: plancha de cartón prensado 15 mm.

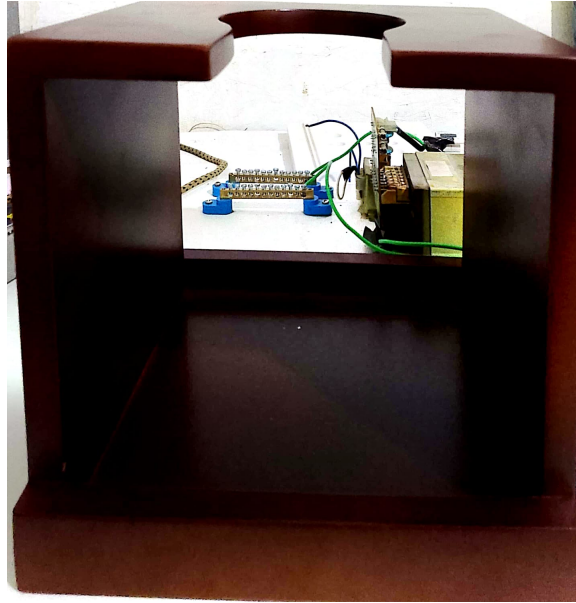


Figura 23. Contorno de madera.

5.4.4. Tercer objetivo

5.4.4.1 Evaluar el desempeño del banco de tubos. Para evaluar el sistema de enfriamiento se realizaron mediciones de temperatura en el contorno de las barras de aluminio, al igual que, la temperatura ambiente y la velocidad del flujo de aire a la entrada del sistema; las mediciones se realizaron en el banco construido y en la sección de resultados se muestran las gráficas para cada caso realizado.

5.4.4.2 Análisis de costos del prototipo final. Los costos de los materiales para la construcción del sistema de enfriamiento se muestran en la **Tabla 10**, cada uno de los componentes utilizados, medidas y otros detalles se describen en el anexo, así también se indica el proceso de construcción y costos de cada tarea realizada.

Tabla 10. Costos de materiales y construcción del sistema.

Descripción	Costo (USD)
Materiales y elementos	340
Proceso de construcción	100
Total	440

5.4.5. Implementar un modelo numérico con base en dinámica computacional de fluidos (CFD) para evaluar el desempeño del módulo de baterías de litio enfriado por aire

La **Figura 24** representa la aplicación del modelo CFD, implica etapas de pre-procesamiento donde se definen la geometría y las condiciones iniciales, procesamiento que incluye la configuración detallada de propiedades y modelos, y post-procesamiento que

evalúa la convergencia y analiza los resultados obtenidos; esta metodología proporciona un marco integral para el análisis térmico detallado y la optimización del diseño de las celdas y su sistema de enfriamiento, destacando la interconexión esencial de cada fase en el proceso de investigación.

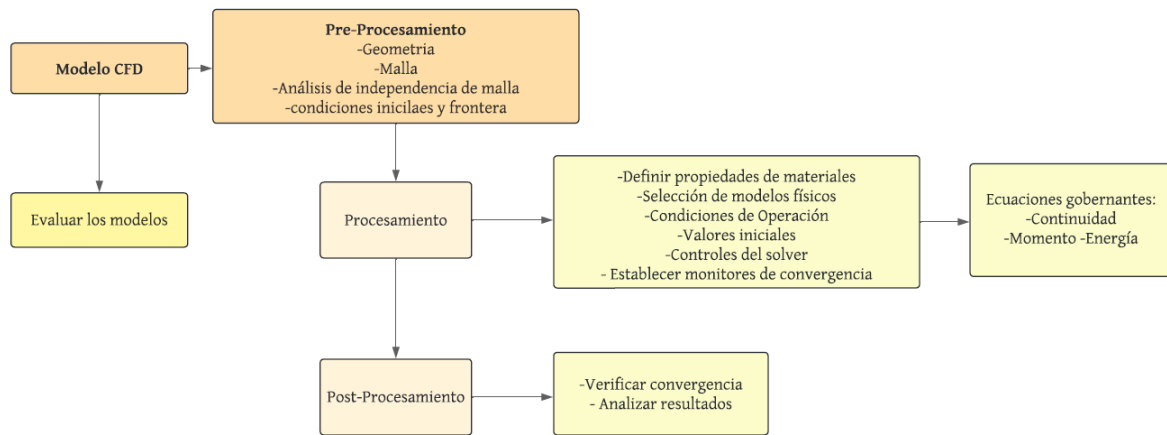


Figura 24. Metodología para el procesamiento y pre-procesamiento CFD.

5.4.5.1 Establecer disposiciones de las celdas de litio dentro de un módulo para evaluar. Se evalúan los diseños 1, 2 y 3. El objetivo es analizar el comportamiento térmico de los módulos a una distancia específica entre ellas. En las **Figuras 25, 26 y 27** se muestran los modelos propuestos respectivamente.

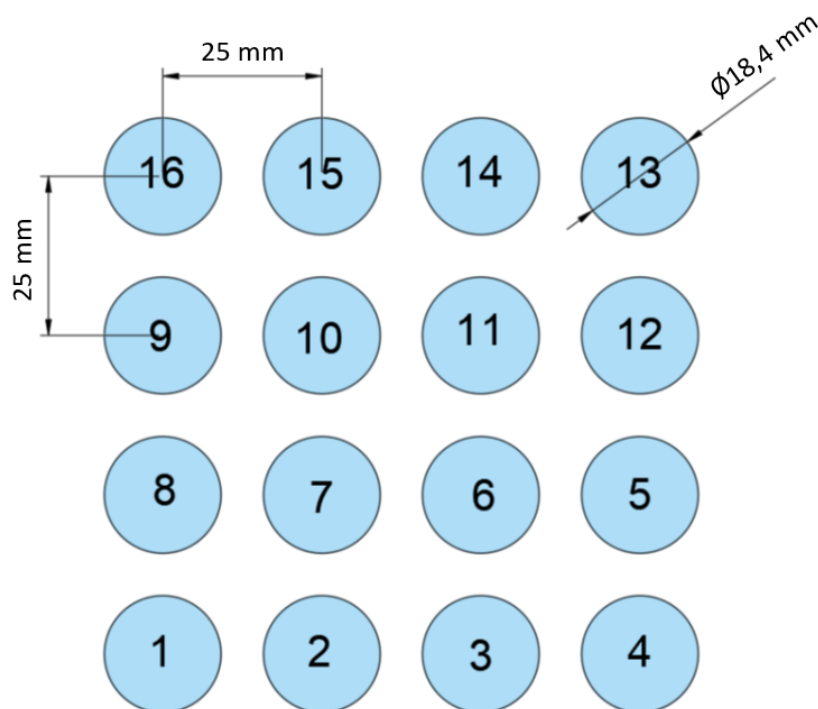


Figura 25. Modelo uno rectangular con distancia entre centro de 25 mm

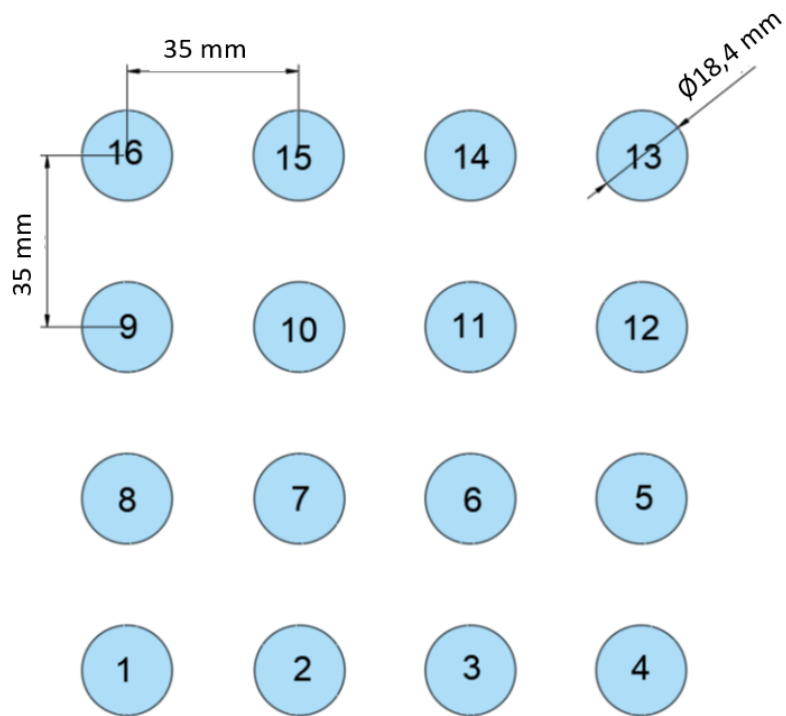


Figura 26. Modelo dos rectangular con distancia entre centro de 35 mm.

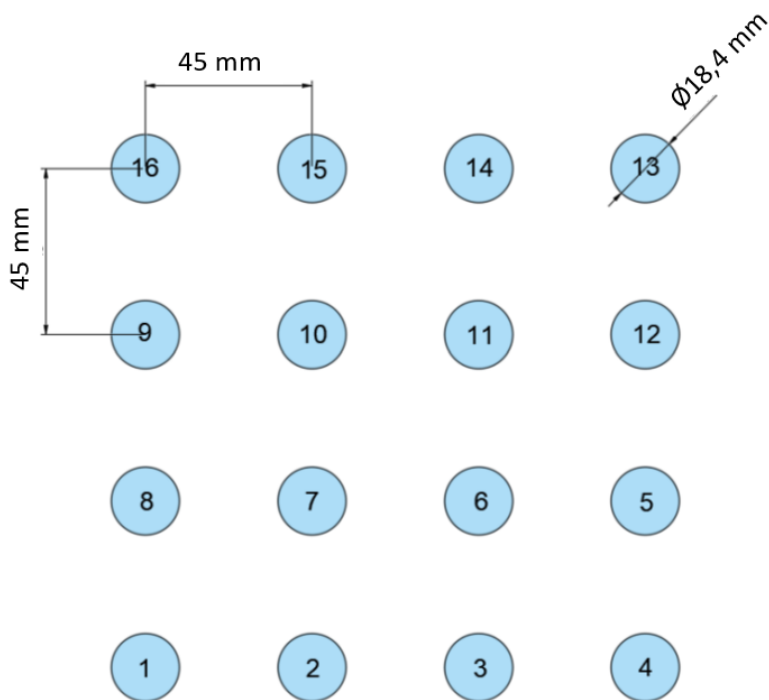


Figura 27. Modelo tres rectangular con distancia entre centro de 45 mm.

La **Figura 28** proporciona las dimensiones detalladas de la batería de ion de litio 18650.

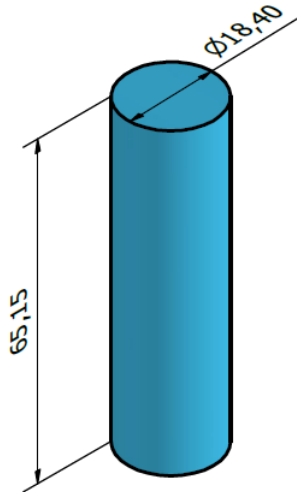


Figura 28. Batería ion de litio 18650, las unidades están dadas en mm.

En la **Figura 29, 30 y 31** se presenta el modelo tridimensional del diseño 1,2 y 3 respectivamente, el cual es rectangular y compuesto por 16 celdas. Para realizar dicho modelo, se utilizó el software SpaceClaim de Ansys Fluent. Cada celda tiene un diámetro de 18,40 mm y una altura de 65,15 mm; el arreglo sigue un patrón rectangular y está alineado.

A continuación, tenemos los modelos propuestos.

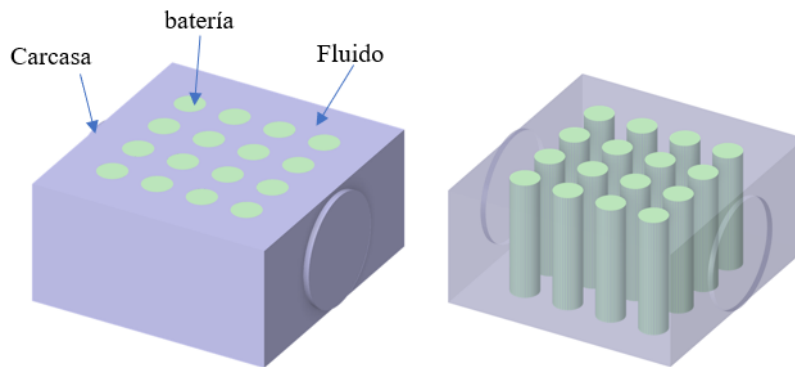


Figura 29. Modelo 3D del diseño 1 realizado en SpaceClaim.

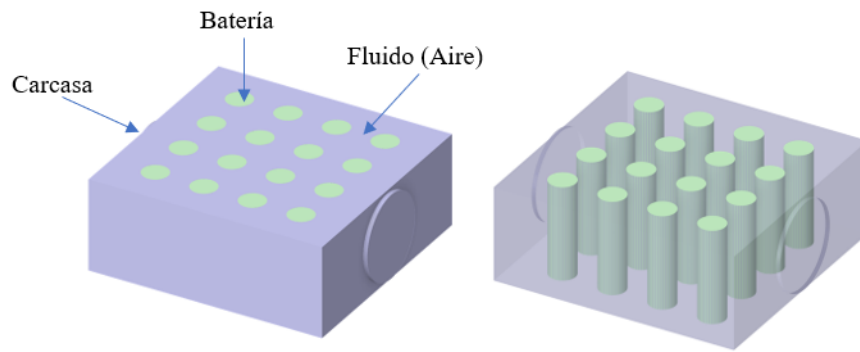


Figura 30. Modelo 3D del diseño 2 realizado en SpaceClaim.

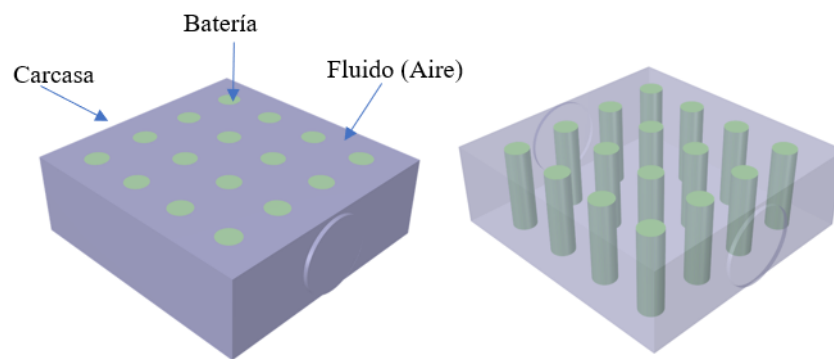


Figura 31. Modelo 3D del diseño 3 realizado en SpaceClaim.

5.4.5.2 Análisis de independencia de mallas. Se realizaron simulaciones con una prueba de descarga en el módulo de batería para los diseños compuestos de dieciséis celdas, para llevar a cabo la prueba de independencia de mallas se evaluaron tres mallas distintas, y el parámetro de comparación entre ellas fue la temperatura máxima alcanzada por la celda más caliente al final de la descarga y el número de elementos de cada malla. Los resultados respectivos se presentan en las **Tablas 11, 12 y 13**; para el modelo 1 la celda 9, para el modelo 2 la celda 12 y para el modelo 3 la celda 5, todo bajo las mismas condiciones de operación, después de realizar el análisis se seleccionó la malla 2 para los modelos 1 y 2, para el modelo 3 se seleccionó la malla 1. En el análisis de independencia de malla se analiza la temperatura, esta se debe mantener constante o que la variación de temperatura entre mallas sea mínima. Este criterio garantiza la estabilidad en los resultados.

Tabla 11. Análisis de independencia de mallas para el modelo 1.

Descripción	Malla 1	Malla 2	Malla 3
No. elementos	265820	305257	433268
Temperatura máxima (°C) de la celda 9.	63,45	63,52	63,71

Tabla 12. Análisis de independencia de mallas para el modelo 2.

Descripción	Malla 1	Malla 2	Malla 3
No. elementos	279423	349435	415872
Temperatura máxima (°C) de la celda 12.	64,64	64,72	64,95

Tabla 13. Análisis de independencia de mallas para el modelo 3.

Descripción	Malla 1	Malla 2	Malla 3
No. elementos	321047	408382	515163
Temperatura máxima (°C) de la celda 5.	60,12	60,38	60,154

5.4.6. Modelo matemático

Paccha et al. (2023) abordaron la solución de las ecuaciones rectoras que describen la continuidad, el momento y la energía.

$$\nabla \cdot \vec{v} = 0, \quad (7)$$

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} = -\frac{\nabla p}{\rho} + \frac{u}{\rho} \nabla^2 \vec{v}, \quad (8)$$

$$\frac{\partial(\rho e)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho e \vec{v}) = -p \nabla \cdot \vec{v} + \nabla \cdot (k_f \nabla T) + \Phi \quad (9)$$

Donde \vec{v} es la velocidad del aire, t es el tiempo, p es la presión, ρ es la densidad del aire, μ es la viscosidad dinámica, e es la energía interna. T es la temperatura, k_f es la conductividad térmica del fluido y Φ es el termino de disipación viscosa.

Según Paccha (2023), que cita a Akbarzadeh et al., 2021. Modelaron la turbulencia en un banco de baterías, se puede modelar mediante el modelor $k - \epsilon$:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k \cdot \vec{v})}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k + P_B - \rho \epsilon - Y_M + S_K \quad (10)$$

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \epsilon \cdot \vec{v})}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^3}{k} + S_\epsilon \quad (11)$$

Donde k es la energía cinética turbulenta, ϵ es la disipación de la energía cinética turbulenta, μ es la viscosidad turbulenta, σ_t y σ_ϵ son los números de Prandtl para k y ϵ , respectivamente, P_k y P_b describen la energía cinética turbulenta asociada a los gradientes de velocidad medios y la flotabilidad, respectivamente, Y_M es la contribución de la compresibilidad a la turbulencia, S_k y S_ϵ son términos fuente turbulentos definidos por el usuario, G_k y G_b representan la generación de energía cinética turbulenta debido a los gradientes de velocidad medios y la flotabilidad, respectivamente. Además, existen constantes del modelo denominadas $C_{1\epsilon}$, $C_{2\epsilon}$, $C_{3\epsilon}$. Además, la formulación de conservación de energía para la batería se expresa como:

$$\rho_b C_{p,b} \frac{\partial T_B}{\partial T} = \nabla \times (k_b \nabla T_b) + q_{gen} \quad (12)$$

Donde ρ_b es la densidad de la batería, $C_{c,b}$ es la capacidad calorífica de la batería, T_b es la temperatura de la batería, k_b es la conductividad térmica de la batería y q_{gen} es la generación de calor. Se implementó un término fuente para tener en cuenta la generación de calor volumétrica en cada celda de acuerdo con el efecto Joule.

$$q_{gen} = \frac{I^2 \times R_{int}}{Vol} \quad (13)$$

Donde I es la corriente de descarga, R_{int} es la resistencia interna de la celda y Vol es el volumen de una celda; otro enfoque comúnmente utilizado para calcular la tasa de generación de calor en una celda es agregar un coeficiente térmico de entropía a la Ecuación 11. Además Bernardi et al. (1985) desarrolló la siguiente fórmula:

$$Q_{gen} = I(V_{OC} - V) - I \left(T \frac{dV_{OC}}{dT} \right) = I^2 R_{int} - I \left(\frac{dV_{OC}}{dT} \right) \quad (14)$$

Donde la corriente I es positiva para descargar y negativa para cargar. Tanto el potencial de circuito abierto (V_{OC}) como la resistencia interna total de la batería R_{int} dependen del estado de carga (SOC) y la temperatura de la celda; el término $I(V_{OC} - V)$ representa el calentamiento debido al efecto Joule (generación de calor irreversible); el segundo término es el cambio de entropía (generación de calor reversible), atribuido a las reacciones electroquímicas. Además, se desprecian el efecto de cambio de fase, el efecto de mezcla y las reacciones simultáneas en la formulación de Bernardi.

5.4.6.1 Valores iniciales y condiciones de frontera. Los valores iniciales y las condiciones de frontera se fundamentaron de la investigación de Ranjbaran et al. (2020). Las condiciones especificadas son las siguientes:

- La celda está aislada en la parte inferior y expuesta al aire atmosférico desde la parte superior.
- Se considera que las baterías están a 1 atmósfera, ya que están expuestas a la atmósfera del aire.
- La temperatura inicial en las baterías y la temperatura ambiente, se establece en 23 °C. Esto implica que, al inicio de la simulación, el fluido se encuentra a temperatura ambiente, en cambio, al validar los datos obtenidos por la parte experimental mediante Ansys, esta temperatura varía dependiendo de cada celda.

Liu et al. (2022) considera la convección natural con el ambiente exterior, utilizando un coeficiente de convección de 5 W/(m²K) para las superficies superior e inferior del sistema. Además, se mantiene una temperatura inicial y ambiente constante de 300 K.

Las simulaciones se llevaron a cabo mediante código CFD (Dinámica de Fluidos Computacional) utilizando Ansys Fluent. El acoplamiento presión-velocidad se realiza mediante el algoritmo SIMPLE. Se adopta un esquema PRESTO para discretizar la presión, mientras que para el momento y la energía se utiliza el método de diferenciación upwind de segundo orden. El criterio de convergencia para las ecuaciones de flujo y energía se establece en que los residuos no superen 10⁻⁴ y 10⁻⁶ respectivamente. Se realizó una simulación transiente de 1800 segundos con un paso de tiempo de un segundo.

Se plantea que la simulación adopta un enfoque transitorio debido a la fuerte dependencia temporal del proceso de convección forzada por medio del aire; la dinámica del flujo se caracteriza como turbulento, y se implementa el esquema SIMPLE para el acoplamiento presión-velocidad. Además, la presión se discretiza utilizando el método PRESTO!

En la **Figura 32** muestra los valores abordados en el programa Ansys Fluent

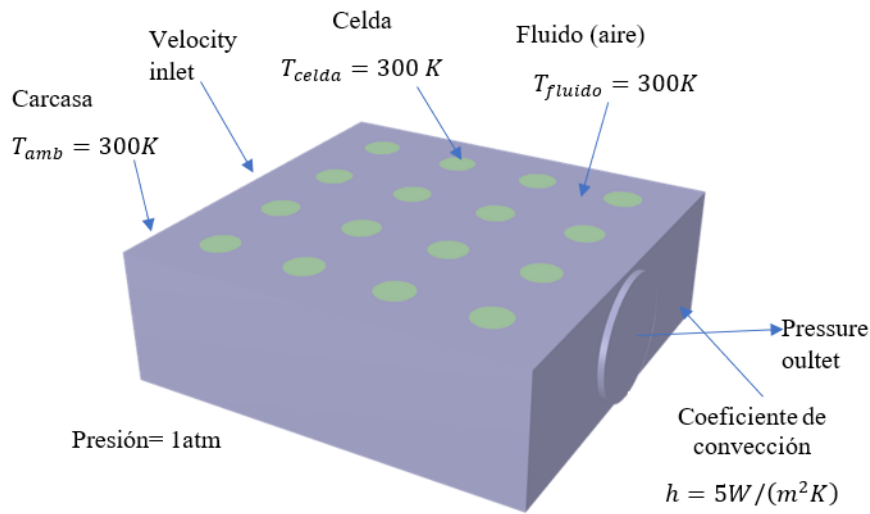


Figura 32. Condiciones iniciales y de contorno.

5.5. Error RMSE

Kumari, (2022) menciona que el error cuadrático medio (RMSE) es una medida de error absoluto utilizada en diversas disciplinas como el aprendizaje automático y la minería de datos, el análisis de series temporales, las geociencias, las ciencias atmosféricas, las ciencias biológicas y otros campos; estas medidas se utilizan principalmente para el ajuste del modelo (elección óptima de los parámetros del modelo dado), la validación del modelo, la selección del modelo, la comparación del modelo (entre varios modelos competidores) y la evaluación de la predicción, en estas aplicaciones, suele ser conveniente utilizar una única medida de error para el ajuste del modelo, mientras que otras aplicaciones suelen requerir múltiples medidas de error.

El error RMSE se calcula mediante la siguiente **Ecuación 13** :

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(\hat{y}_i - y_i)^2}{n}} \quad (15)$$

En donde:

\hat{y}_i : son valores predichos.

y_i : son valores observados.

n : número de observaciones.

6. Resultados

6.1. Condiciones de operación de las baterías de ion de litio

Se evaluó el comportamiento térmico de un módulo de dieciséis barras cilíndricas de aluminio como representación de celdas de baterías de litio 18650 en tres diseños con diferente espaciado geométrico.

Según la revisión literaria, la temperatura de operación de descarga alcanza un rango entre $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $60\text{ }^{\circ}\text{C}$. Por lo tanto, se elevó la temperatura desde la temperatura ambiente ($20\text{ }^{\circ}\text{C}$) hasta un rango intermedio de descarga ($40\text{ }^{\circ}\text{C}$) con una tolerancia de $\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Además, para la entrada del flujo de aire se midió una velocidad de $3,1\text{ m/s}$.

6.2. Construcción de los componentes del sistema

Con los planos obtenidos en la sección anterior se procede a construir cada uno de los componentes del sistema propuesto.

El elemento que aísla el conjunto de barras de aluminio con la temperatura ambiente es la madera, como se había detallado en la sección de procesamiento y análisis de datos, se realizaron experimentaciones previas para obtener su geometría final y las condiciones de operación como lo es la generación de calor y la corriente de aire. En la **Figura 33** se encuentra representado un diseño conceptual del banco construido.

Las dimensiones y especificaciones para la construcción de los componentes se muestran en la sección de análisis y procesamiento de datos. Además, luego de construir todos los elementos que intervienen en el prototipo se realiza el ensamblaje del mismo, en la **Figura 34** se puede observar el ensamblaje de los componentes.

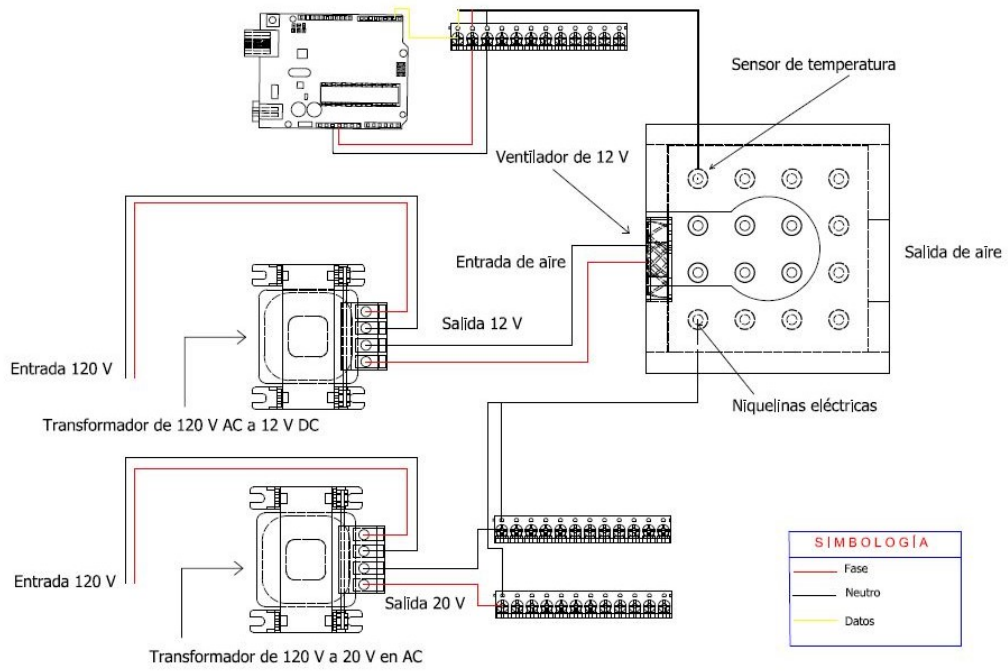


Figura 33. Diseño conceptual del banco de tubos.

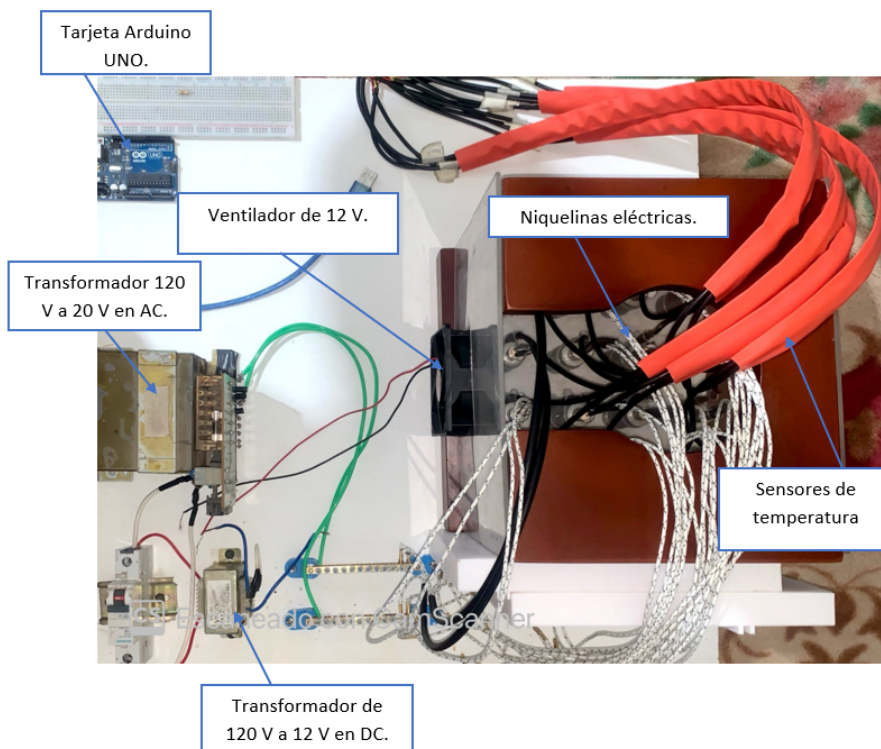


Figura 34. Ensamble del banco de tubos.

6.3. Validación del sistema

6.3.1. Resultados del diseño 1

La **Figura 35** muestra el comportamiento transitorio de temperatura para el diseño 1. En este diseño la separación entre celdas es de 25 mm y la variación de temperatura se la toma en dos intervalos de tiempo, en un lapso de 20 se aplica convección natural alcanzando un rango de temperatura de 45 ± 5 °C, al alcanzar este rango se aplicó un flujo de aire a 3.1 m/s que representa la convección forzada, durante el segundo intervalo de tiempo de 20 minutos respectivamente, reduciendo y en algunos casos de celdas manteniendo la temperatura de las dieciséis celdas a un rango de 30 a 46 °C.

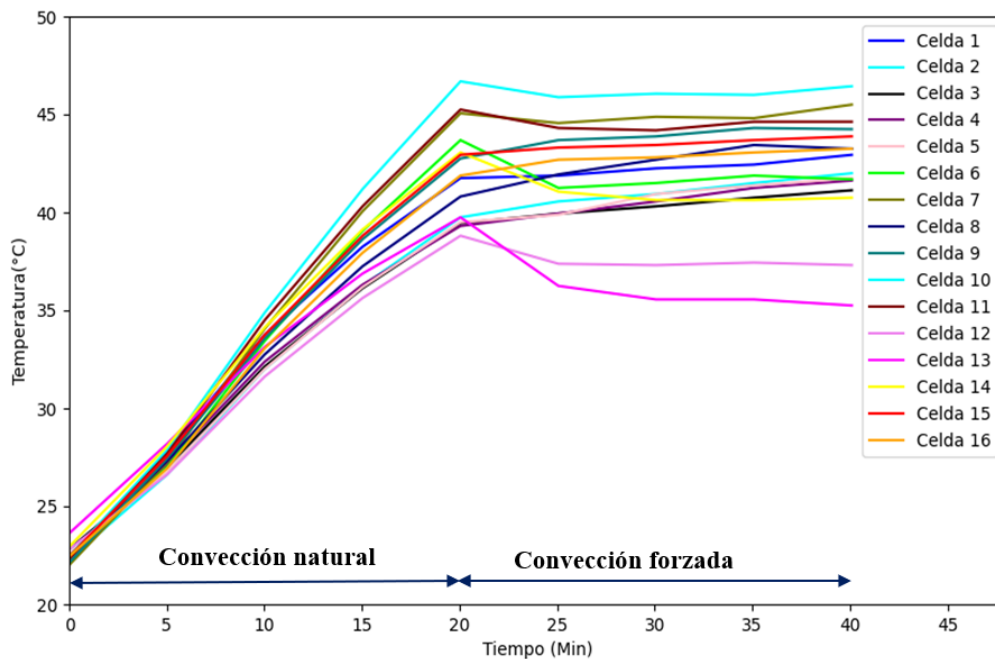


Figura 35. Mediciones experimentales del diseño 1.

En la **Figura 36** se observa la diferencia de temperatura que existe en las dieciséis celdas, en donde se presentan las variaciones térmicas entre las celdas que conforman el banco de tubos, con ayuda de esta gráfica se logró entender el desempeño térmico y funcional del diseño uno.

La temperatura promedio de todas las celdas en el módulo al finalizar el proceso de descarga se muestra en la **Figura 37**. En esta figura se observa que las celdas con mayor temperatura son las celdas 9, 10, 11 y 15, con valores de 44.25 °C, 46.44 °C, 44.63 °C Y 43.88 °C respectivamente. Por otro lado, las celdas con menor temperatura son las celdas 12, 13 Y 14, con valores de 37.31 °C, 35,25 °C y 40,75 °C respectivamente. Las demás celdas presentan temperaturas intermedias dentro de un rango de 40°C a 35 °C.

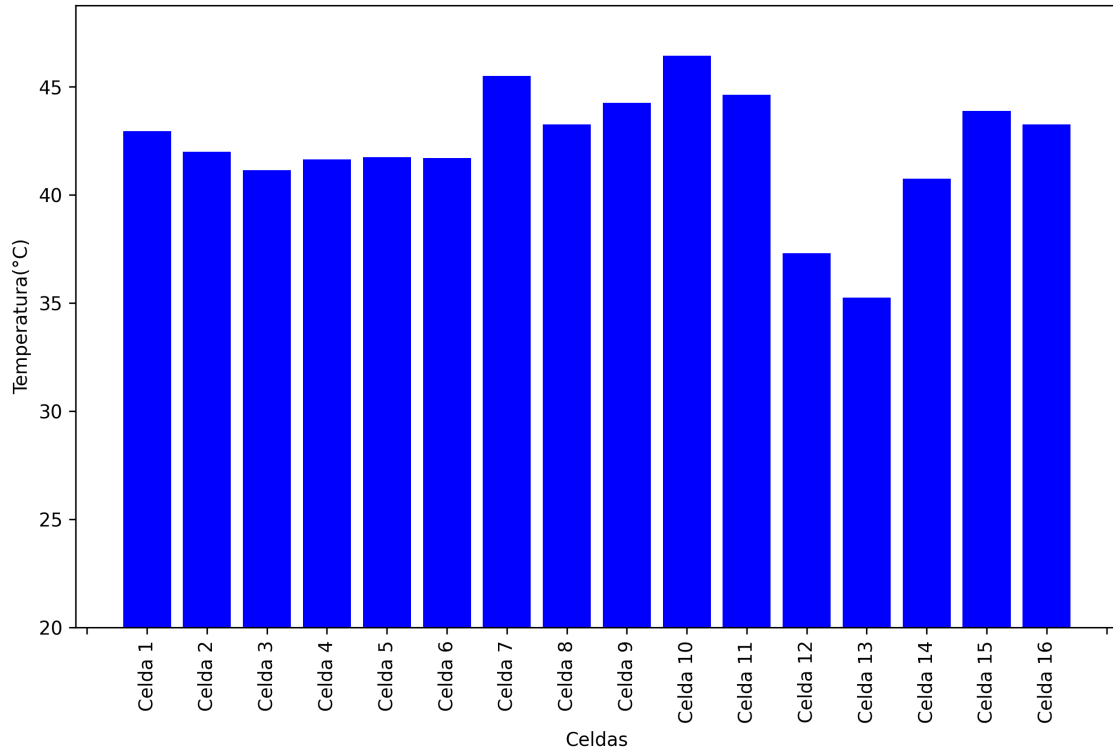


Figura 36. Diferencia de temperatura al final del proceso entre celdas para el diseño 1.

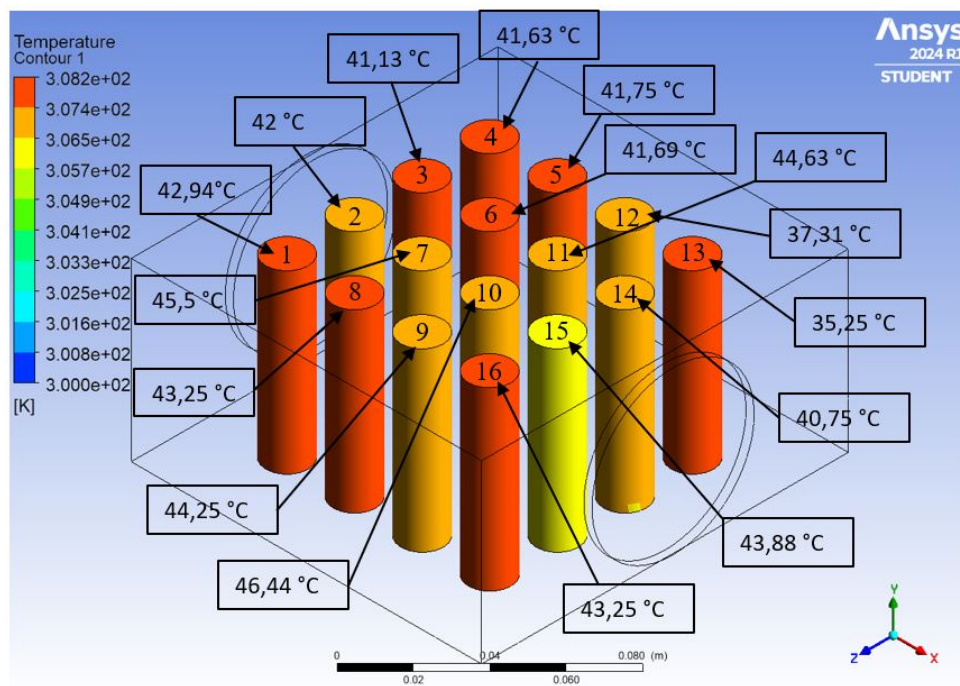


Figura 37. Mediciones de temperatura para el diseño 1 con espaciamiento entre celdas de 25 mm al final del proceso.

En la **Figura 38, 39, 40 y 41**, se muestra el comportamiento transitorio de todas las celdas del diseño 1 bajo condiciones de convección natural. Se resaltan las temperaturas

más altas en las celdas 6, 7, 10 y 11, respectivamente. Las demás celdas se presentan en gris para evitar superposiciones, lo que facilita la visualización de las curvas con temperaturas más elevadas.

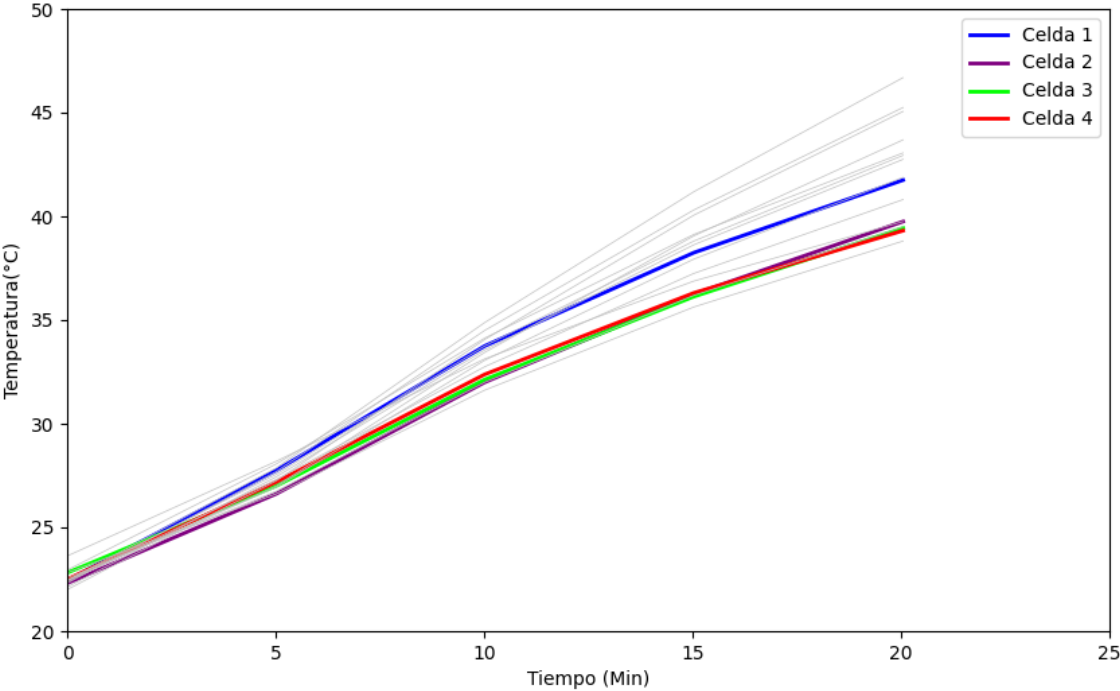


Figura 38. Convección natural celdas 1, 2, 3 y 4.

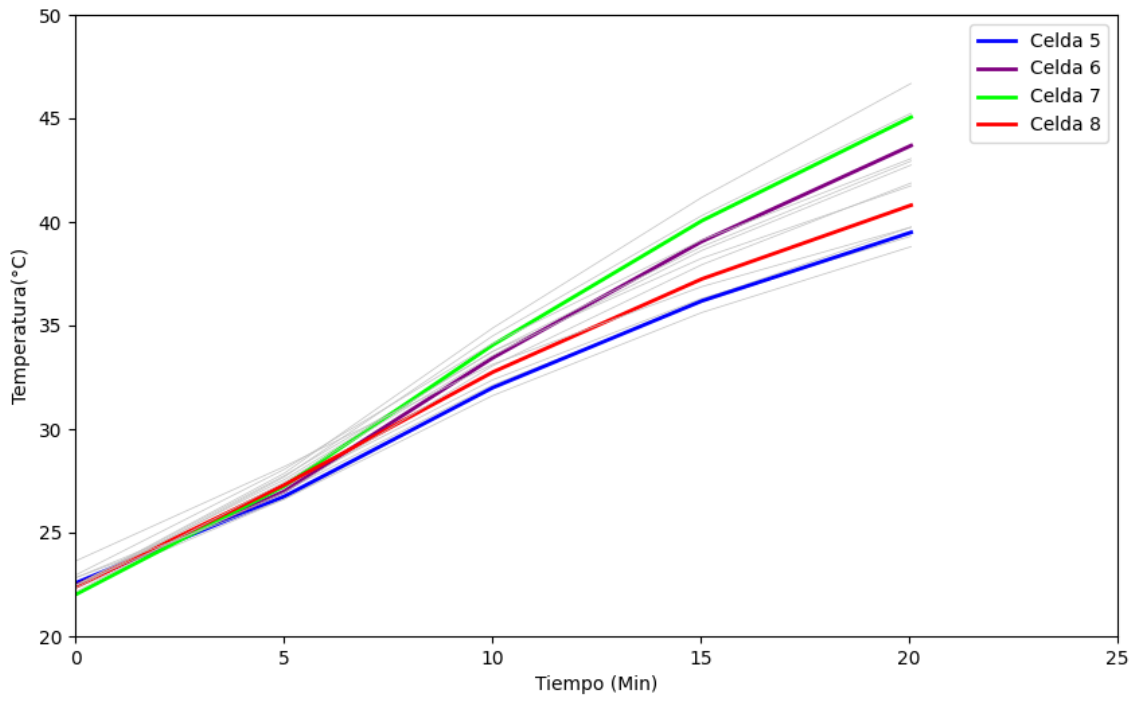


Figura 39. Convección natural celdas 5, 6, 7 y 8.

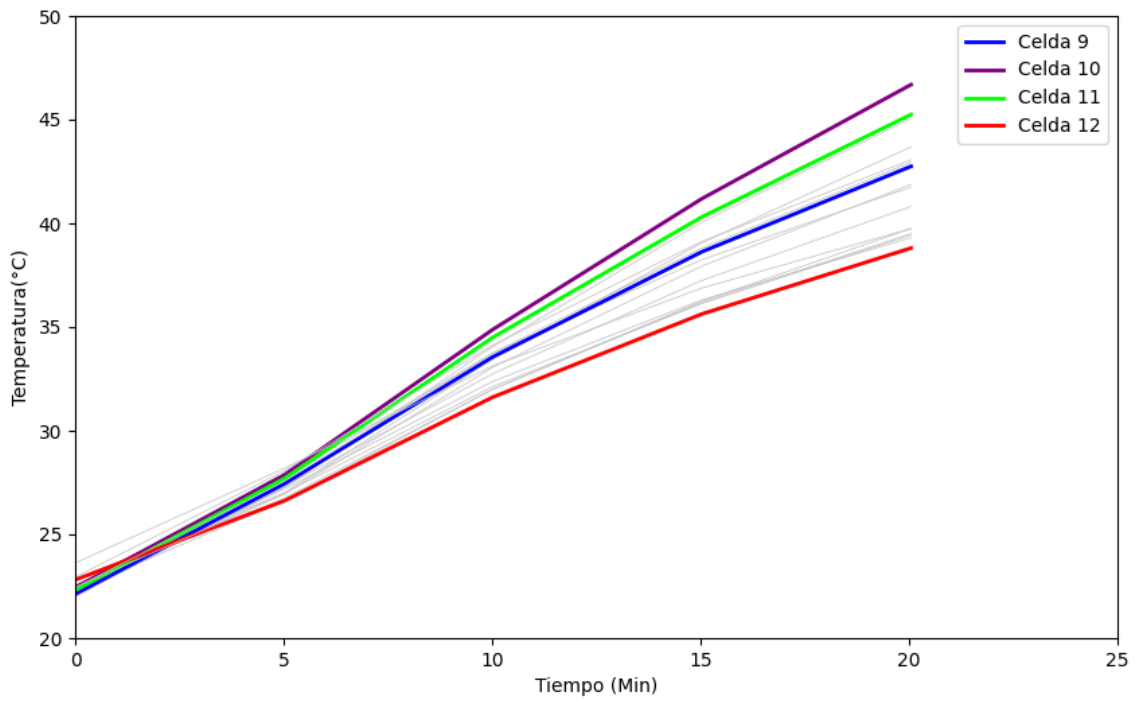


Figura 40. Convección natural celdas 9, 10, 11 y 12.

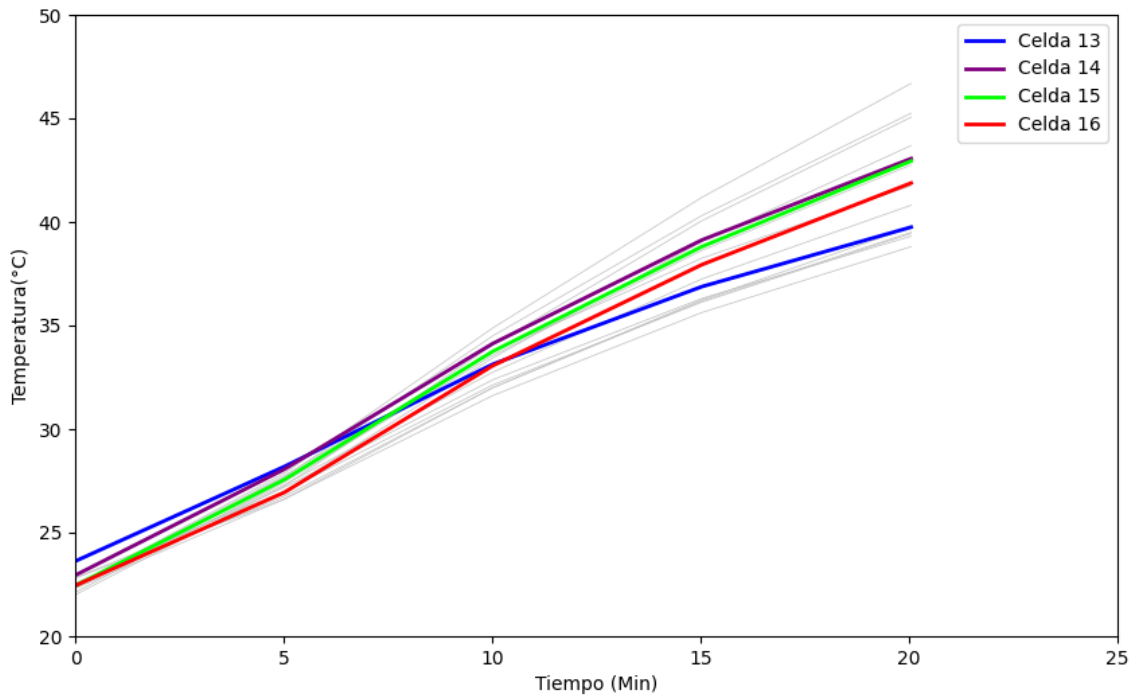


Figura 41. Convección natural celdas 13, 14, 15 y 16.

6.3.2. Resultados del diseño 2

Como se explicó en la **Figura 35**, cada curva tiene características diferentes. En el caso del diseño dos, la distancia entre celdas varía en 35 mm y la variación de temperatura se registra en dos intervalos de tiempo. En un lapso de 30 minutos que corresponde a una convección natural, se alcanza un rango de temperatura de 45 ± 5 °C. Al alcanzar este rango, se aplica un flujo de aire de 3,1 m/s durante el segundo intervalo de tiempo que corresponde a una convección forzada de 30 minutos, reduciendo así la temperatura de las dieciséis celdas a un rango de 32 a 41 °C, esto se puede observar en la **Figura 42**.

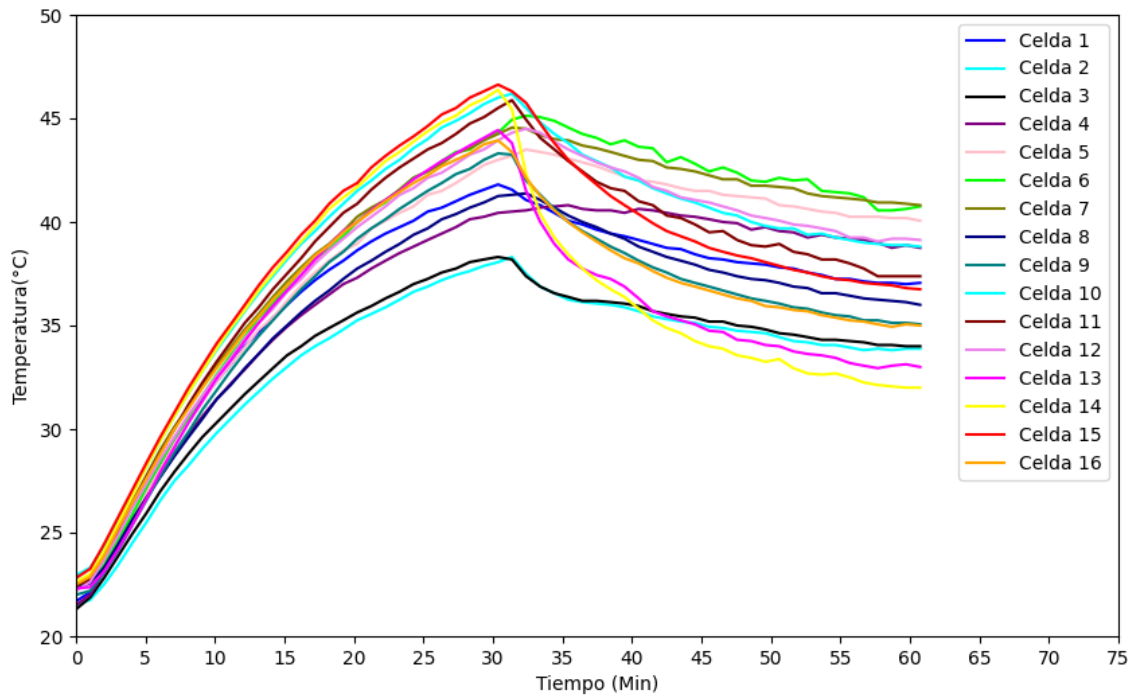


Figura 42. Mediciones experimentales del diseño 2.

En la **Figura 43** se observan las diferencias de temperatura que existe en las dieciséis celdas del diseño 2, en donde se presentan las variaciones térmicas entre las celdas que conforman el banco de tubos, con ayuda de esta gráfica se logró entender el desempeño térmico y funcional del diseño uno.

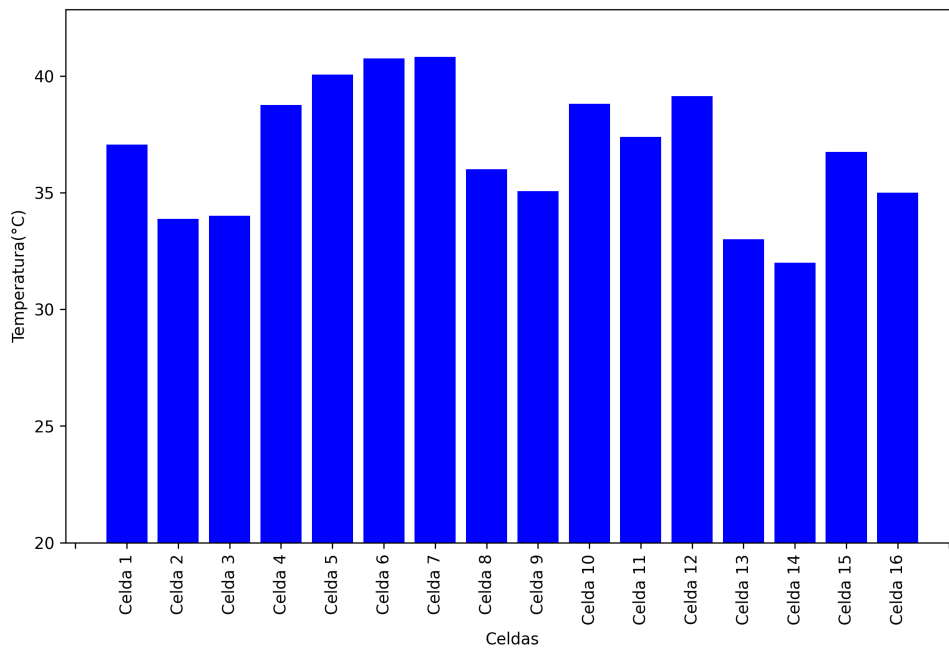


Figura 43. Diferencia de temperatura entre celdas al final del proceso para el diseño 2.

En la **Figura 44, 45, 46 y 47**, se muestra el comportamiento transitorio de todas las celdas del diseño 2 bajo condiciones de convección natural. Se resaltan las temperaturas más altas en las celdas 10, 11, 14 y 15, respectivamente. Las demás celdas se presentan en gris para evitar superposiciones, lo que facilita la visualización de las curvas con temperaturas más elevadas. Además, existe cierto ruido en los sensores, por ejemplo, en la celda 6, lo cual también es debido a la convección forzada.

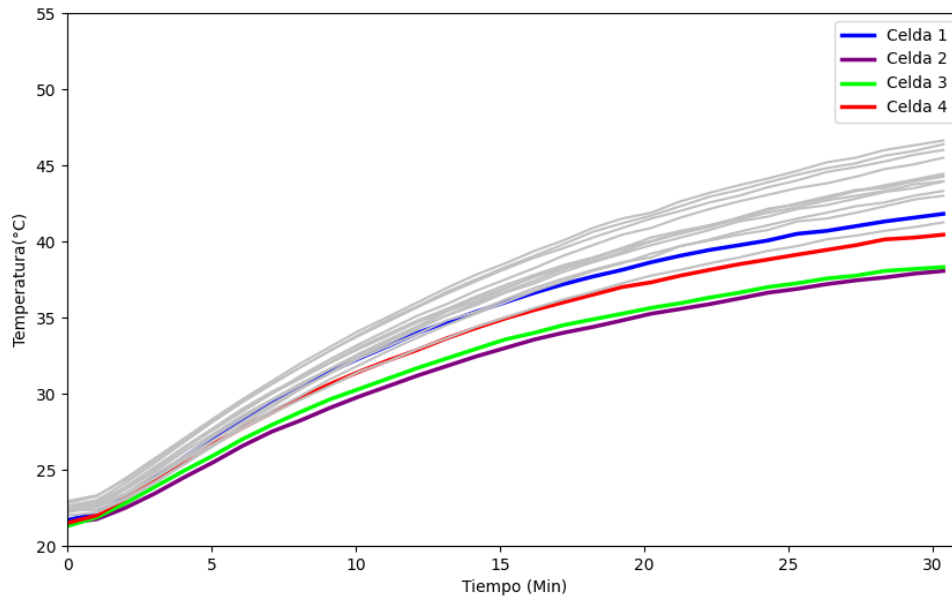


Figura 44. Mediciones para el diseño 2 con espaciamiento entre celdas de 35 mm, proceso de convección natural, celdas 1, 2, 3 y 4.

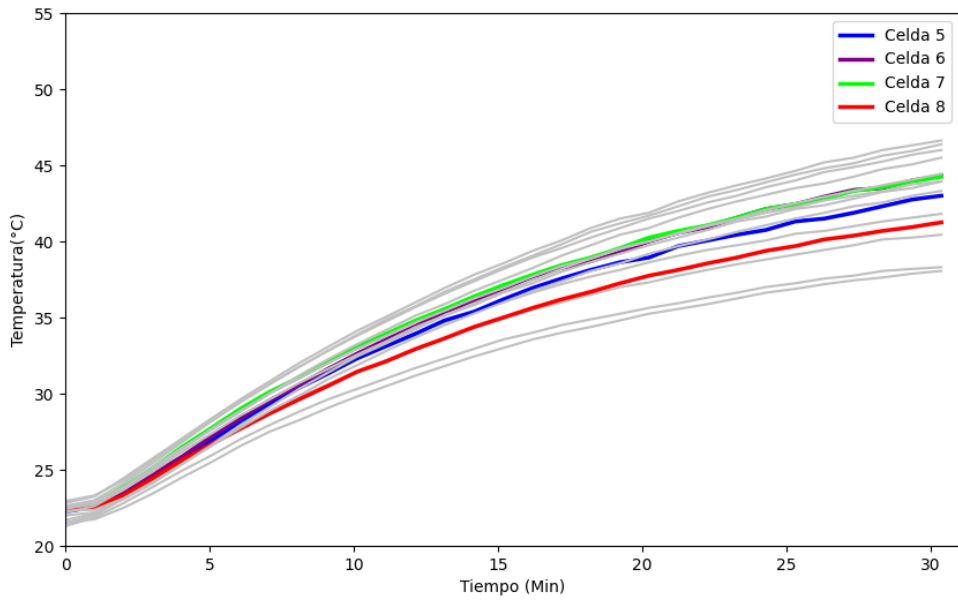


Figura 45. Mediciones para el diseño 2 con espaciamiento entre celdas de 35 mm, proceso de convección natural, celdas 5, 6, 7 y 8.

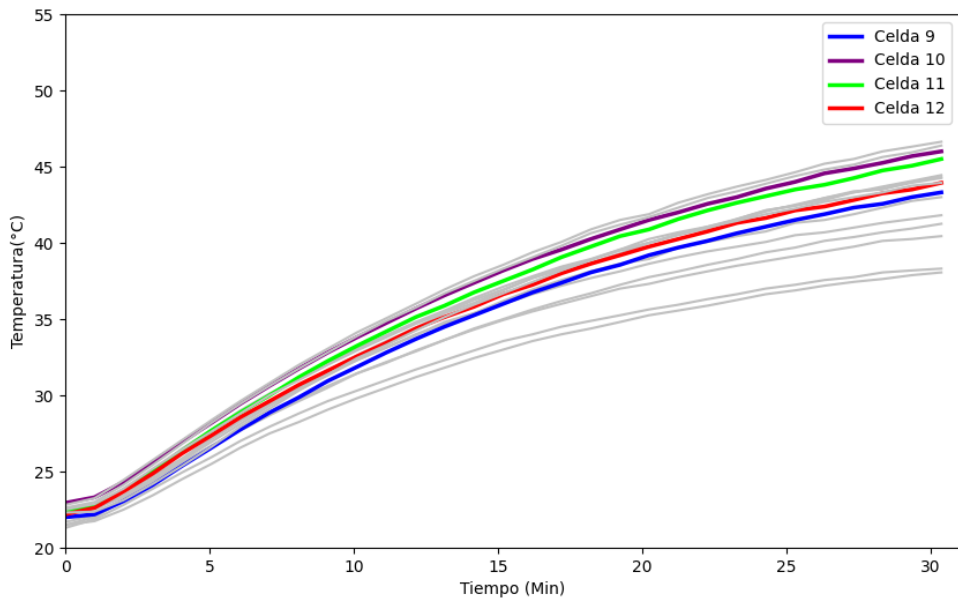


Figura 46. Mediciones para el diseño 2 con espaciamiento entre celdas de 35 mm, proceso de convección natural, celdas 9, 10, 11 y 12.

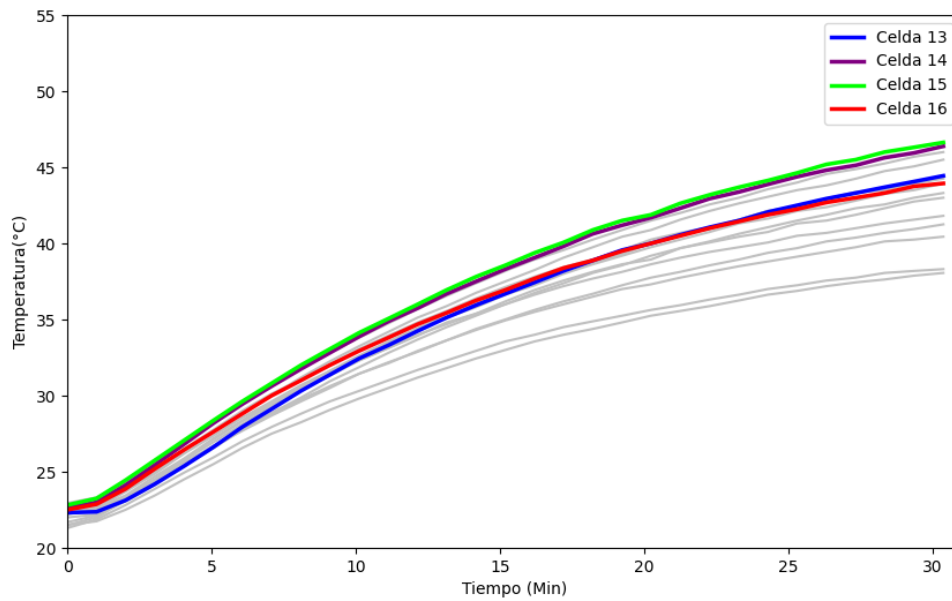


Figura 47. Mediciones para el diseño 2 con espaciamiento entre celdas de 35 mm, proceso de convección natural, celdas 13, 14, 15, 16.

La **Figura 48** muestra la temperatura promedio de todas las celdas del módulo al finalizar el proceso. En esta representación, se destacan las celdas con las temperaturas más altas, correspondientes a las celdas 5, 6, 7, 10 y 12, con valores de 40,06 °C, 40,75 °C, 40,81 °C, 38,81 °C y 39,13 °C, respectivamente. Asimismo, se identifican las celdas con las temperaturas más bajas que son las celdas 2, 3, 13 y 14, con valores de 33,88 °C, 34 °C, 33 °C y 32 °C, respectivamente.

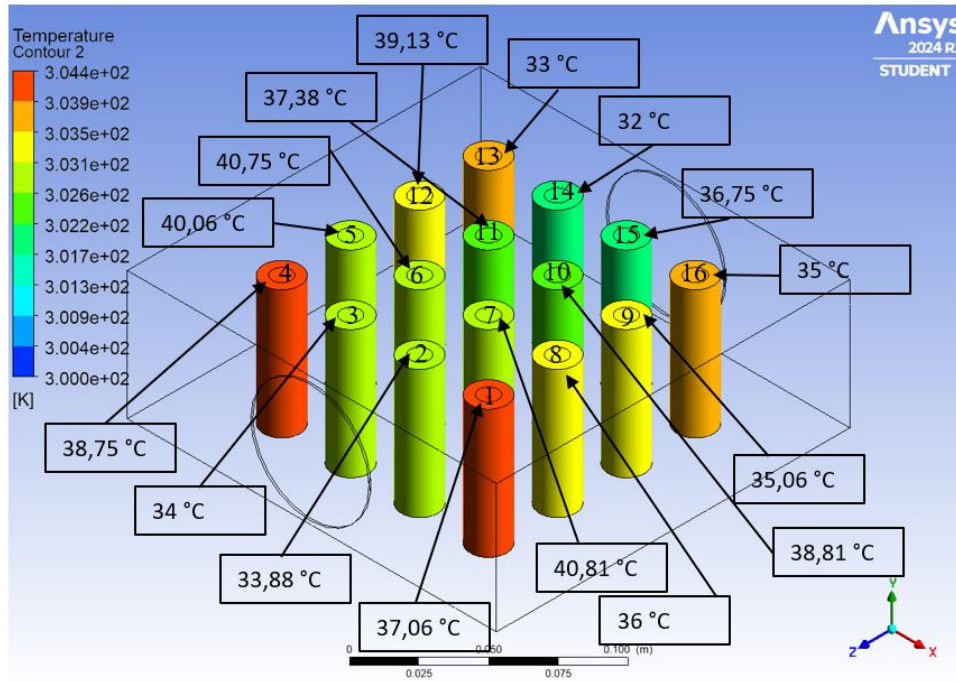


Figura 48. Mediciones de temperatura para el diseño 2 con espaciamento entre celdas de 35 mm al final del proceso.

6.3.3. Resultados del diseño 3

Como se explicó en las **Figuras 35 y 42**, cada curva posee un significado específico. En el caso del diseño tres, la distancia entre celdas varía en 45 mm y la variación de temperatura se registra en dos intervalos de tiempo. En un lapso de 30 minutos, se alcanza un rango de temperatura de 40 ± 5 °C. Una vez alcanzado este rango, se aplica un flujo de aire de 3,1 m/s durante el segundo intervalo de tiempo de 30 minutos, reduciendo así la temperatura de las dieciséis celdas a un rango de 25 a 40 °C, como se observa en la **Figura 49**.

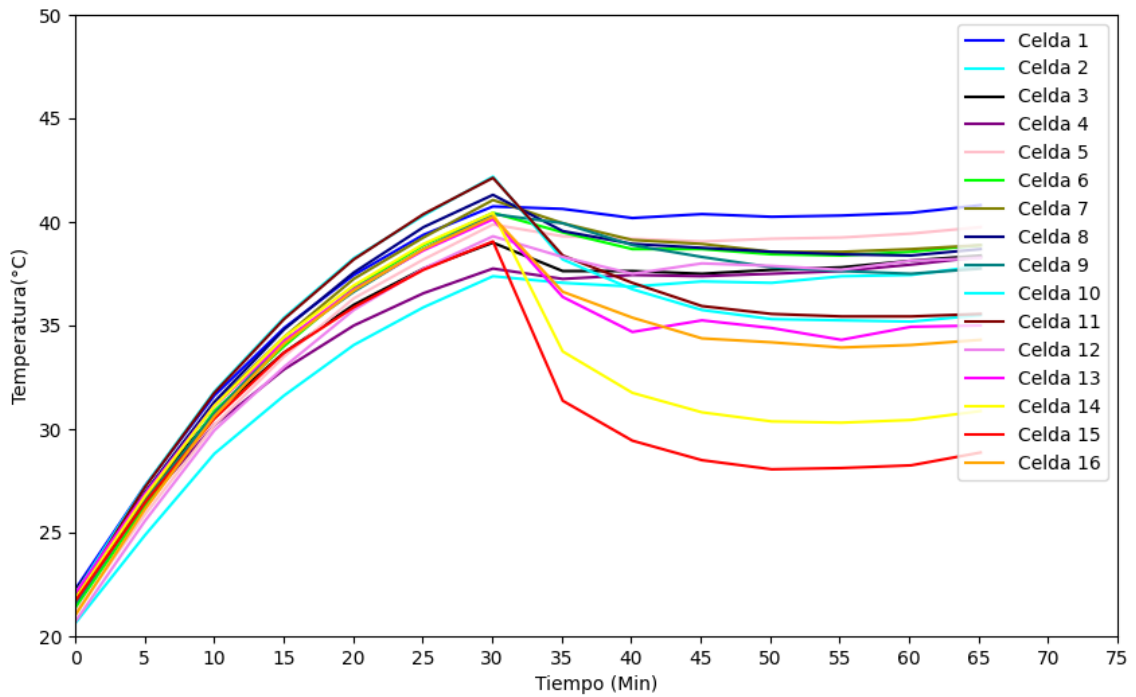


Figura 49. Mediciones experimentales del diseño 3.

En la **Figura 50** se observan las diferencias de temperatura que existen en las dieciséis celdas del diseño 3, en donde se presentan las variaciones térmicas entre las celdas que conforman el banco de tubos, con ayuda de esta gráfica se logrará entender el desempeño térmico y funcional del diseño.

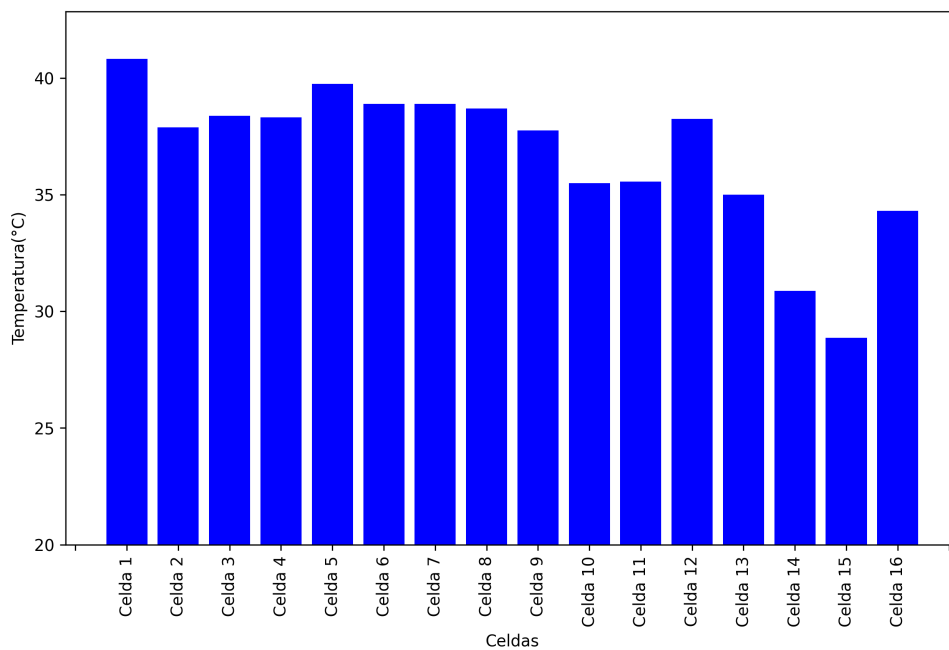


Figura 50. Diferencia de temperatura entre celdas para el diseño 3.

En la **Figura 51, 52, 53, 54**, se muestra el comportamiento transitorio de todas las celdas del diseño 3 bajo condiciones de convección natural. Se resaltan las temperaturas más altas en las celdas 10, 11, 13 y 14, respectivamente. Las demás celdas se presentan en gris para evitar superposiciones, lo que facilita la visualización de las curvas con temperaturas más elevadas.

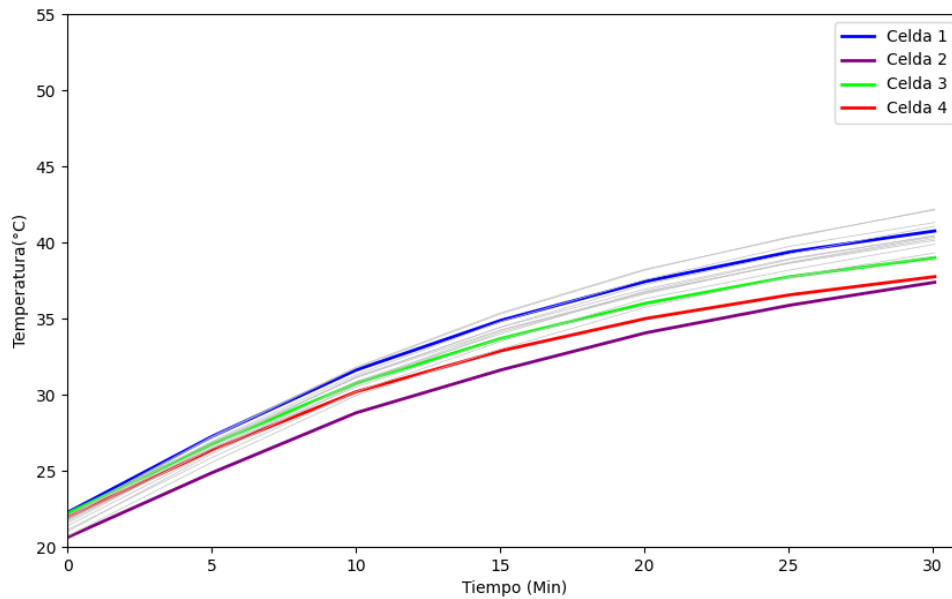


Figura 51. Mediciones para el diseño 3 con espaciamiento entre celdas de 45 mm, proceso de convección natural, celdas 1, 2, 3 y 4.

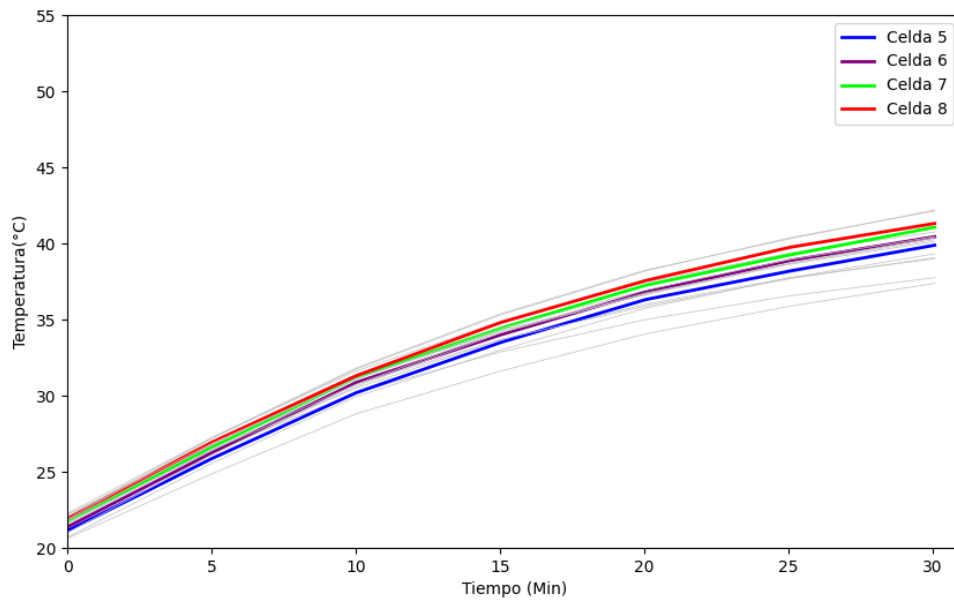


Figura 52. Mediciones para el diseño 3 con espaciamiento entre celdas de 45 mm, proceso de convección natural, celdas 5, 6, 7 y 8.

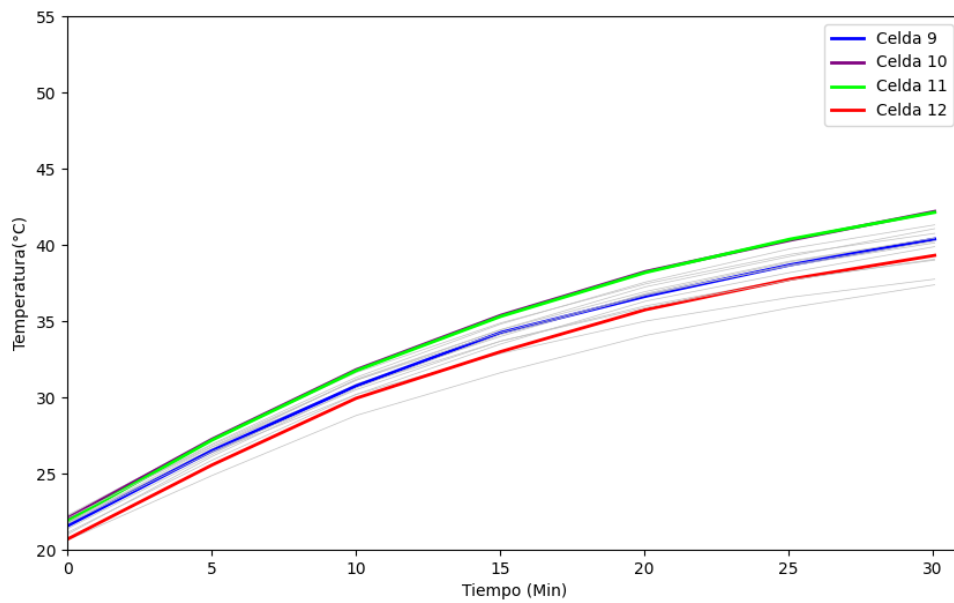


Figura 53. Mediciones para el diseño 3 con espaciamiento entre celdas de 45 mm, proceso de convección natural, celdas 9, 10, 11 y 12.

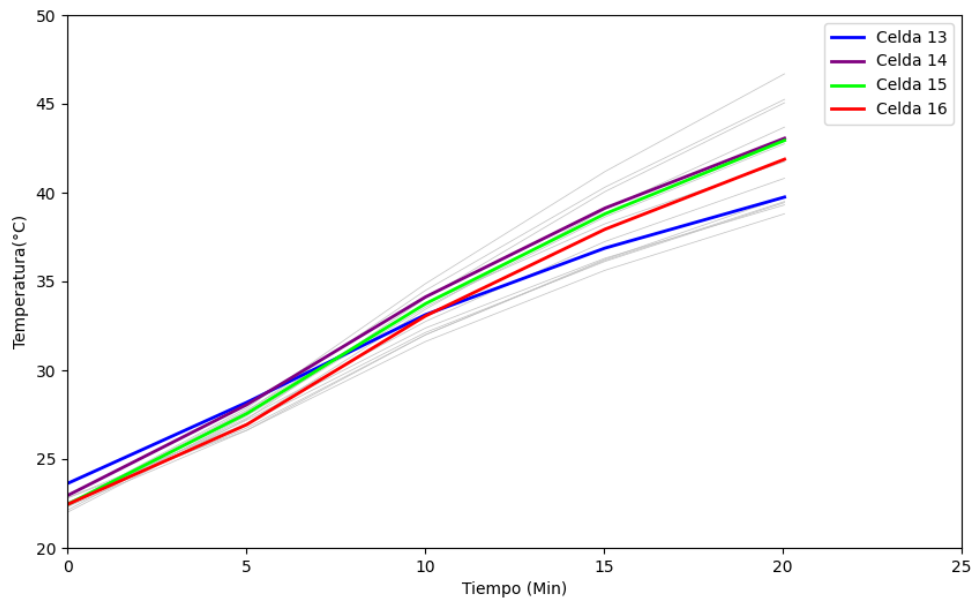


Figura 54. Mediciones para el diseño 3 con espaciamiento entre celdas de 45 mm, proceso de convección natural, celdas 13, 14, 15 y 16.

La **Figura 55** presenta las temperaturas promedio de todas las celdas del módulo al finalizar el proceso. En esta figura se puede observar claramente que las celdas 1, 5, 6 y 7 registran las temperaturas más altas, con valores de 40,81 °C, 39,75 °C, 38,88 °C y 38,88 °C, respectivamente. Por otro lado, las celdas 13, 14, 15 y 16 muestran las temperaturas más bajas, con valores de 35 °C, 30,87 °C, 28,87 °C y 34,31 °C, respectivamente. Las demás celdas presentan temperaturas intermedias, que oscilan entre 30 °C y 39 °C.

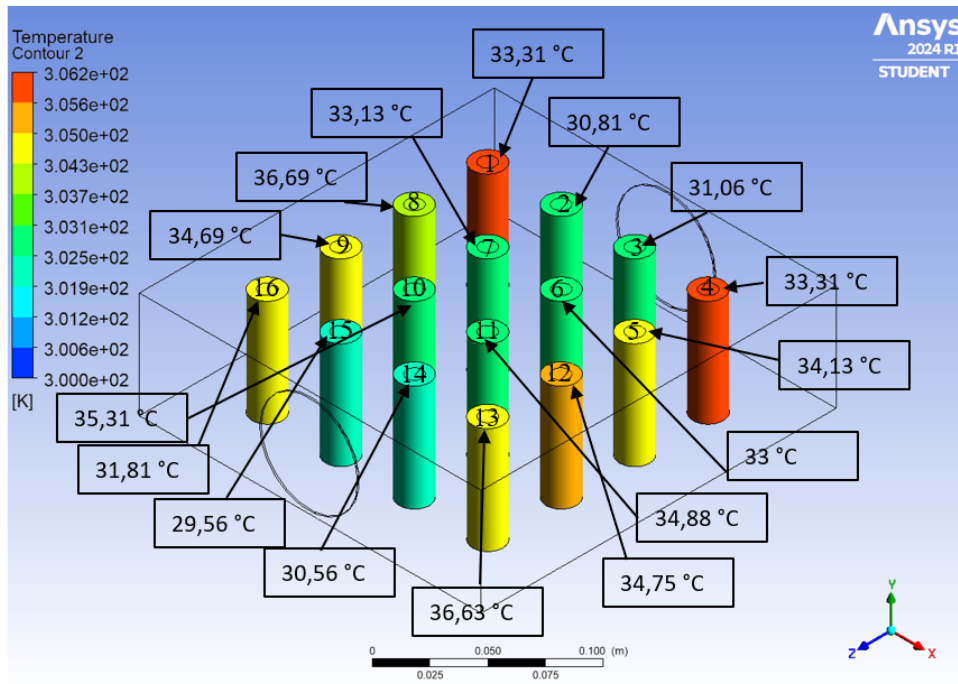


Figura 55. Mediciones de temperatura para el diseño 3 con espaciamiento entre celdas de 45 mm al final del proceso.

6.4. Resultados generales de los tres diseños

Las **Figuras 56, 57, 58 y 59** ilustran la temperatura al final del proceso para los tres diseños evaluados. Cada barra representa un modelo con su respectivo diseño que se basa en la separación entre celdas. En este gráfico, los datos se distribuyen a lo largo de 16 celdas, proporcionando una representación visual de cómo varían las temperaturas en función de la posición de la celda en cada diseño. Estas figuras permiten determinar cuál diseño presenta el mejor rendimiento. Como se observa en las figuras correspondientes a cada diseño, el diseño 3 demuestra consistentemente el mejor desempeño térmico especialmente desde la celda 13 a la celda 16.

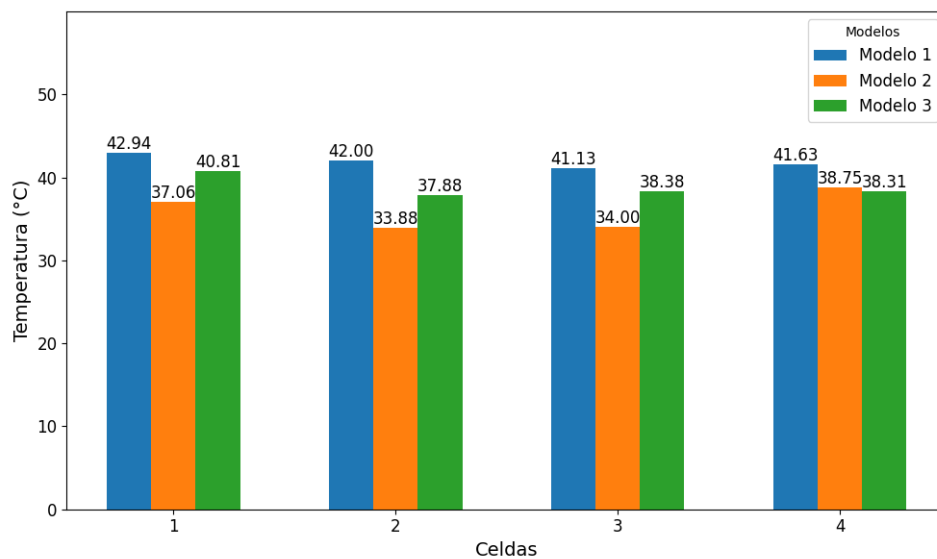


Figura 56. Comparación de temperatura al final del proceso entre los tres modelos celda 1, 2, 3 y 4.

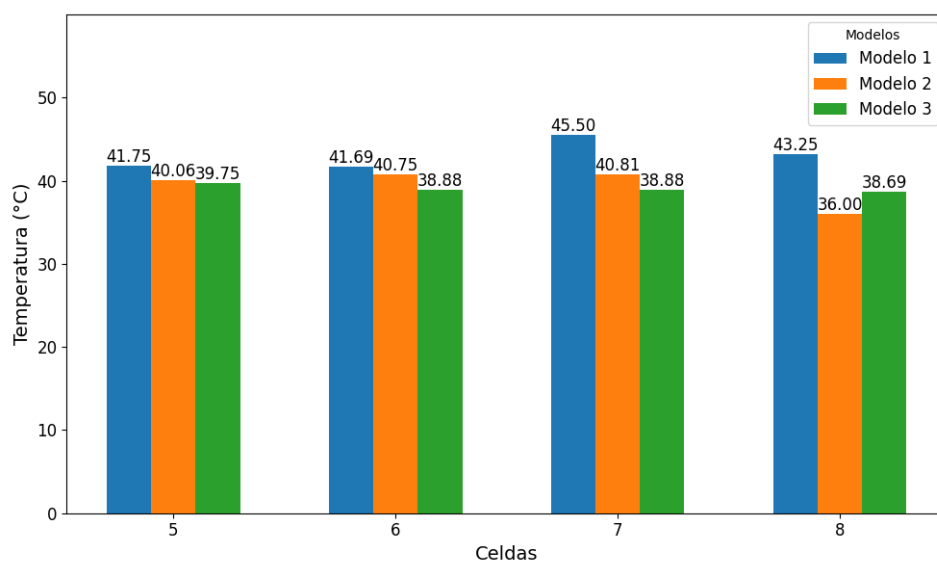


Figura 57. Comparación de temperatura al final del proceso entre los tres modelos celda 5, 6, 7 y 8.

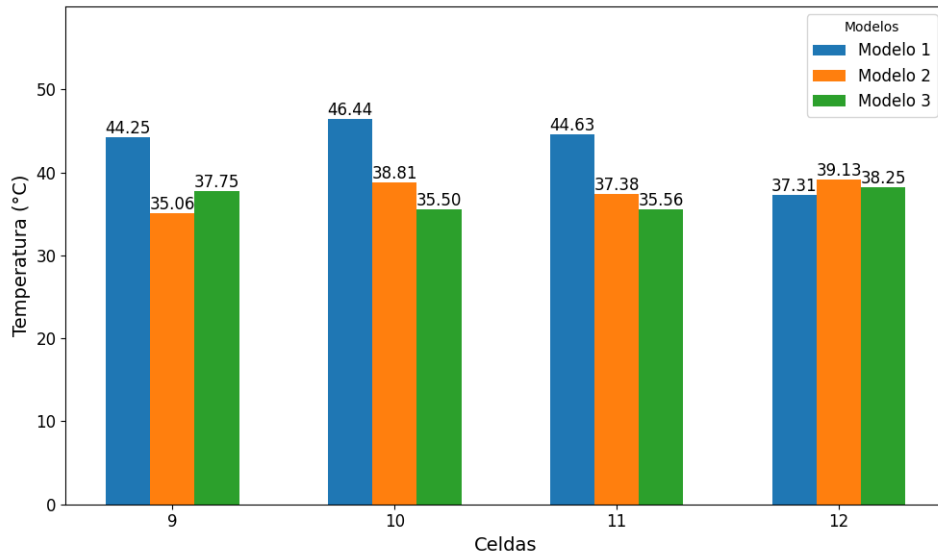


Figura 58. Comparación de temperatura al final del proceso entre los tres modelos celda 9, 10, 11 y 12.

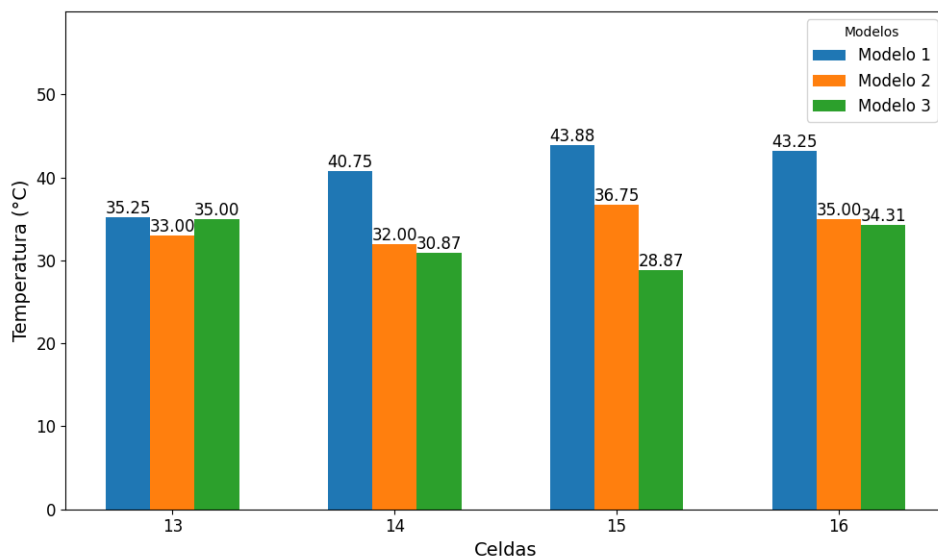


Figura 59. Comparación de temperatura al final del proceso entre los tres modelos celda 13, 14, 15 y 16.

6.5. Resultados generados mediante Ansys

6.5.1. Resultados del diseño 1

En la **Figura 60** se muestra la temperatura máxima registrada por cada celda en el modelo 1 bajo condiciones de convección natural. Esta configuración se caracteriza por una transferencia de calor pasiva y limitada, la cual depende del movimiento del aire inducido. Se observa que se alcanzan temperaturas bastante elevadas y similares en intervalos cortos de tiempo, se puede decir que la transferencia de calor es uniforme. Por consiguiente, la convección natural resulta insuficiente para mantener una temperatura

adecuada en las Baterías de Ion-Litio (BIL).

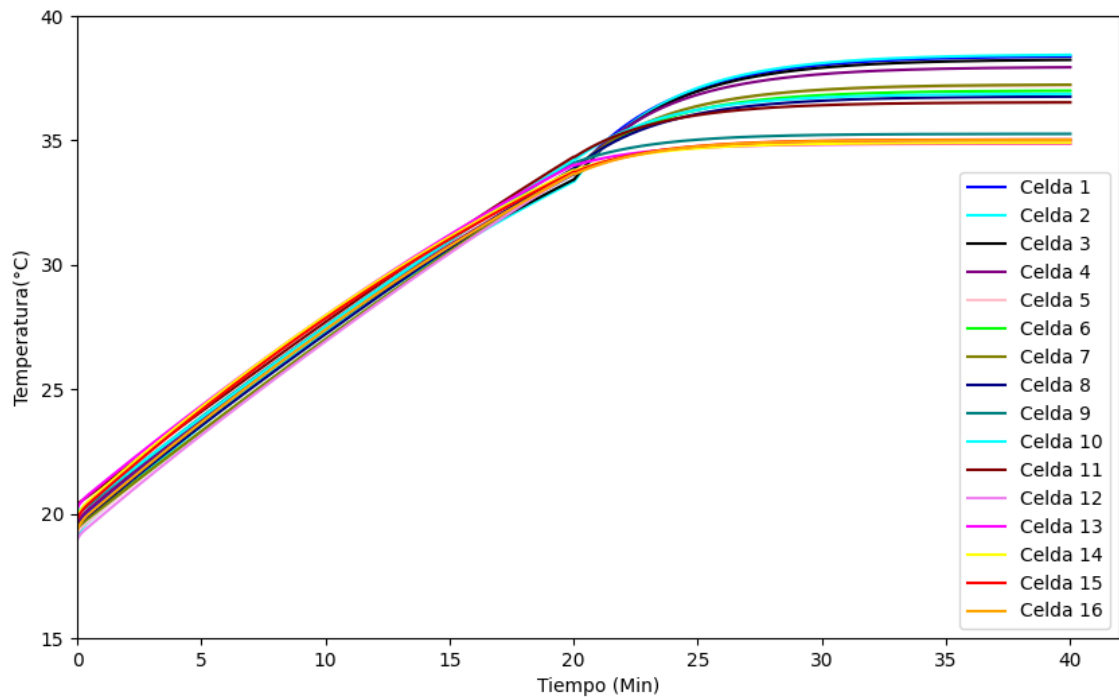


Figura 60. Simulación del proceso de convección natural y forzada para el diseño 1.

En la **Figura 61** se exhibe las temperaturas de todas las celdas del diseño 1. En este caso se logra apreciar de forma detallada la temperatura de cada celda al final del proceso, destacando la celda 13, 14, 15 y 16 con menor temperatura con valor de 36,86 °C, 34,89 °C, 35,03 °C Y 35,01 °C respectivamente.

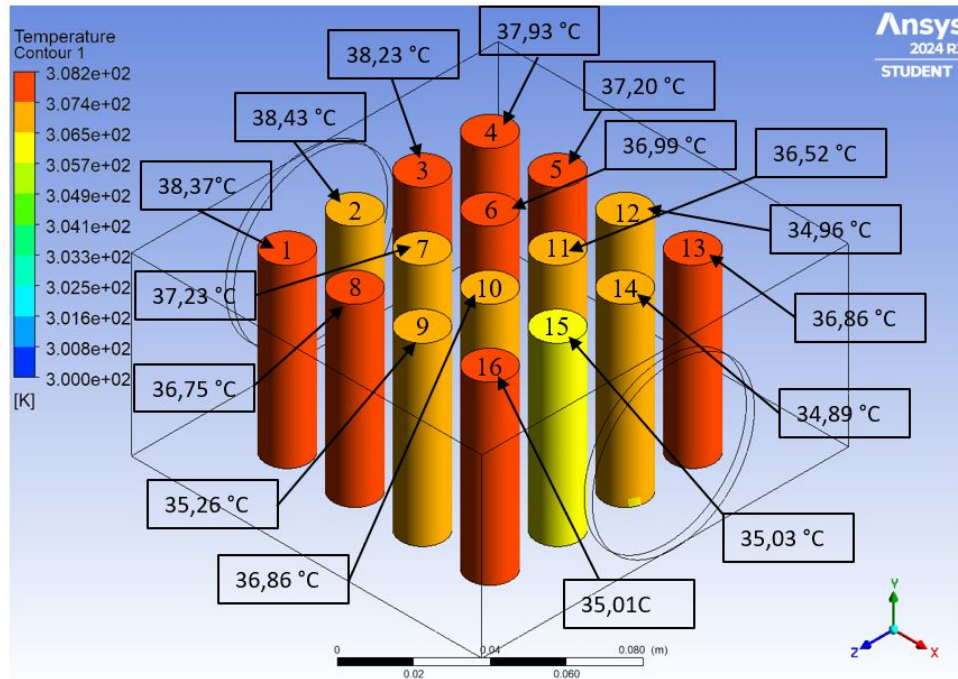


Figura 61. Simulación del diseño 1 con espaciamiento entre celdas de 25 mm, temperatura al final del proceso.

En la **Figura 62, 63, 64 y 65** se exhibe el comportamiento transitorio de todas las celdas del diseño 1. Se destacan las temperaturas más elevadas en las celdas 9, 10, 11 y 12 en condiciones de convección natural, respectivamente. Las restantes celdas se muestran en tonos grises para evitar superposiciones, lo que facilita la observación de las curvas correspondientes a las temperaturas más altas.

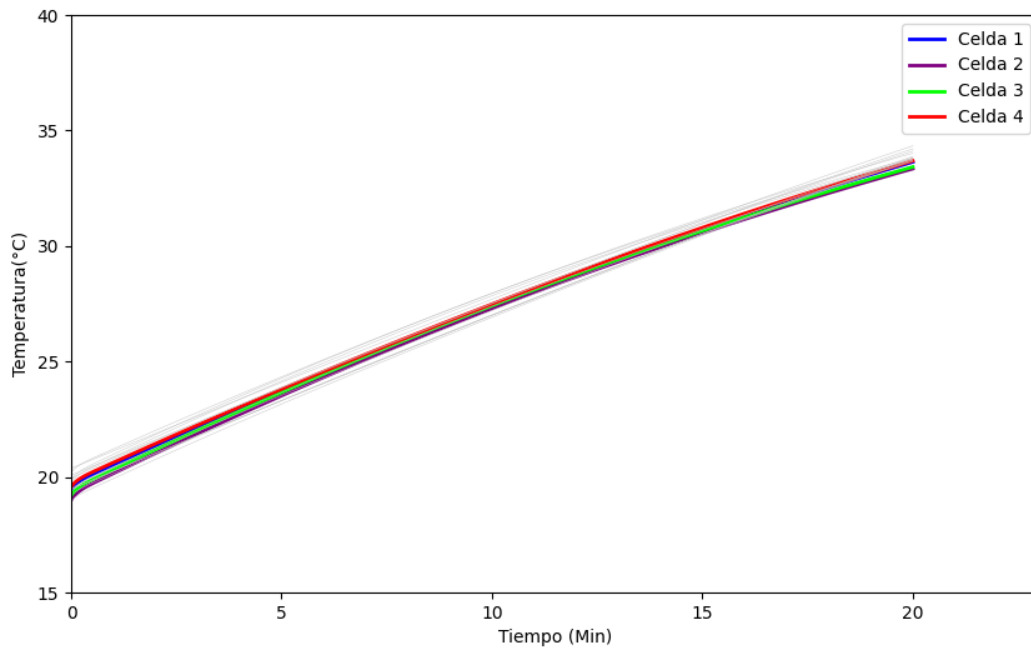


Figura 62. Simulación del diseño 1 con espaciamiento entre celdas de 25 mm, convección natural de las celdas 1, 2, 3, 4.

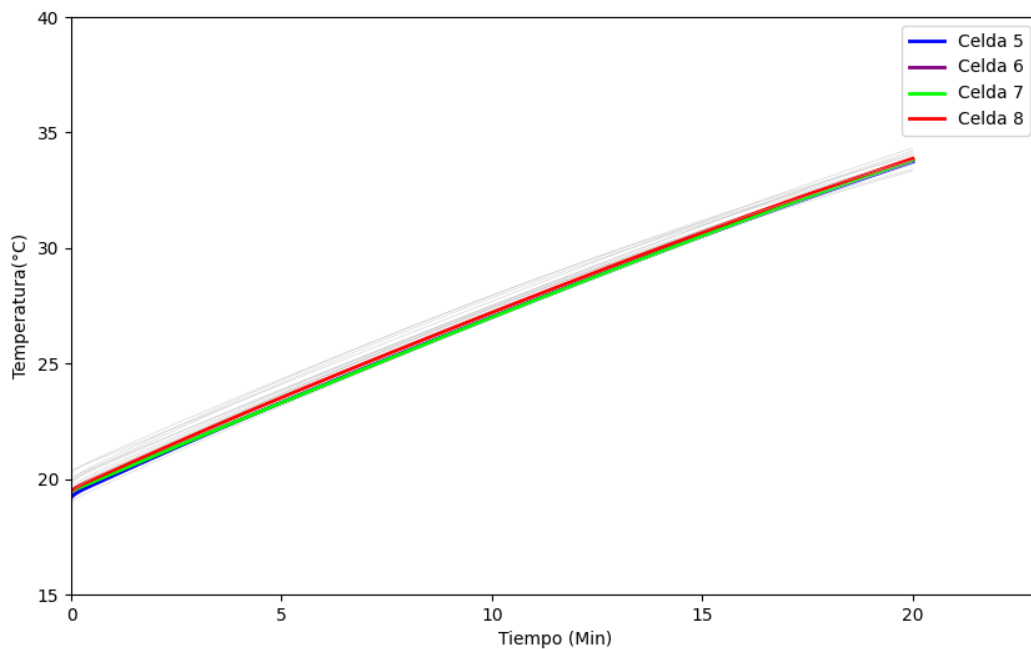


Figura 63. Simulación del diseño 1 con espaciamiento entre celdas de 25 mm, convección natural de las celdas 5, 6, 7, 8.

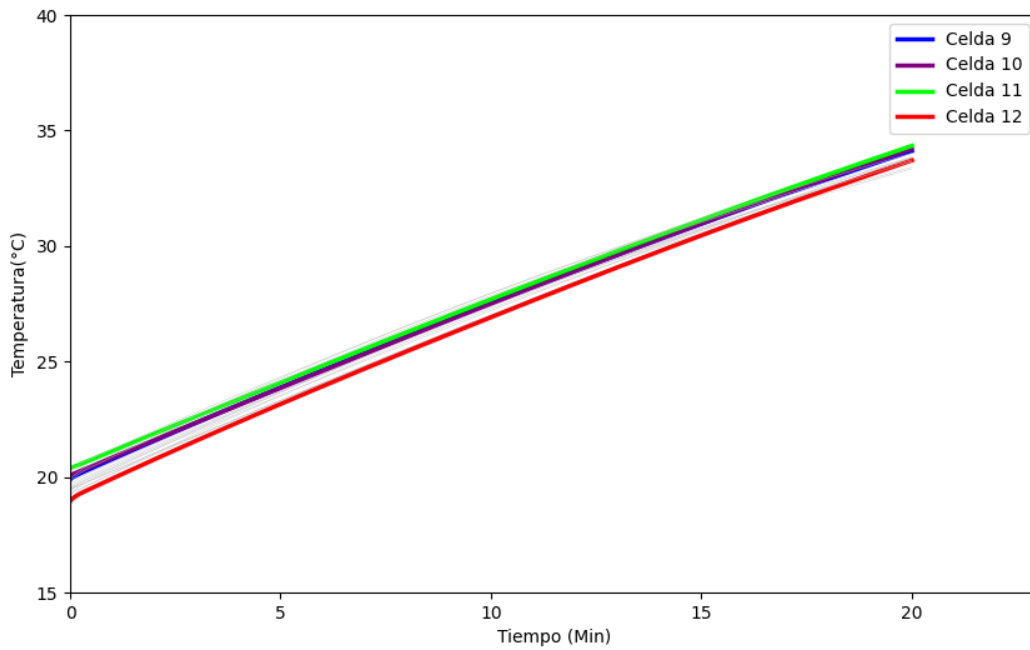


Figura 64. Simulación del diseño 1 con espaciamiento entre celdas de 25 mm, convección natural de las celdas 9, 10, 11, 12.

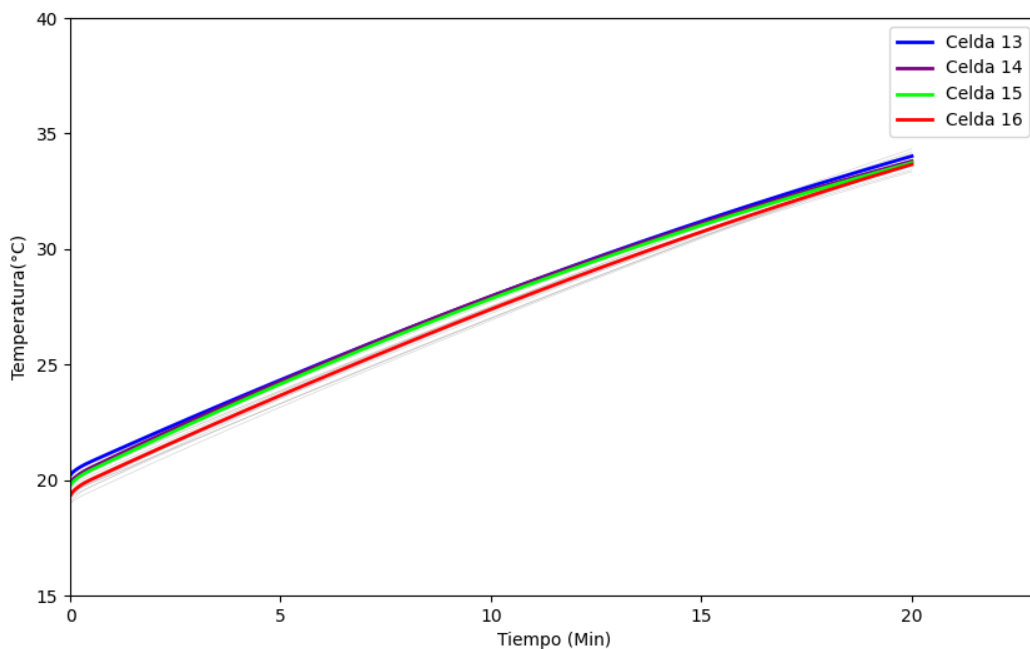
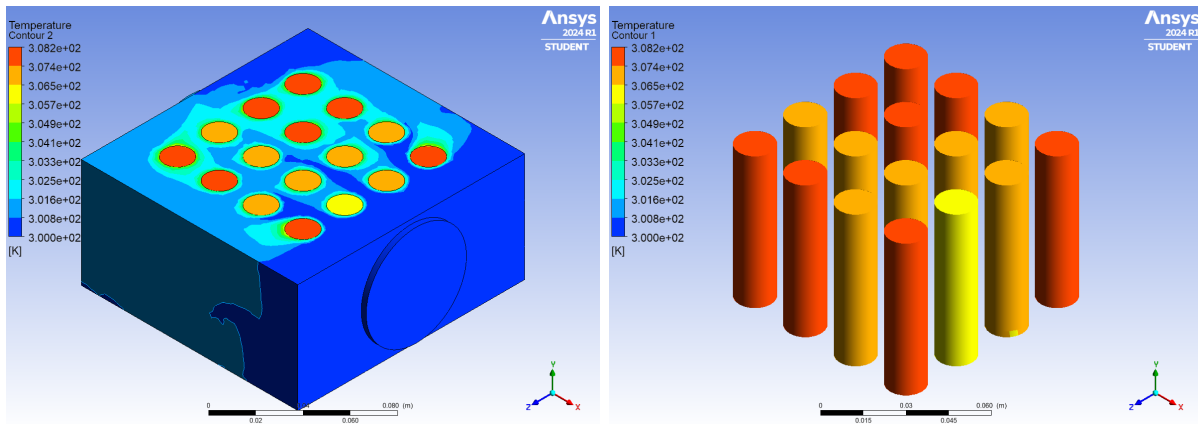


Figura 65. Simulación del diseño 1 con espaciamiento entre celdas de 25 mm, convección natural de las celdas 13, 14, 15, 16.

En la **Figura 66** presenta la distribución térmica completa del módulo al finalizar

la simulación en Ansys Fluent. Se puede observar que la temperatura varía acorde a las posiciones que se encuentran. Es especialmente notable que las celdas situadas a los extremos muestran temperaturas más altas, así como se observan en la figura.



(a) Distribución de temperatura al concluir la descarga en el diseño 1.

(b) Distribución de Temperatura al finalizar la descarga. Enfoque exclusivo en las baterías.

Figura 66. Resultados de simulación numérica del diseño 1 con espaciamiento entre celdas de 25 mm.

6.5.2. Resultados del diseño 2

En la **Figura 67** se presentan las temperaturas en un proceso de convección natural, utilizando el mismo método que en el diseño anterior. Cada curva representa una celda con las temperaturas medidas durante un intervalo de tiempo de 60 minutos. Se observa que las temperaturas alcanzadas son superiores a las del diseño 1. Además, en el diseño 2, la distancia entre las celdas es de 35 mm, lo que resulta en una menor transferencia de calor en comparación con el diseño anterior debido a la mayor separación entre celdas.

En este diseño las celdas 5, 8, 9 y 12 alcanzan mayor temperatura a comparación con las demás celdas, las temperaturas de estos valores son de 40.12 °C, 40.15 °C, 40.10 °C y 40.14 °C respectivamente.

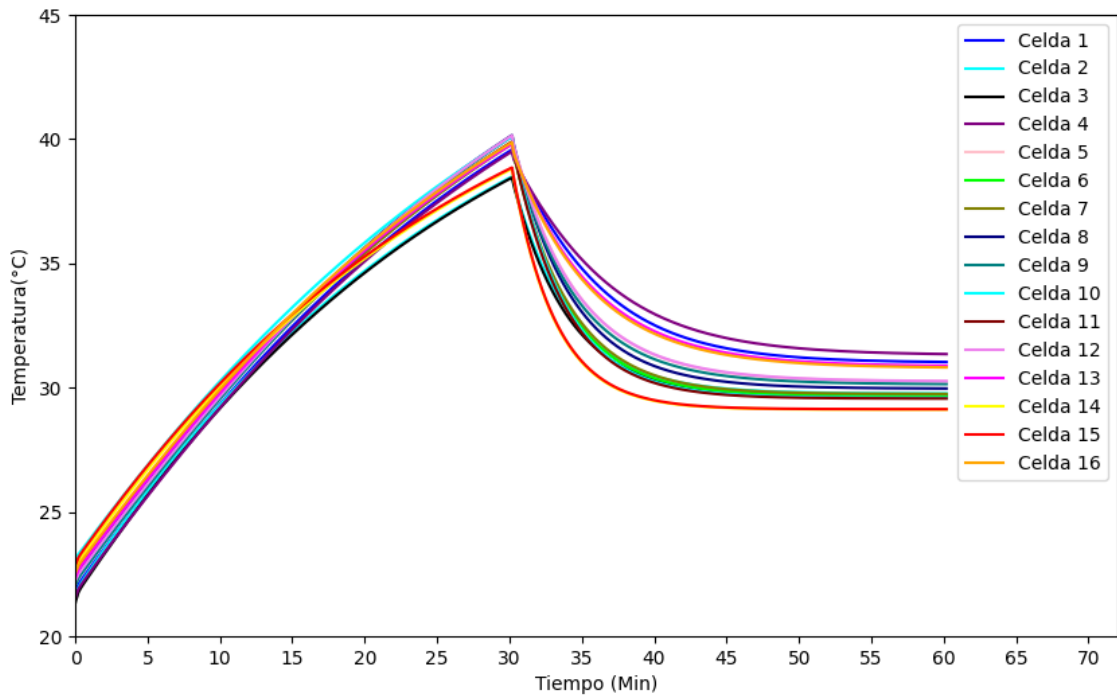


Figura 67. Simulación del proceso de convección natural y forzada para el diseño 2.

Aplicando la convección forzada, se obtienen las temperaturas presentadas en la **Figura 68**. En este modelo, al igual que en el diseño anterior, se utiliza una corriente de aire de 3,1 m/s, logrando una reducción de temperatura bastante significativa. Las celdas con las temperaturas más bajas corresponden a las celdas 2, 3, 14 y 15, con valores de 29,76 °C, 29,67 °C, 29,12 °C y 29,13 °C, respectivamente. Por otro lado, las celdas con las temperaturas más altas al finalizar el proceso son las celdas 1, 4, 13 y 16, con valores de 31,03 °C, 31,35 °C, 30,88 °C y 30.81 °C, respectivamente. Las demás celdas se mantienen en un rango de temperatura de 29 °C a 31 °C.

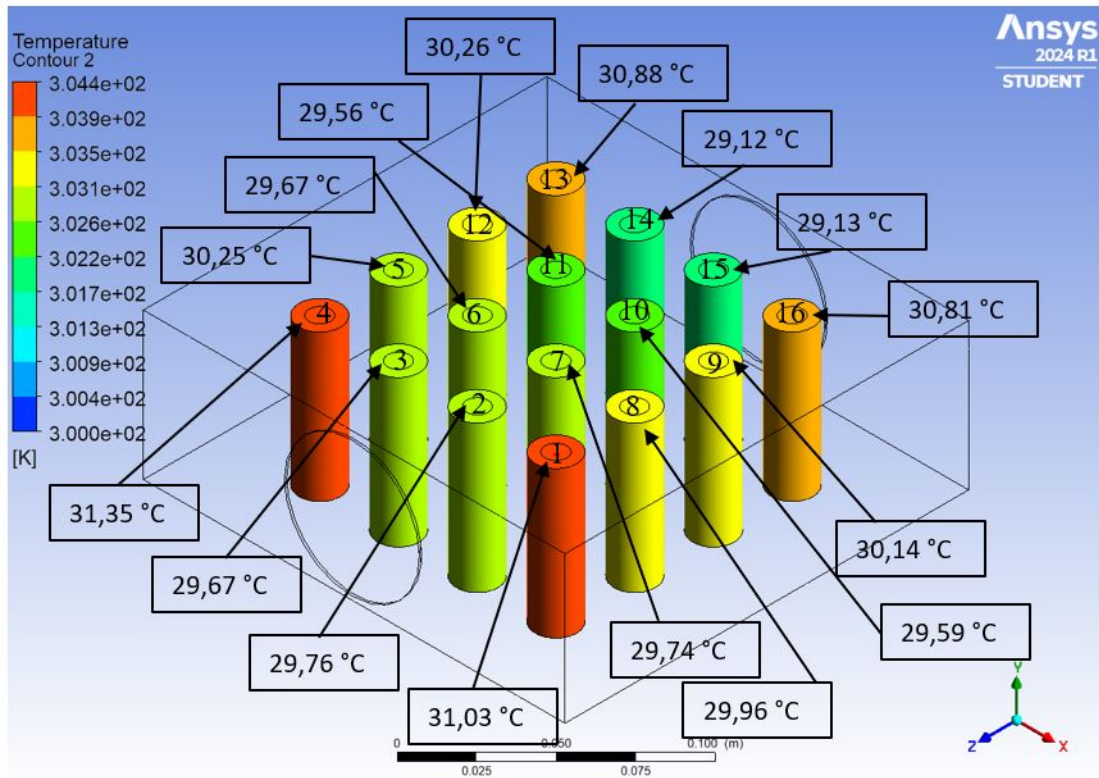


Figura 68. Simulación del diseño 2 con espaciamento entre celdas de 35 mm, proceso de convección forzada.

En este diseño las celdas 5, 8, 9 y 12 alcanzan mayor temperatura en comparación con las demás celdas en un proceso de convección natural, las temperaturas de estos valores son de 40,12 °C, 40,15 °C, 40,10 °C y 40,14 °C respectivamente, esto se puede observar en las **Figuras 69, 70, 71 y 72.**

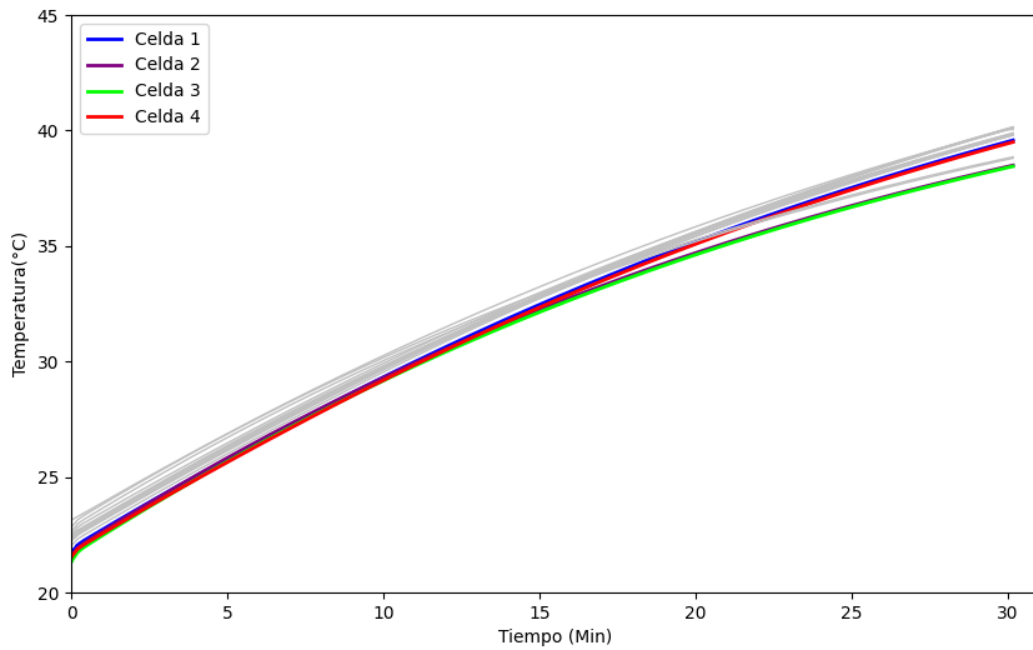


Figura 69. Simulación del diseño 2 con espaciamiento entre celdas de 35 mm, proceso de convección natural celdas 1, 2, 3 y 4.

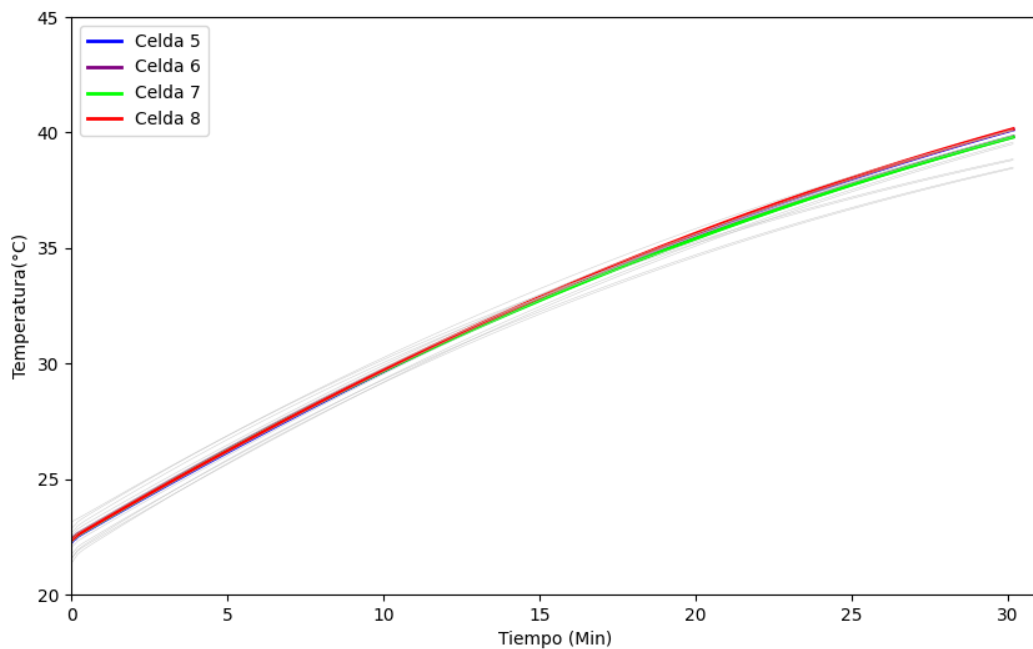


Figura 70. Simulación del diseño 2 con espaciamiento entre celdas de 35 mm, proceso de convección natural celdas 5, 6, 7 y 8.

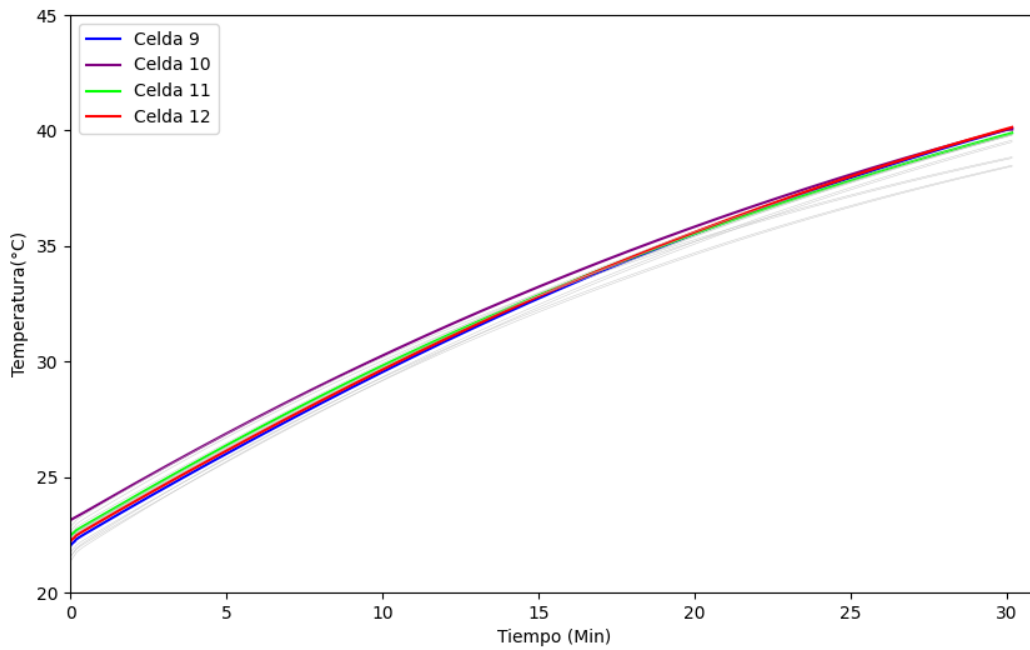


Figura 71. Simulación del diseño 2 con espaciamiento entre celdas de 35 mm, proceso de convección natural celdas 9, 10, 11 y 12.

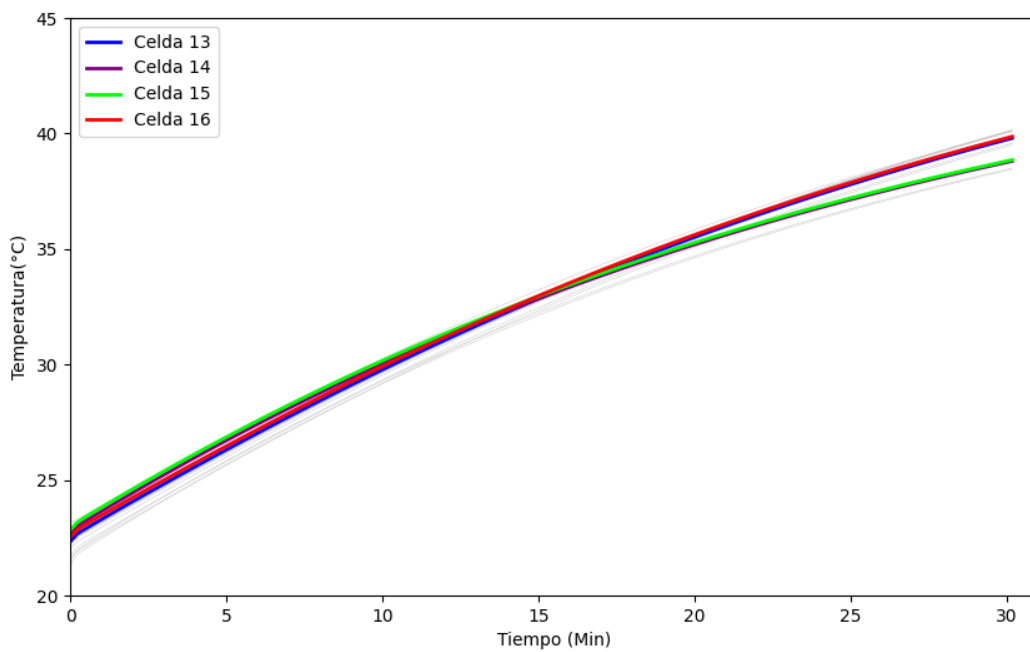
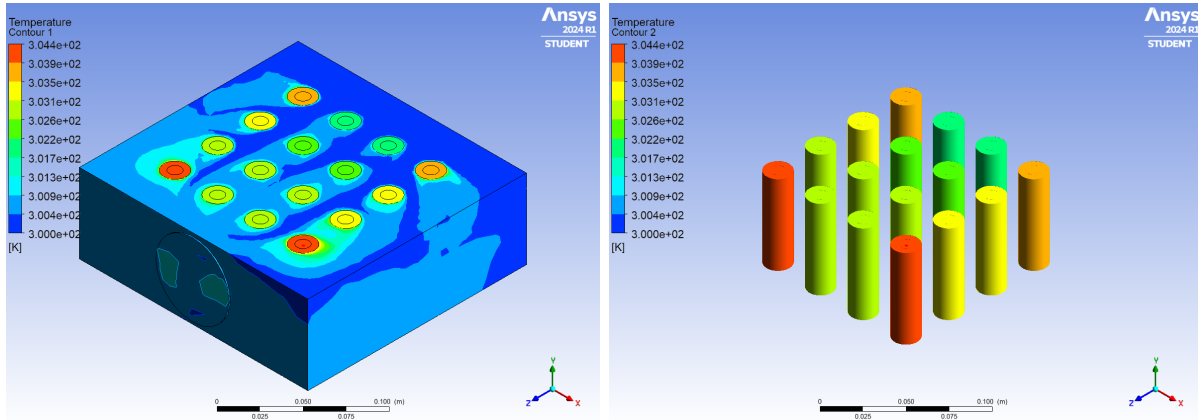


Figura 72. Simulación del diseño 2 con espaciamiento entre celdas de 35 mm, proceso convección natural celdas 13, 14, 15 y 16.

En la **Figura 73** se presenta la distribución térmica del módulo al finalizar la

simulación en Ansys Fluent. Se observa que la temperatura varía en función a la separación entre celdas. Es notable que las celdas ubicadas en los extremos muestran temperaturas más elevadas. Además, en este modelo la distancia entre celdas es de 35 mm, por lo tanto, se logra observar una disminución de temperatura en diversas celdas en comparación con el modelo 1.



(a) Distribución de temperatura al concluir la descarga en el diseño 2

(b) Distribución de Temperatura al finalizar la descarga. Enfoque exclusivo en las baterías

Figura 73. Resultados de simulación numérica del diseño 2 con espaciamiento entre celdas de 35 mm.

6.5.3. Resultados del diseño 3

En la **Figura 74** se presentan las temperaturas en un proceso de convección natural y forzada, utilizando el mismo método que los dos diseños anteriores. Cada curva representa una celda, con las temperaturas medidas durante un intervalo de tiempo de 60 minutos. Se observa que las temperaturas alcanzadas son superiores a las del diseño 1 y 2. Además, en este diseño, la distancia entre las celdas es de 45 mm.

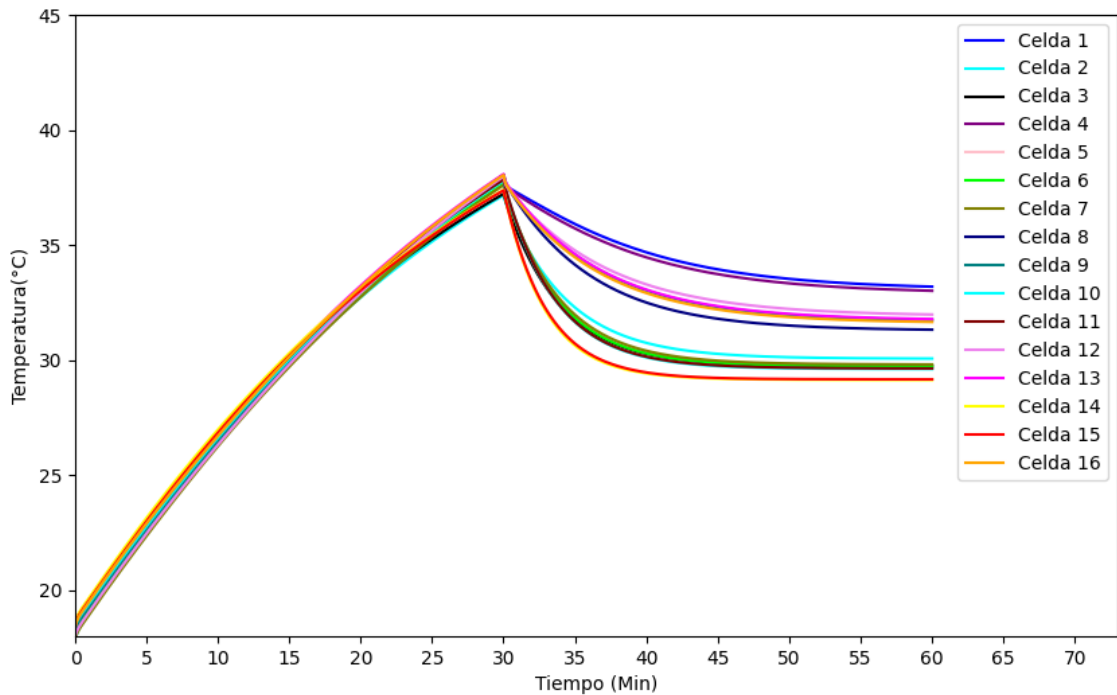


Figura 74. Simulación del proceso de convección natural y forzada para el diseño 3.

Aplicando la convección forzada, se obtienen las temperaturas presentadas en las subfiguras de la **Figura 75**. En este modelo, al igual que en el diseño anterior, se utiliza una corriente de aire de 3,1 m/s, logrando una reducción de temperatura bastante significativa. Las celdas con las temperaturas más bajas corresponden a las celdas 10, 11, 14 y 15, con valores de 29,61 °C, 29,63 °C, 29,13 °C y 29,16 °C, respectivamente. Por otro lado, las celdas con las temperaturas más altas al finalizar el proceso son las celdas 1, 4, 9, 12 y 13, con valores de 33,18 °C, 33,00 °C, 31,74 °C, 31,74 °C y 31,78°C, respectivamente. Las demás celdas se mantienen en un rango de temperatura de 29 °C a 33 °C.

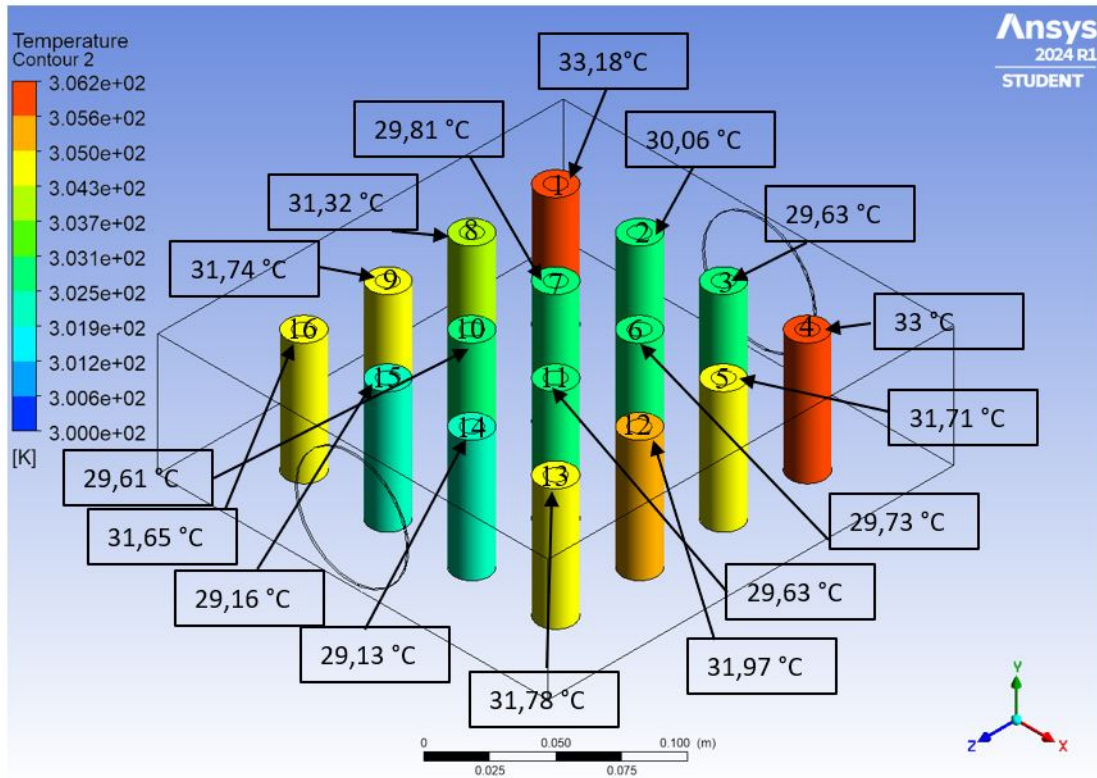


Figura 75. Simulación del diseño 3 con espaciamento entre celdas de 45 mm, proceso de convección forzada.

En este diseño las celdas 5, 8, 9 y 13 alcanzan mayor temperatura a comparación con las demás celdas en el proceso de convección natural, las temperaturas de estos valores son de 38,06 °C, 38,04 °C, 38,05 °C y 38,07 °C respectivamente, esto se puede observar en las **Figuras 76, 77, 78 y 79.**

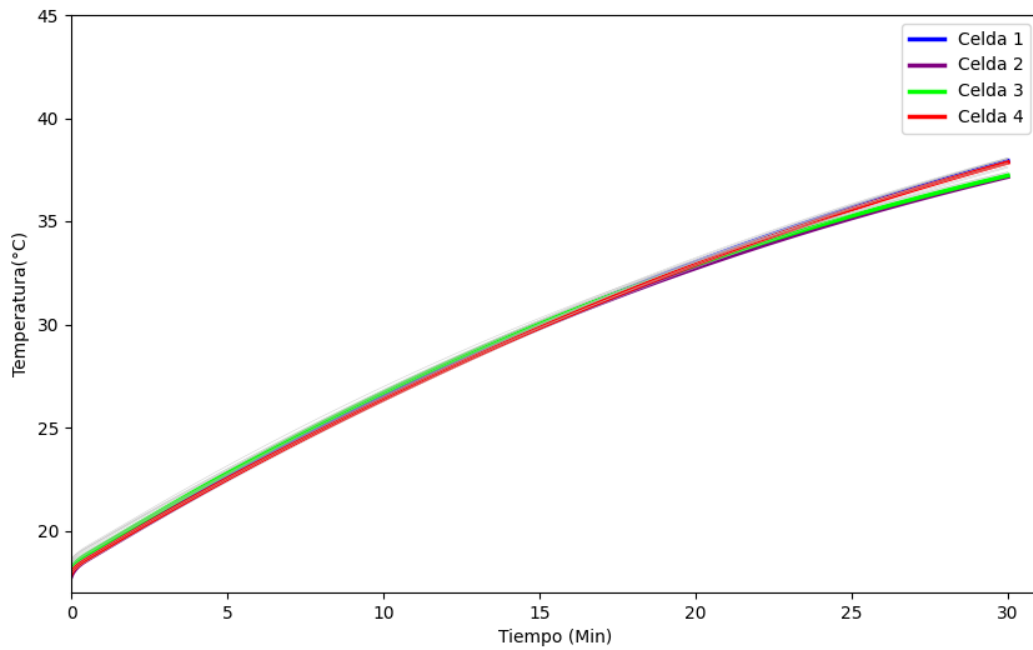


Figura 76. Simulación del diseño 3 con espaciamiento entre celdas de 45 mm, proceso de convección natural celdas 1, 2, 3 y 4.

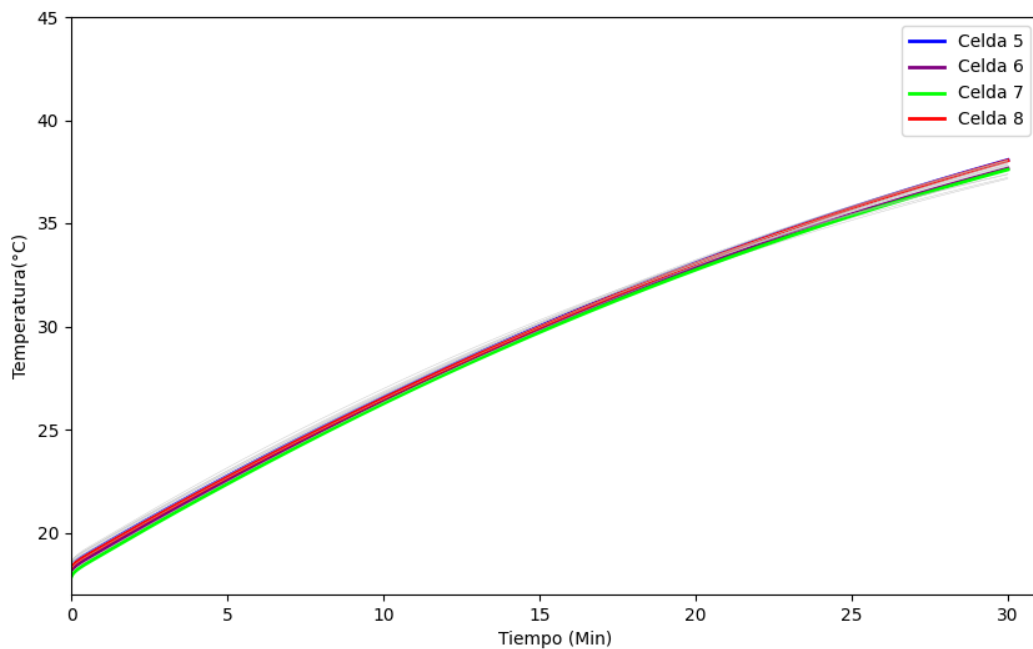


Figura 77. Simulación del diseño 3 con espaciamiento entre celdas de 45 mm, proceso de convección natural celdas 5, 6, 7 y 8.

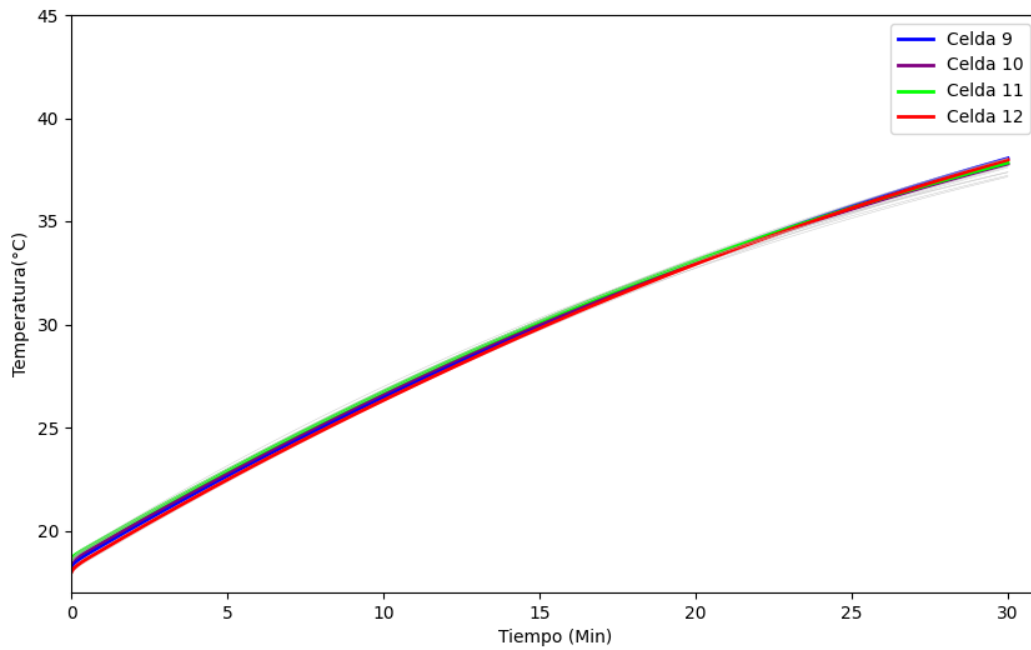


Figura 78. Simulación del diseño 3 con espaciamiento entre celdas de 45 mm, proceso de convección natural celdas 9, 10, 11 y 12.

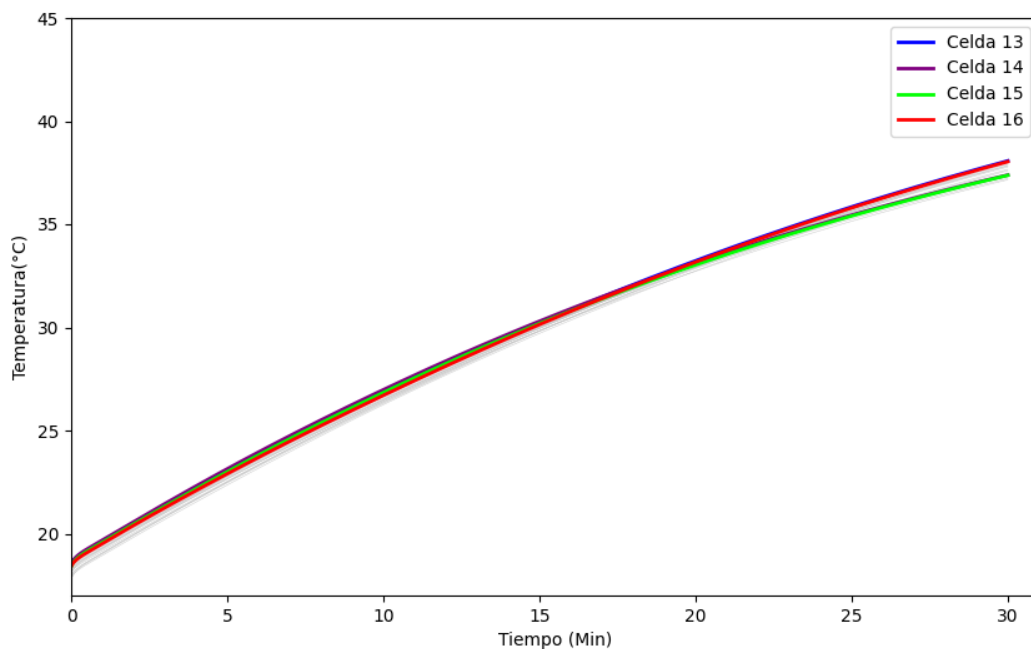
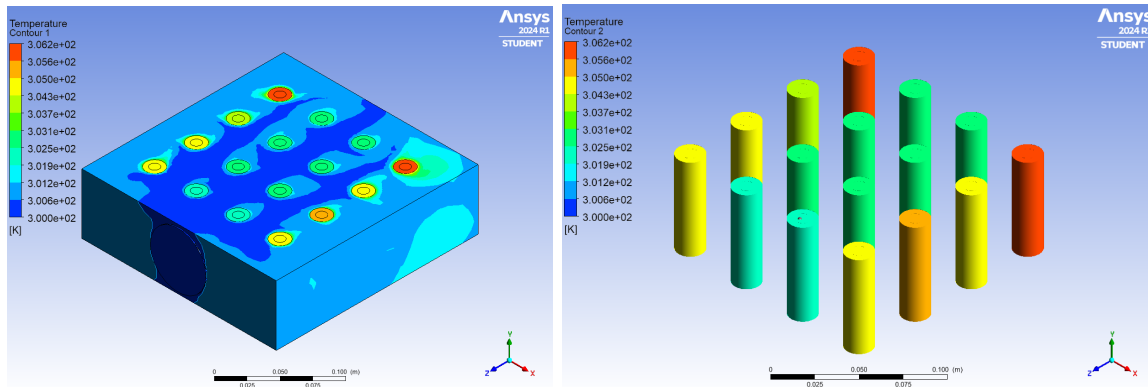


Figura 79. Simulación del diseño 3 con espaciamiento entre celdas de 45 mm, proceso de convección natural celdas 13, 14, 15 y 16.

En la **Figura 58** se presenta la distribución térmica completa del módulo al fina-

lizar la simulación en Ansys Fluent. Se puede observar que la temperatura de las celdas varía dependiendo de su ubicación. Es especialmente notable que las celdas situadas a los extremos muestran temperaturas más altas.



(a) Distribución de temperatura al concluir la descarga en el diseño 3 (b) Distribución de Temperatura al finalizar la descarga. Enfoque exclusivo en las baterías

Figura 80. Resultados de simulación numérica del diseño 3 con espaciamiento entre celdas de 45 mm.

6.5.4. Resultados generales de los tres diseños en simulación y experimentales

Las Figuras 81, 82 y 83 ilustran la temperatura al final del proceso para los tres diseños tanto para las simulaciones como para los experimentales. Cada barra representa una celda con su respectivo diseño de simulación y experimento que se basa en la separación entre celdas. En estos gráficos, los datos se distribuyen a lo largo de 16 celdas, proporcionando una representación visual de cómo varían las temperaturas en función de la posición de la celda en cada diseño. Estas figuras permiten determinar cuál diseño presenta el mejor rendimiento, como se observa en las figuras correspondientes a cada diseño, el diseño 3 demuestra consistentemente el mejor desempeño térmico. En el diseño 3, la temperatura máxima alcanzada corresponde a la celda 1, con 33,19 °C en la simulación y 40,81 °C en el experimento. Esto puede deberse a que dicha celda se encuentra en una esquina dentro del banco, lo que dificulta que el flujo de aire llegue de forma directa.

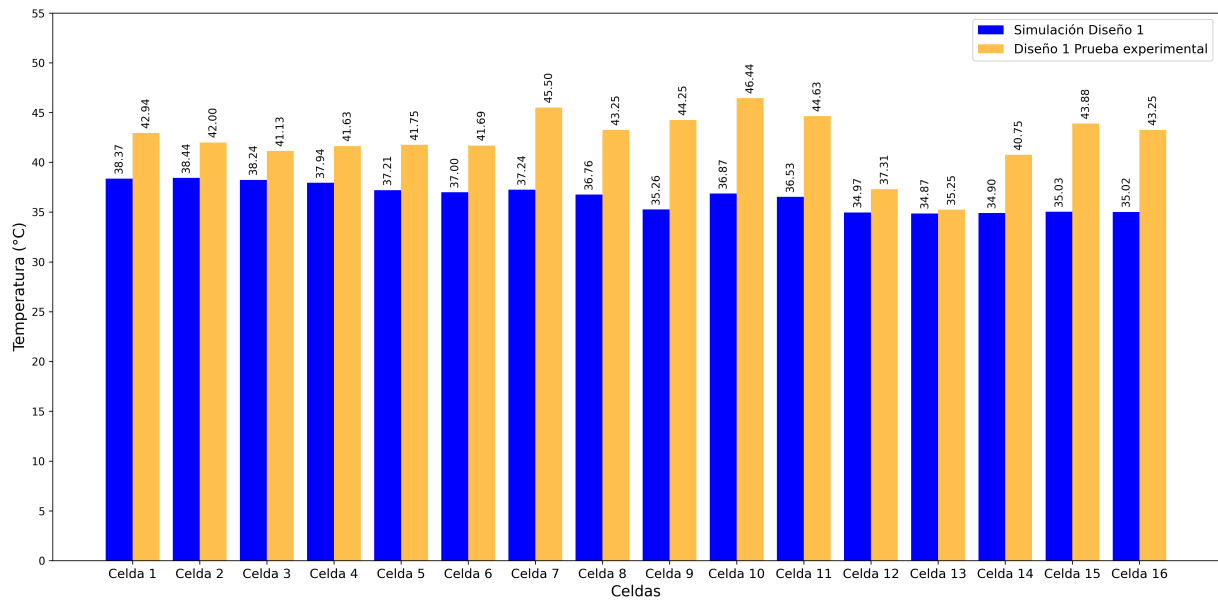


Figura 81. Comparación entre prueba experimental y simulación en convección forzada para el diseño 1.

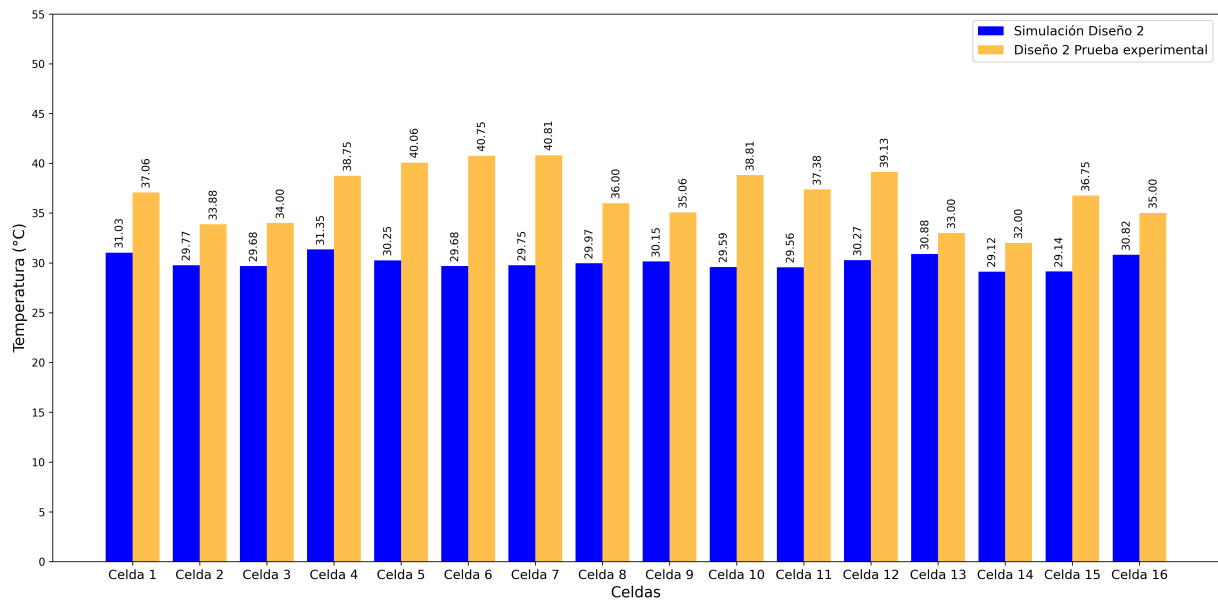


Figura 82. Comparación entre prueba experimental y simulación en convección forzada para el diseño 2.

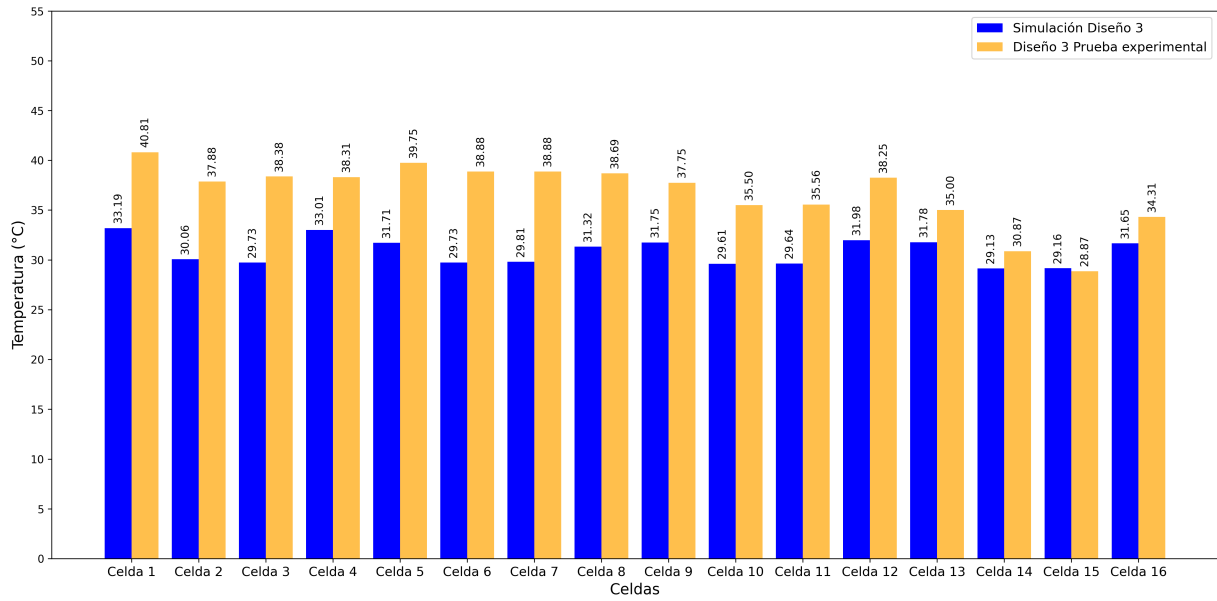


Figura 83. Comparación entre prueba experimental y simulación en convección forzada para el diseño 3.

Las **Figuras 84, 85 y 86** ilustra La temperatura máxima de los tres diseños en un proceso de convección natural. Cada barra representa un modelo con su respectivo diseño, el cual se basa en la separación entre celdas. En este gráfico, los datos se distribuyen a lo largo de 16 celdas, proporcionando una representación visual de cómo varían las temperaturas en función de la posición de la celda en cada diseño. Estas figuras permiten determinar la diferencia que existe entre un proceso experimental y un proceso de simulación. Se logró observar que la diferencia de temperatura entre el proceso de simulación y el experimental es baja, lo que demuestra que los cálculos realizados en la fase de definición de los parámetros de operación son aceptables.

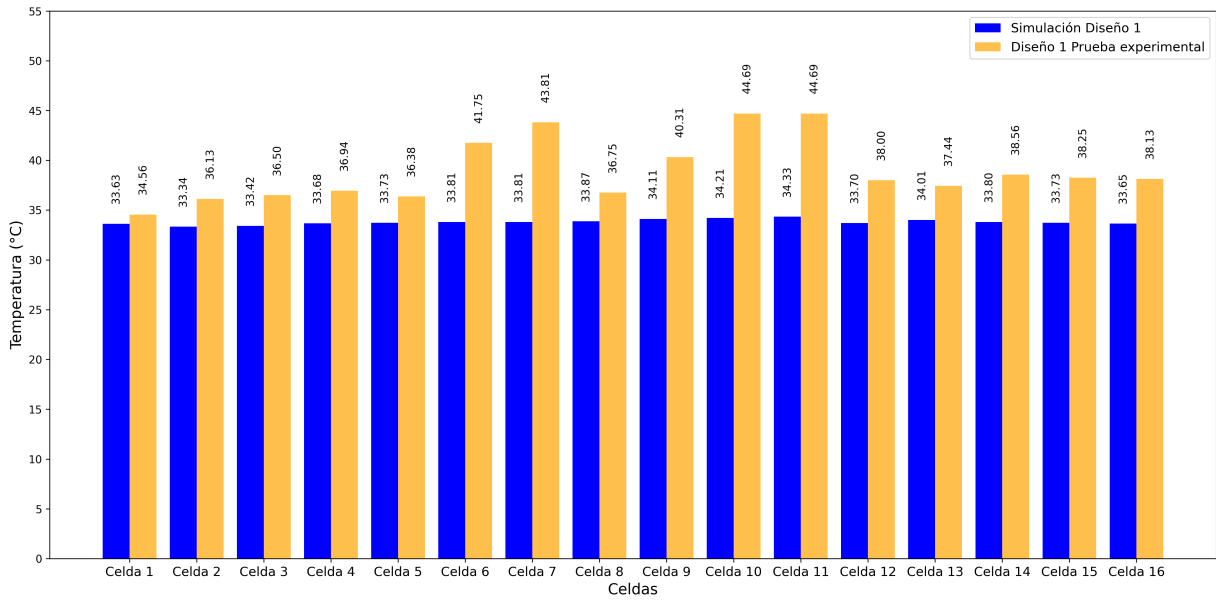


Figura 84. Comparación entre prueba experimental y simulación en convección natural para el diseño 1.

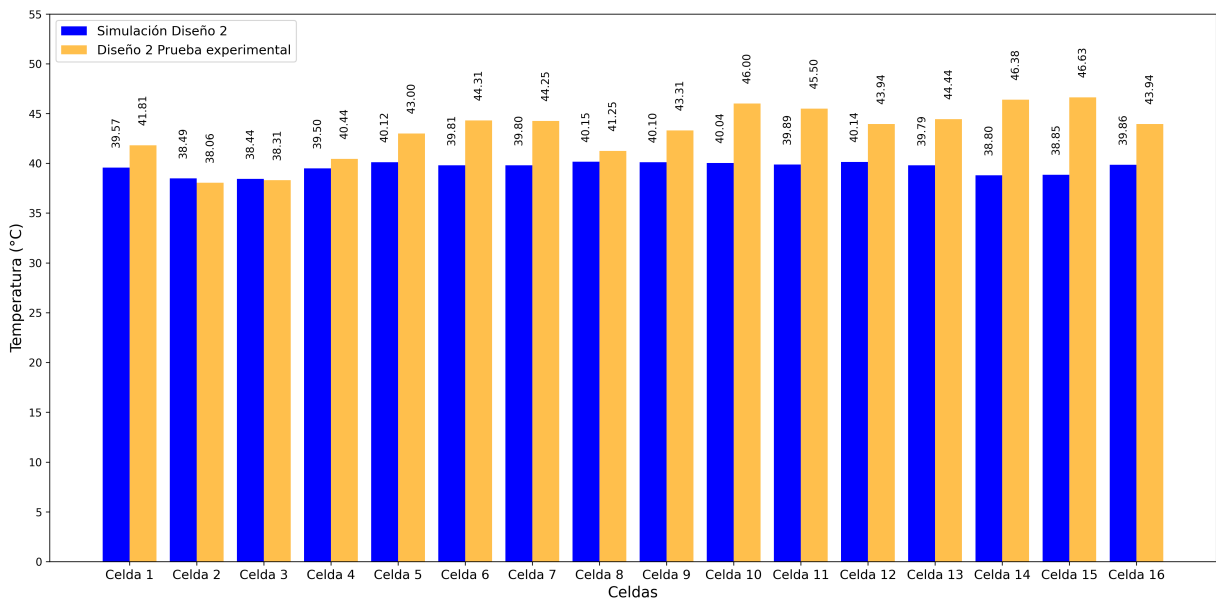


Figura 85. Comparación entre prueba experimental y simulación en convección natural para el diseño 2.

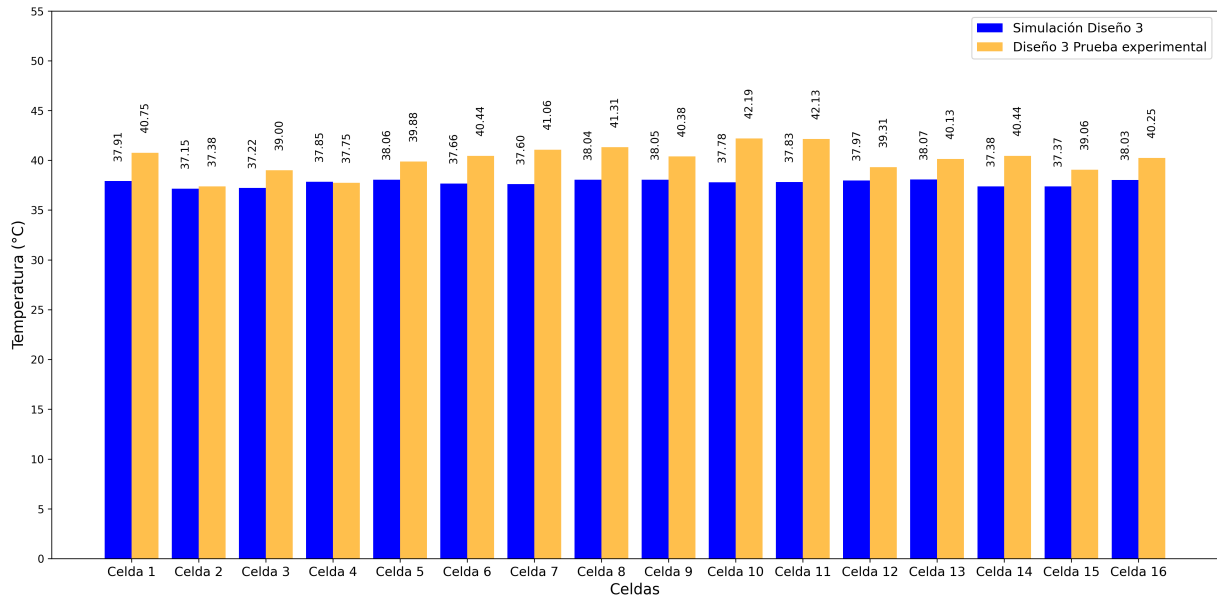


Figura 86. Comparación entre prueba experimental y simulación en convección natural para el diseño 3.

6.6. Error entre los resultados experimentales y los generados mediante simulación

En las gráficas presentadas previamente se evidencia una disparidad al comparar los resultados obtenidos experimentalmente con los valores simulados de temperatura. Dicha disparidad subraya la importancia de calcular el error RMSE para cuantificar la discrepancia entre ambos conjuntos de datos, estos errores se calculan por medio de la **Ecuación 13**, los errores calculados se encuentran detalladamente registrados en las celdas de la **Tabla 14**.

Tabla 14. Error RMSE entre resultados experimentales y resultados generados mediante simulación.

Celdas	Modelo 1 (°C)	Modelo 2 (°C)	Modelo 3 (°C)
Celda 1	6,51	6,80	8,49
Celda 2	7,20	6,99	7,93
Celda 3	6,78	7,68	7,63
Celda 4	6,86	8,12	9,20
Celda 5	7,66	7,37	9,43
Celda 6	8,40	7,58	6,61
Celda 7	6,56	6,47	6,25
Celda 8	7,68	8,39	8
Celda 9	6,34	7,86	8,27
Celda 10	5,73	5,57	5,96
Celda 11	5	5,70	5,11
Celda 12	7,70	6,89	8,52
Celda 13	7,17	8,07	8,17
Celda 14	5,37	5,15	6,16
Celda 15	6,39	4,67	6,47
Celda 16	5,49	7,35	7,79

7. Discusión

En el presente trabajo se realizó un banco de pruebas que permitió analizar la incidencia de la separación de las celdas con la temperatura máxima agregada, asimismo se analizó tres diseños diferentes con espaciamentos entre celdas de 25 mm, 35 mm y 45 mm respectivamente, mostraron patrones térmicos distintos tanto en condiciones de convección natural como forzada. Por ende, estos hallazgos resaltan la importancia de la configuración geométrica en el rendimiento térmico de los módulos de baterías, lo cual concuerda con las observaciones de Wang et al. (2016), quienes enfatizaron que la disposición espacial de las celdas influye significativamente en la disipación de calor y la uniformidad térmica.

En el diseño 1 (25 mm de separación), se observó una distribución térmica más uniforme pero con temperaturas generalmente más altas. Esto puede atribuirse a una mayor interacción térmica entre las celdas debido a su proximidad. Por otro lado, los diseños 2 y 3 mostraron variaciones térmicas más pronunciadas pero con temperaturas máximas más bajas en algunas celdas. Estos resultados se alinean con los hallazgos de Zhao et al. (2015), quienes demostraron que un mayor espaciamento entre celdas puede mejorar la circulación de aire y la disipación de calor, pero también puede llevar a una mayor heterogeneidad térmica en el módulo.

La introducción de convección forzada mediante una corriente de aire a 3.1 m/s demostró ser efectiva en la reducción de temperaturas en todos los diseños, este enfoque logró mantener las temperaturas de las celdas dentro del rango operativo óptimo de 20 °C a 45 °C sugerido por Pesaran et al. (2013) para maximizar el rendimiento y la vida útil de las baterías de iones de litio.

El diseño 3 exhibió el mejor rendimiento en términos de enfriamiento, la convección forzada redujo las temperaturas de las celdas de un rango de 40 ± 5 °C a 30 - 40 °C en 30 minutos. El diseño 2 mostró una reducción similar llevando las temperaturas a un rango de 32 - 41 °C en 30 minutos. El diseño 1, con temperaturas finales en el rango de 35 - 45 °C después de 20 minutos de enfriamiento forzado. Estos resultados subrayan la eficacia del enfriamiento por aire forzado respaldando las conclusiones de Saw et al. (2016), quienes demostraron que la convección forzada puede mejorar significativamente la uniformidad térmica y prevenir el sobrecalentamiento en módulos de baterías.

La presencia de estas variaciones térmicas dentro del módulo es un aspecto a considerar en el diseño de sistemas de gestión térmica para baterías. Como señalan Panchal et al. (2018), las variaciones de temperatura dentro de un módulo de baterías pueden llevar a un envejecimiento no uniforme y a una reducción en la capacidad y vida útil del

sistema. Por lo tanto, las estrategias de enfriamiento deben apuntar no solo a reducir la temperatura promedio, sino también, a minimizar las diferencias de temperatura entre celdas.

La comparación entre los resultados experimentales y las simulaciones en Ansys Fluent reveló una concordancia general en los patrones térmicos observados en los tres diseños. Sin embargo, se notaron discrepancias, lo cual subraya la complejidad de modelar con precisión los fenómenos térmicos en sistemas de baterías; estas diferencias pueden atribuirse a varios factores como las simplificaciones inherentes a los modelos de simulación, las incertidumbres en las propiedades de los materiales y las condiciones de contorno. Como señalan Bahiraei et al. (2017), la validación de modelos térmicos para sistemas de baterías es un desafío continuo debido a la naturaleza multifísica y multiescala de los procesos involucrados.

Los resultados demuestran la viabilidad del enfriamiento por aire como estrategia para el control térmico de módulos de baterías de iones de litio, es por eso que, la capacidad de mantener las temperaturas de las celdas dentro del rango operativo óptimo mediante convección forzada respalda las conclusiones de Liu et al. (2017), quienes argumentaron que los sistemas de enfriamiento por aire pueden ser suficientes para muchas aplicaciones de baterías de iones de litio, ofreciendo una solución simple y económica en comparación con sistemas de enfriamiento líquido más complejos.

Sin embargo, es importante notar que la efectividad del enfriamiento por aire puede disminuir en condiciones de alta demanda de potencia o ambientes de alta temperatura. En tal casos, podrían ser necesarias estrategias de enfriamiento híbridas o más avanzadas, como las propuestas por Rao et al. (2020), que combinan enfriamiento por aire con materiales de cambio de fase para un mejor control térmico en condiciones extremas.

La variación de temperatura entre celdas observada en todos los diseños, aunque reducida por la convección forzada, sigue siendo un aspecto crítico a considerar, es por ello que Yang et al. (2018) señalan que incluso pequeñas diferencias de temperatura entre celdas pueden llevar a desequilibrios en el estado de carga y descarga, afectando así el rendimiento y la vida útil del módulo de baterías.

Los resultados sugieren que, aunque el enfriamiento por aire puede ser efectivo para reducir las temperaturas globales, puede ser necesario implementar estrategias adicionales para mejorar la uniformidad térmica. Esto podría incluir la optimización de los patrones de flujo de aire, como proponen Chen et al. (2020), o la incorporación de materiales con alta conductividad térmica en puntos estratégicos del módulo para redistribuir el calor más uniformemente.

Es importante reconocer las limitaciones del presente estudio. El uso de barras de aluminio como sustitutos de las celdas de batería reales simplifica el comportamiento térmico y no captura completamente la complejidad de las reacciones electroquímicas y la generación de calor en baterías reales. Además, las pruebas se realizaron en condiciones controladas que pueden no reflejar completamente los escenarios operativos reales.

Puedo decir que, este estudio proporciona información importante sobre el diseño y la efectividad de sistemas de enfriamiento por aire para módulos de baterías de iones de litio. Los resultados demuestran que la configuración geométrica y las estrategias de enfriamiento tienen un impacto significativo en el rendimiento térmico del sistema, el enfriamiento por aire forzado se muestra como una solución viable para mantener las temperaturas de las celdas dentro de rangos operativos seguros, aunque se deben considerar cuidadosamente los compromisos entre la uniformidad térmica, la compacidad del diseño y la eficiencia de enfriamiento.

Paccha et al. (2024) realizaron experimentos con baterías en condiciones de convección libre y forzada, utilizando velocidades de viento de 1,5 m/s y 2,7 m/s. En comparación con el estudio realizado en donde se utilizó una velocidad de viento ligeramente superior de 3,1 m/s. Este aumento en la velocidad del viento tuvo un impacto significativo en la eficiencia del enfriamiento de las celdas, en donde, en el apartado de resultados se observan los gráficos de temperatura en donde el perfil obtenido concuerdan con los resultados obtenidos en dicha investigación. Por lo tanto, el banco de tubos emula las condiciones de temperatura a las que están expuestas las BIL.

8. Conclusiones

Finalizado el presente trabajo se destacan las siguientes conclusiones:

El estudio logró describir las condiciones físicas de operación de un módulo de baterías de iones de litio. Se identificó que la configuración geométrica particularmente el espaciamiento entre celdas, juega un papel importante en el rendimiento térmico. El diseño con una separación de 45 mm entre celdas que corresponde al diseño 3 demostró el mejor desempeño térmico manteniendo las temperaturas entre 30 y 40 °C bajo convección forzada; esta observación proporciona una guía para el diseño de módulos de baterías, identificando la importancia de optimizar la disposición de las celdas para mejorar la eficiencia del enfriamiento por aire.

Se construyó el prototipo experimental de un banco de tubos para emular el desempeño térmico de un banco de baterías cilíndricas con enfriamiento por aire, este prototipo permitió evaluar tres diferentes configuraciones geométricas proporcionando datos sobre el comportamiento térmico de las celdas establecidas, por otro lado, la implementación un ventilador que genere una corriente de aire produciendo una convección forzada a 3.1 m/s demostró ser efectiva en la reducción de temperaturas manteniendo las celdas dentro del rango operativo óptimo de 25 °C a 45 °C. Esto valida la eficacia del enfriamiento por aire como una estrategia viable para el control térmico en diversas aplicaciones.

La evaluación del desempeño del banco de tubos con generación de calor interna reveló información sobre las condiciones de operación de las baterías, identificando consistentemente puntos calientes en ciertas posiciones dentro de los modelos, particularmente en las celdas ubicadas en los extremos y en el centro. Esta observación resalta la importancia de considerar no solo la reducción de la temperatura promedio, sino también la minimización de las diferencias de temperatura entre celdas en el diseño de sistemas de gestión térmica, para prevenir el envejecimiento no uniforme y la reducción de la capacidad y vida útil del sistema de baterías. La comparación entre los resultados experimentales y las simulaciones en Ansys Fluent demostró una concordancia general en los patrones térmicos. Sin embargo, las discrepancias observadas subrayan la complejidad de modelar con precisión los fenómenos térmicos en sistemas de baterías, destacando la importancia de combinar enfoques experimentales y de simulación para obtener una comprensión más completa y precisa del comportamiento térmico.

9. Recomendaciones

Se recomienda que se realicen estudios adicionales para analizar las condiciones físicas de operación bajo diferentes parámetros, esto incluye evaluar variables como la temperatura ambiente, la distribución de calor dentro del módulo, la influencia de la humedad y las características del flujo de aire en diversas configuraciones geométricas.

Dado que el prototipo experimental ha demostrado ser efectivo en emular el desempeño térmico de un banco de tubos con enfriamiento por aire, se recomienda considerar la construcción de versiones mejoradas de este prototipo, evaluando configuraciones geométricas adicionales y variando otros parámetros operativos, como la velocidad del aire o el tipo de materiales utilizados en las celdas. Además, no se contó con una fuente adecuada para la generación de calor, por lo que sería recomendable que en futuras pruebas se utilice una fuente apropiada. Asimismo, en la parte de generación de calor, se sugiere emplear otro método para calentar los tubos, ya que el uso de niquelas implica una gran cantidad de cableado, lo que podría ser optimizado.

Considerando las diferencias observadas entre los resultados experimentales y las simulaciones, se recomienda trabajar en el refinamiento de los modelos de simulación térmica para baterías de iones de litio, esto podría implicar la incorporación de modelos más detallados de generación de calor que tengan en cuenta las variaciones en las tasas de carga y descarga, la consideración de efectos no lineales en la transferencia de calor y la inclusión de factores como el envejecimiento de las celdas en los modelos, además, se sugiere desarrollar metodologías para la validación cruzada entre experimentos y simulaciones, lo que permitiría una calibración más precisa de los modelos y mejoraría la confiabilidad de las predicciones de simulación para futuros diseños de sistemas de gestión térmica.

Para abordar el problema de los puntos calientes identificados en ciertas posiciones del módulo se recomienda desarrollar estrategias específicas de gestión térmica, esto podría incluir la implementación de materiales de cambio de fase (PCM) en puntos críticos, el diseño de sistemas de enfriamiento direccionados que proporcionen un flujo de aire más intenso en las áreas propensas a sobrecalentamiento o la integración de sensores térmicos y sistemas de control que puedan ajustar dinámicamente el enfriamiento basado en la distribución de temperatura en tiempo real dentro del módulo.

10. Bibliografía

- Bandhauer, T. M., Garimella, S., & Fuller, T. F. (2011). Una revisión crítica de los problemas térmicos en las baterías de iones de litio. *Journal of the Electrochemical Society*, 158(3), R1-R25. <https://doi.org/10.1149/1.3515880>.
- Chen, K., Wang, S., Song, M., & Chen, L. (2020). Un modelo semi-analítico para el análisis térmico de un paquete de baterías de iones de litio enfriado por aire. *Applied Thermal Engineering*, 177, 115525. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115525>.
- Chen, S., Wen, K., Fan, J., Bando, Y., & Golberg, D. (2020). Progreso y perspectivas futuras de los electrolitos de alto voltaje y alta seguridad en baterías avanzadas de litio: De electrolitos líquidos a sólidos. *Journal of Materials Chemistry A*, 8(12), 5728-5745. <https://doi.org/10.1039/C9TA13379B>.
- Choi, J. W., & Aurbach, D. (2020). Promesa y realidad de las baterías post-ión litio con altas densidades de energía. *Nature Reviews Materials*, 1-16. <https://doi.org/10.1038/s41578-020-0237-y>.
- Chu, X., Jiang, Y., Zhang, M., & Li, Z. (2020). Estudio experimental y numérico sobre la transferencia de calor y el factor de fricción del CO₂ supercrítico en un banco de tubos. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 155, 119813. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.119813>.
- Deeva, E. B., Kang, J., Darditis, K., Thao, N. T., & Lee, J. Y. (2020). Progreso reciente en el diseño de electrolitos no acuosos para baterías de litio-aire. *Journal of Materials Chemistry A*, 8(39), 20195-20222. <https://doi.org/10.1039/D0TA06440E>
- Ding, W., Zhang, J., Cheng, L., & Huang, S. (2020). Investigación numérica sobre la transferencia de calor y la caída de presión en un banco de tubos con tubos en espiral. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 159, 120148. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120148>
- Ding, Y., Cano, Z. P., Yu, A., Lu, J., & Chen, Z. (2020). Baterías de Li-ion para automóviles: Estado actual y perspectivas futuras. *Electrochemical Energy Reviews*, 2(1), 1-28. <https://doi.org/10.1007/s41918-018-0022-z>
- Gao, Y., Liu, Y., Zhao, Y., & Wang, Y. (2021). Estudio numérico sobre la transferencia de calor y las características de flujo de bancos de tubos con diferentes arreglos de tubos. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 167, 120833. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120833>

- Hu, Y., Wang, Z., Yang, X., Lv, W., Li, H., & Sun, C. (2021). Materiales anódicos a base de silicio para baterías de iones de litio. *Energy Storage Materials*, 35, 415-441. <https://doi.org/10.1016/j.ensm.2020.11.027>
- Huang, D., Feng, Y., & Wang, Q. (2021). Estudio experimental y numérico sobre la mejora de la transferencia de calor de un banco de tubos con tubos retorcidos y ranurados múltiples. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 171, 121083. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121083>
- Jiang, Y., Jiang, J., Peng, S., Li, Z., & Hu, J. (2020). Mecanismos de degradación de las baterías de iones de litio de alta energía y estrategias para extender la vida útil del ciclo - Una revisión. *Journal of Power Sources*, 478, 228799. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2020.228799>
- Jiang, Z., Gao, Y., Zhao, Y., & Wang, Y. (2021). Investigación numérica sobre la transferencia de calor y las características de flujo de un banco de tubos desfasados con diferentes formas de tubos. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 164, 120590. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120590>
- Khalid, M. A., Aly, W. I. A., & El-Ramly, M. A. (2020). Investigación numérica sobre la mejora de la transferencia de calor en bancos de tubos mediante el uso de tubos elípticos retorcidos. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 158, 119999. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.119999>
- Larcher, D., & Tarascon, J. M. (2020). Hacia baterías más ecológicas y sostenibles para el almacenamiento de energía eléctrica. *Nature Chemistry*, 7(1), 19-29. <https://doi.org/10.1038/s41557-014-0029-x>
- Alarcón Ochoa, J. A., & Tirado Ortega, E. J. (2017). Análisis del rendimiento térmico de un banco de tubos aplicados a sistemas de almacenamiento de energía térmica. <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/13641/1/UPS-CT006932.pdf>
- Li, M., Lu, J., Chen, Z., & Amine, K. (2020). 30 años de baterías de iones de litio. *Advanced Materials*, 1800561. <https://doi.org/10.1002/adma.201800561>
- Li, W., Deng, Y., Feng, X., Guo, Y., & Song, L. (2021). Progreso reciente en baterías de litio-aire con arquitecturas avanzadas. *Energy Storage Materials*, 35, 392-414. <https://doi.org/10.1016/j.ensm.2020.11.025>
- Lin, P. H., Lee, C. L., Liao, L. F., & Chen, W. C. (2021). Avances recientes en la seguridad térmica de las baterías de iones de litio. *Journal of Power Sources*, 489, 229461. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2020.229461>

- Nazer, I. R., Ismail, M., Mustapha, F., Shaari, A., & Rashid, N. K. A. (2021). Una revisión sobre materiales de electrodo y métodos para el reciclaje de baterías de iones de litio gastadas. *Environmental Chemistry Letters*, 19(3), 1989-2023. <https://doi.org/10.1007/s10311-020-01148-2>
- Nitta, N., Wu, F., Lee, J. T., & Yushin, G. (2015). Materiales para baterías de iones de litio: Presente y futuro. *Materials Today*, 18(5), 252-264. <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2014.10.040>
- Pistoia, G. (Ed.). (2014). *Baterías de iones de litio: Avances y aplicaciones*. Elsevier.
- Rao, L., & Newman, J. (1997). Modelado de la remoción de calor en baterías. *Journal of the Electrochemical Society*, 144(8), 2697-2707. <https://doi.org/10.1149/1.1837883>
- Ruan, Y., Song, X., Fu, Y., Song, C., & Battaglia, V. (2020). Evolución estructural y mecanismos de degradación de la capacidad en cátodos de LiMn₂O₄. *Journal of Materials Chemistry A*, 8(2), 554-562. <https://doi.org/10.1039/C9TA10441J>
- Sahin, B., Manay, E., & Dursun, B. (2020). Investigación experimental y numérica sobre la transferencia de calor y la caída de presión en un banco de tubos desfasados con nanofluido de Mn-Ni. *Applied Thermal Engineering*, 174, 115278. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115278>
- Tan, G., Xu, R., Xing, Z., Yuan, Y., Lu, J., & Amine, K. (2021). Problemas candentes y posibles soluciones en baterías avanzadas de litio-azufre de alta energía. *Joule*, 5(6), 1433-1462. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2021.04.022>
- Waldmann, T., Wilka, M., Kasper, M., Fleischhammer, M., & Wohlfahrt-Mehrens, M. (2016). Mecanismos de envejecimiento dependientes de la temperatura en baterías de iones de litio - Un estudio post-mortem. *Journal of Power Sources*, 306, 197-206. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2015.12.011>
- Wang, D., Zhang, W., Zheng, W., Cui, X., Rojo, T., & Zhang, Q. (2020). Hacia baterías de litio-azufre de alta seguridad. *Advanced Science*, 7(3), 1902063. <https://doi.org/10.1002/advs.201902063>
- Wang, Q., Liu, B., Zhang, H., Li, Y., Wang, J., Deng, J., & Wang, D. (2022). Estrategias de gestión térmica para baterías de iones de litio: Una revisión. *Energy*, 239, 121968. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121968>
- Wang, S., Zeng, L., Li, C., Wu, J., Yan, W., Xie, H., & Li, F. (2020). Grafito como

- aglutinante conductor y su aplicación en materiales anódicos de alta capacidad para baterías de iones de litio. *Energy Storage Materials*, 31, 117-138. <https://doi.org/10.1016/j.ensm.2020.05.022>
- Wang, Z., Huang, J., Chen, H., Zhang, T., Shi, Y., & Yu, A. (2021). Baterías de fosfato de hierro y litio: Progreso y perspectivas. *Energy & Environmental Materials*, 4(2), 81-106. <https://doi.org/10.1002/eem2.12138>
- Winter, M., & Brodd, R. J. (2004). ¿Qué son las baterías, las celdas de combustible y los supercondensadores? *Chemical Reviews*, 104(10), 4245-4270. <https://doi.org/10.1021/cr020730k>
- Xiao, J., Li, X., Huang, L., Sun, L., Zhang, W., Cheng, F., & Zhang, Q. (2021). Progreso reciente en baterías de Li-S: Mecanismos y soluciones. *Energy & Environmental Materials*, 4(2), 107-128. <https://doi.org/10.1002/eem2.12139>
- Xu, B., Wang, Z., & Chen, Q. (2020). Investigación numérica sobre la transferencia de calor y las características de flujo de bancos de tubos con tubos elípticos. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 153, 119634. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.119634>
- Xu, C., Ahmad, Z., Arnaiz, A., Comerford, D., Robinson, J., Trask, S., Waterman, D., & Grey, C. P. (2020). Mayor estabilidad oxidativa del electrolito y ciclabilidad de la batería a través del diseño de electrolitos para cátodos de óxido laminado de níquel alto. *Journal of the American Chemical Society*, 142(38), 16129-16139. <https://doi.org/10.1021/jacs.0c07218>
- Xu, J., Zhu, H., Li, Y., & Meng, X. (2021). Investigación experimental sobre la transferencia de calor y la caída de presión de un banco de tubos con tubos elípticos retorcidos. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 167, 120791. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120791>
- Xun, Q., Li, S., Zhang, J., Liu, Y., & Li, W. (2022). Gestión térmica de un paquete de baterías de iones de litio enfriado por aire para vehículos eléctricos: un estudio numérico y experimental acoplado. *Journal of Energy Storage*, 47, 103853. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103853>
- Ye, Y., Saw, L. H., Shi, Y., & Tay, A. A. O. (2015). Análisis numéricos sobre la optimización de un sistema de gestión térmica con tubos de calor para baterías de iones de litio. *Applied Energy*, 136, 73-87. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.09.015>

- Zhang, L., Cheng, H., Zheng, Y., & Cheng, L. (2020). Estudio experimental sobre la transferencia de calor y las características de flujo de un banco de tubos con tubos elípticos. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 155, 119803. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.119803>
- Zhang, X., Xie, J., Chen, X., Shi, J., & Duan, H. (2021). Baterías de iones de litio en estado sólido: Progreso y perspectivas. *Energy Storage Materials*, 36, 226-257. <https://doi.org/10.1016/j.ensm.2021.01.027>
- Zhao, Y., Chang, M., Hou, Z., Zhao, J., Zhang, P., Cui, Y., & Wang, Z. (2020). Hacia materiales de cátodo ricos en níquel de alto rendimiento para baterías de iones de litio: Una revisión completa. *Materials Today*, 35, 135-154. <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2020.01.010>
- Zhen, G., Cheng, L., Zheng, Y., & Cheng, H. (2021). Estudio numérico sobre la transferencia de calor y las características de flujo de un banco de tubos con tubos elípticos retorcidos. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 168, 120886. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.120886>
- Zheng, J., Zhao, P., Dai, Y., Sun, D., & Qu, X. (2021). Materiales de óxido de manganeso de litio espinela para baterías de iones de litio: Progreso y desafíos. *Journal of Power Sources*, 490, 229501. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2021.229501>

11. Anexos

Anexo 1. Datos de temperatura del modelo 1, distancia entre celdas de 25 mm

Tiempo (min)	Temperatura °C Celda 1	Temperatura °C Celda 2	Temperatura °C Celda 3	Temperatura °C Celda 4	Temperatura °C Celda 5	Temperatura °C Celda 6	Temperatura °C Celda 7	Temperatura °C Celda 8	Temperatura °C Celda 9	Temperatura °C Celda 10	Temperatura °C Celda 11	Temperatura °C Celda 12	Temperatura °C Celda 13	Temperatura °C Celda 14	Temperatura °C Celda 15	Temperatura °C Celda 16
0:00:06	19.44	19	19.19	19.56	19.19	19.44	19.44	19.44	19.87	20.06	20.37	18.94	20.19	19.87	19.75	19.31
0:01:07	20.75	20.25	20.5	20.87	20.44	20.87	21	20.69	21.31	21.75	21.94	20.31	21.56	21.31	21.19	20.69
0:02:07	21.87	21.44	21.75	22.12	21.75	22.25	22.62	21.81	22.75	23.31	23.56	21.75	22.94	22.69	22.56	22.12
0:03:08	23.12	22.69	22.94	23.37	22.94	23.75	24.19	23.06	24.06	24.81	25.12	23.19	24.19	24	23.87	23.5
0:04:09	24.06	23.62	23.94	24.31	24	25	25.5	24.12	25.25	26.19	26.37	24.31	25.25	25.12	25	24.69
0:05:10	24.87	24.5	24.81	25.25	24.94	26.12	26.75	25	26.25	27.44	27.69	25.44	26.19	26.06	25.94	25.69
0:06:10	25.56	25.31	25.69	26.06	25.75	27.25	27.87	25.87	27.19	28.56	28.81	26.31	26.94	26.94	26.81	26.56
0:07:11	26.31	26.12	26.44	26.81	26.5	28.25	29	26.69	28.06	29.69	29.87	27.12	27.62	27.69	27.62	27.44
0:08:12	27.06	26.87	27.19	27.62	27.25	29.31	30.06	27.56	29	30.75	30.94	27.94	28.44	28.62	28.5	28.19
0:09:12	27.81	27.81	28.12	28.5	28.12	30.37	31.31	28.44	30.06	32	32.19	28.94	29.25	29.44	29.44	29.12
0:10:13	28.62	28.69	29	29.44	29	31.56	32.63	29.31	31.12	33.31	33.5	29.87	30.19	30.44	30.31	30.06
0:11:14	29.25	29.62	29.87	30.31	29.87	32.69	33.88	29.94	32.19	34.56	34.81	30.87	31.12	31.44	31.31	31.06
0:12:15	29.94	30.5	30.81	31.25	30.75	33.81	35.19	30.75	33.25	35.88	36	31.75	31.94	32.38	32.25	32
0:13:15	30.75	31.37	31.69	32.06	31.56	34.88	36.31	31.75	34.25	37.13	37.19	32.69	32.75	33.25	33.13	32.88
0:14:16	31.37	32.13	32.5	32.81	32.38	36	37.56	32.38	35.25	38.31	38.38	33.5	33.56	34.13	33.94	33.75
0:15:17	32.06	32.81	33.25	33.63	33.06	36.94	38.63	33.44	36.19	39.44	39.56	34.38	34.31	34.94	34.69	34.56
0:16:18	32.63	33.56	33.88	34.38	33.81	38	39.81	34	37.06	40.5	40.63	35.13	35	35.75	35.5	35.38
0:17:18	33.13	34.19	34.63	35.13	34.5	38.94	40.94	34.69	37.88	41.63	41.75	35.94	35.69	36.44	36.25	36.06
0:18:19	33.63	34.94	35.25	35.75	35.19	39.94	41.88	35.38	38.75	42.75	42.69	36.63	36.31	37.19	36.94	36.75
0:19:20	34.13	35.5	35.88	36.31	35.75	40.81	42.94	36.13	39.56	43.75	43.75	37.31	36.94	37.88	37.56	37.5
0:20:20	34.56	36.13	36.5	36.94	36.38	41.75	43.81	36.75	40.31	44.69	44.69	38	37.44	38.56	38.25	38.13
0:21:21	34.69	36.5	36.56	37	36.38	42.31	44.06	37.38	40.94	44.75	44.69	38	36.38	38.31	38	38.06
0:22:22	34.19	36.5	35.31	35.75	34.38	41.5	42.25	38.06	40.38	41.75	41.19	35.88	31.56	34.25	33.69	35.19
0:23:23	34.19	36.63	34.69	35	33.06	40.63	41.31	38.44	39.56	39.56	38.88	34.19	29.31	31.5	31.19	33.31
0:24:23	34.13	36.75	34.38	34.44	32.19	39.75	40.56	38.44	38.75	37.81	37.13	33	27.87	29.56	29.37	31.87
0:25:24	34.06	36.69	34	33.88	31.44	38.94	39.75	38.25	37.88	36.25	35.5	31.94	26.75	28	28	30.69
0:26:25	34.06	36.69	33.75	33.44	30.75	38.25	39.19	38.06	37.06	34.94	34.25	31.12	25.87	26.75	26.94	29.75
0:27:26	34.00	36.75	33.63	33.13	30.37	37.63	38.56	37.94	36.31	33.75	33.25	30.37	25.25	25.94	26.12	29
0:28:26	34.00	36.69	33.5	32.81	30	37.06	38	37.75	35.56	32.75	32.31	29.81	24.75	25.25	25.44	28.37
0:29:27	33.94	36.56	33.25	32.44	29.62	36.5	37.44	37.44	34.94	31.94	31.5	29.25	24.25	24.62	24.87	27.75
0:30:28	33.88	36.44	33.06	32.19	29.31	36	36.94	37.25	34.44	31.12	30.69	28.81	23.94	24.12	24.37	27.31
0:31:28	33.75	36.31	32.88	31.81	29	35.56	36.5	36.94	33.88	30.56	30.19	28.31	23.62	23.81	24	26.94
0:32:29	33.56	36.13	32.56	31.56	28.62	35.06	36.06	36.63	33.44	29.94	29.56	27.94	23.31	23.5	23.69	26.5
0:33:30	33.56	36	32.44	31.31	28.44	34.69	35.63	36.44	33	29.56	29.19	27.56	23.19	23.25	23.44	26.19
0:34:31	33.44	35.94	32.25	31.19	28.19	34.31	35.25	36.19	32.63	29.06	28.75	27.31	22.94	23.06	23.25	26
0:35:31	33.38	35.75	32.19	31	28.06	34.06	34.94	36	32.25	28.75	28.5	27.06	22.81	22.81	23.06	25.75
0:36:32	33.25	35.63	32	30.87	27.87	33.75	34.69	35.75	32	28.37	28.19	26.87	22.69	22.69	22.87	25.56
0:37:33	33.19	35.56	31.87	30.69	27.69	33.5	34.38	35.5	31.75	28.19	27.94	26.62	22.56	22.56	22.81	25.44
0:38:34	33.13	35.44	31.75	30.56	27.56	33.31	34.19	35.44	31.5	27.94	27.75	26.5	22.56	22.5	22.69	25.37
0:39:34	33.06	35.31	31.69	30.56	27.5	33.06	33.94	35.25	31.25	27.75	27.62	26.37	22.56	22.5	22.62	25.25
0:40:35	32.94	35.19	31.56	30.37	27.44	32.81	33.75	35.06	31.12	27.62	27.5	26.25	22.5	22.5	22.56	25.12

Anexo 2. Datos de temperatura del modelo 2, distancia entre celdas de 35 mm

Tiempo (min)	Temperatura °C Celda 1	Temperatura °C Celda 2	Temperatura °C Celda 3	Temperatura °C Celda 4	Temperatura °C Celda 5	Temperatura °C Celda 6	Temperatura °C Celda 7	Temperatura °C Celda 8	Temperatura °C Celda 9	Temperatura °C Celda 10	Temperatura °C Celda 11	Temperatura °C Celda 12	Temperatura °C Celda 13	Temperatura °C Celda 14	Temperatura °C Celda 15	Temperatura °C Celda 16
0:00:06	21.69	21.5	21.3	21.5	22.25	22.37	22.31	22.31	22	22.94	22.44	22.19	22.31	22.62	22.81	22.5
0:01:07	22.12	21.75	21.87	22	22.56	22.62	22.75	22.56	22.19	23.31	22.75	22.62	22.37	23	23.25	22.87
0:02:07	23.19	22.5	22.81	23.12	23.37	23.44	23.87	23.31	23.06	24.31	23.75	23.69	23.12	24.12	24.44	23.87
0:03:08	24.50	23.44	23.87	24.31	24.5	24.69	25.12	24.44	24.12	25.62	25	24.87	24.19	25.44	25.75	25.19
0:04:09	25.81	24.5	24.94	25.44	25.75	25.87	26.5	25.62	25.37	26.94	26.37	26.19	25.37	26.81	27.06	26.44
0:05:10	27.12	25.5	25.94	26.69	26.94	27.19	27.75	26.69	26.56	28.19	27.69	27.37	26.62	28.19	28.37	27.62
0:06:10	28.31	26.56	27	27.75	28.12	28.37	29	27.69	27.75	29.44	28.87	28.56	27.94	29.44	29.62	28.81
0:07:11	29.44	27.5	27.94	28.75	29.31	29.56	30.12	28.69	28.87	30.62	30	29.62	29.12	30.62	30.81	30
0:08:12	30.44	28.25	28.81	29.75	30.37	30.56	31.06	29.62	29.87	31.75	31.19	30.69	30.31	31.75	32	31
0:09:12	31.44	29.06	29.62	30.62	31.31	31.62	32.06	30.5	30.94	32.81	32.25	31.62	31.37	32.81	33.06	32
0:10:13	32.31	29.81	30.31	31.44	32.31	32.63	33.06	31.44	31.87	33.81	33.25	32.56	32.44	33.88	34.13	32.94
0:11:14	33.13	30.5	31	32.19	33.13	33.56	33.94	32.13	32.81	34.75	34.19	33.44	33.31	34.88	35.06	33.81
0:12:15	34.00	31.19	31.69	32.88	33.94	34.44	34.81	32.94	33.69	35.69	35.13	34.38	34.25	35.75	36	34.69
0:13:15	34.69	31.81	32.31	33.63	34.81	35.38	35.56	33.63	34.5	36.56	35.88	35.13	35.13	36.69	36.94	35.44
0:14:16	35.38	32.44	32.94	34.31	35.38	36.06	36.38	34.38	35.25	37.38	36.75	35.81	35.94	37.5	37.81	36.25
0:15:17	36.00	33	33.56	34.94	36.19	36.88	37.13	35	36	38.19	37.5	36.63	36.69	38.31	38.56	36.94
0:16:18	36.63	33.56	34	35.5	36.94	37.69	37.81	35.63	36.75	38.94	38.25	37.25	37.44	39.06	39.38	37.69
0:17:18	37.19	34	34.5	36	37.56	38.25	38.44	36.19	37.38	39.56	39.06	38	38.19	39.81	40.06	38.38
0:18:19	37.69	34.38	34.88	36.5	38.13	38.69	38.94	36.69	38.06	40.25	39.75	38.63	38.88	40.63	40.88	38.88
0:19:20	38.13	34.81	35.25	37	38.63	39.31	39.56	37.25	38.56	40.88	40.44	39.19	39.56	41.19	41.5	39.5
0:20:20	38.63	35.25	35.63	37.31	38.94	40	40.25	37.75	39.19	41.5	40.88	39.75	40	41.69	41.88	40
0:21:21	39.06	35.56	35.94	37.75	39.69	40.56	40.69	38.13	39.69	42	41.56	40.25	40.56	42.31	42.63	40.5
0:22:22	39.44	35.88	36.31	38.13	40.06	40.94	41.06	38.56	40.13	42.56	42.13	40.75	41.06	42.94	43.19	41
0:23:23	39.75	36.25	36.63	38.5	40.44	41.56	41.56	38.94	40.63	43	42.63	41.31	41.5	43.38	43.69	41.44
0:24:23	40.06	36.63	37	38.81	40.75	42.13	42.13	39.38	41.06	43.56	43.06	41.63	42.06	43.88	44.13	41.88
0:25:24	40.50	36.88	37.25	39.13	41.31	42.44	42.44	39.69	41.5	44	43.5	42.13	42.5	44.38	44.63	42.25
0:26:25	40.69	37.19	37.56	39.44	41.5	42.94	42.81	40.13	41.88	44.56	43.81	42.38	42.94	44.81	45.19	42.69
0:27:26	41.09	37.44	37.75	39.75	41.88	43.38	43.31	40.38	42.31	44.88	44.25	42.81	43.31	45.13	45.5	43
0:28:26	41.31	37.63	38.06	40.13	42.31	43.5	43.56	40.69	42.56	45.25	44.75	43.25	43.69	45.63	46	43.31
0:29:27	41.56	37.88	38.19	40.25	42.75	44	43.94	40.94	43	45.69	45.06	43.5	44.06	45.94	46.31	43.75
0:30:28	41.81	38.06	38.31	40.44	43	44.31	44.25	41.25	43.31	46	45.5	43.94	44.44	46.38	46.63	43.94
0:31:28	41.56	38.31	38.19	40.5	43.19	44.94	44.56	41.31	43.25	46.19	45.88	44.31	43.81	45.44	46.31	43.38
0:32:29	41.06	37.5	37.38	40.56	43.5	45.13	44.5	41.38	42	45.5	44.94	44.5	41.5	42.31	45.75	42.13
0:33:30	40.81	36.88	36.88	40.69	43.38	45.06	44.19	41.06	41.31	44.81	44.06	44.31	40	40.38	44.75	41.25
0:34:31	40.44	36.56	36.56	40.75	43.25	44.88	44	40.69	40.63	44.25	43.5	43.88	38.94	39.25	43.81	40.56
0:35:31	40.06	36.25	36.38	40.81	43.06	44.56	43.94	40.31	40	43.81	42.94	43.5	38.19	38.44	43	40
0:36:32	39.88	36.13	36.19	40.63	42.88	44.25	43.69	40	39.56	43.25	42.44	43.19	37.75	37.75	42.38	39.5
0:37:33	39.63	36.06	36.19	40.56	42.69	44.06	43.56	39.75	39.19	42.94	41.94	42.88	37.44	37.19	41.81	39.06
0:38:34	39.44	36	36.13	40.56	42.44	43.75	43.38	39.44	38.81	42.63	41.63	42.63	37.25	36.75	41.25	38.63
0:39:34	39.31	35.88	36.06	40.44	42.19	43.94	43.19	39.19	38.5	42.19	41.5	42.44	36.88	36.38	40.81	38.25
0:40:35	39.13	35.69	35.94	40.63	42	43.63	43	38.81	38.13	42	41	42.13	36.31	35.81	40.38	38
0:41:36	38.94	35.44	35.69	40.56	41.94	43.56	42.94	38.56	37.81	41.63	40.81	41.69	35.69	35.25	39.94	37.63
0:42:36	38.75	35.31	35.56	40.44	41.81	42.88	42.63	38.31	37.56	41.38	40.31	41.5	35.44	34.88	39.56	37.31
0:43:37	38.69	35.19	35.44	40.31	41.63	43.13	42.56	38.13	37.25	41.13	40.19	41.19	35.25	34.63	39.31	37.06
0:44:38	38.44	35.13	35.38	40.25	41.5	42.81	42.44	37.94	37.06	40.94	39.88	41.06	35.06	34.25	39.06	36.88
0:45:39	38.25	34.94	35.19	40.13	41.5	42.44	42.25	37.69	36.88	40.69	39.5	40.94	34.75	34	38.75	36.69
0:46:39	38.19	34.88	35.19	40	41.31	42.63	42.06	37.56	36.69	40.44	39.56	40.75	34.69	33.88	38.56	36.5
0:47:40	38.06	34.75	35	39.94	41.25	42.38	42.06	37.38	36.5	40.31	39.13	40.56	34.31	33.56	38.38	36.31
0:48:41	38.00	34.69	34.94	39.63	41.19	42	41.75	37.25	36.31	40	38.88	40.31	34.25	33.44	38.25	36.19
0:49:42	37.94	34.63	34.81	39.75	41.13	41.94	41.75	37.19	36.19	39.81	38.81	40.19	34.06	33.25	38.06	35.94
0:50:42	37.81	34.44	34.63	39.56	40.81	42.13	41.69	37.06	36.06	39.69	38.94	40.06	34	33.38	37.88	35.88
0:51:43	37.75	34.25	34.56	39.5	40.75	42	41.63	36.88	35.88	39.69	38.56	39.88	33.75	32.94	37.69	35.75
0:52:44	37.56	34.19	34.44	39.25	40.63	42.06	41.38	36.81	35.81	39.38	38.44	39.81	33.63	32.69	37.56	35.69
0:53:45	37.44	34.06	34.31	39.38	40.5	41.5	41.25	36.56	35.63	39.44	38.19	39.69	33.56	32.63	37.38	35.5
0:54:45	37.25	34.06	34.31	39.25	40.44	41.44	41.19	36.56	35.5	39.25	38.19	39.56	33.44	32.69	37.25	35.38
0:55:46	37.25	33.94	34.25	39.19	40.25	41.38	41.13	36.44	35.44	39.13	38	39.25	33.19	32.5	37.19	35.25
0:56:47	37.13	33.81	34.19	39.13	40.25	41.19	41.06	36.31	35.25	39	37.75	39.25	33.06	32.25	37.06	35.19
0:57:47	37.06	33.88	34.06	39	40.25	40.56	40.94	36.25	35.25	38.94	37.38	39.06	32.94	32.13	37	35.06
0:58:48	37.06	33.81	34.06	38.75	40.19	40.56	40.94	36.19	35.13	38.88	37.38	39.19	33.06	32.06	36.94	34.94
0:59:49	37.00	33.88	34	38.88	40.19	40.63	40.88	36.13	35.13	38.88	37.38	39.19	33.13	32	36.81	35.06
1:00:50	37.06	33.88	34	38.75	40.06	40.75	40.81	36	35.06	38.81	37.38	39.13	33	32	36.75	35

Anexo 3. Datos de temperatura del modelo 3, distancia entre celdas de 45 mm

Tiempo (min)	Temperatura °C Celda 1	Temperatura °C Celda 2	Temperatura °C Celda 3	Temperatura °C Celda 4	Temperatura °C Celda 5	Temperatura °C Celda 6	Temperatura °C Celda 7	Temperatura °C Celda 8	Temperatura °C Celda 9	Temperatura °C Celda 10	Temperatura °C Celda 11	Temperatura °C Celda 12	Temperatura °C Celda 13	Temperatura °C Celda 14	Temperatura °C Celda 15	Temperatura °C Celda 16
0:00:06	19.56	19.31	19.75	19.81	21.12	20.94	20.87	20.94	21.44	22.12	21.69	21.19	21.56	21.69	21.75	21.44
0:01:07	19.87	19.56	20.06	20.31	21.37	21.06	21.19	21.19	21.56	22.37	22.06	21.56	21.69	22.06	22	21.87
0:02:07	20.94	20.37	20.87	21.31	22.44	21.87	22.19	22.06	22.31	23.12	23	22.56	22.5	22.94	22.81	22.87
0:03:08	22.12	21.31	21.87	22.5	23.56	22.94	23.31	23.06	23.37	24.25	24.19	23.69	23.5	24.19	23.87	24
0:04:09	23.37	22.31	23	23.69	24.62	24.12	24.5	24.25	24.37	25.44	25.5	24.94	24.69	25.44	25.06	25.25
0:05:09	24.69	23.44	24.19	24.94	25.94	25.37	25.81	25.44	25.62	26.69	26.81	26.19	26	26.69	26.31	26.5
0:06:10	25.94	24.62	25.37	26.06	27.12	26.62	27.12	26.75	26.81	27.87	28.06	27.5	27.25	27.94	27.5	27.69
0:07:11	26.87	25.37	26.19	27.06	28.06	27.5	27.94	27.75	27.81	28.94	29.06	28.44	28.31	28.94	28.44	28.62
0:08:12	27.87	26.37	27.19	28.12	29.12	28.69	29.12	28.69	28.87	30.06	30.25	29.44	29.5	30.12	29.56	29.75
0:09:12	29.00	27.31	28.25	29.12	30.12	29.75	30.25	29.87	29.94	31.25	31.56	30.69	30.56	31.19	30.69	30.75
0:10:13	29.81	28.06	28.81	29.87	31.06	30.56	31	30.56	30.81	32.06	32.31	31.37	31.5	32.13	31.56	31.62
0:11:14	30.56	28.87	29.56	30.69	31.87	31.37	31.81	31.37	31.69	33	33.31	32.31	32.5	33	32.44	32.5
0:12:15	31.44	29.69	30.44	31.56	32.94	32.44	32.81	32.31	32.75	34.06	34.31	33.25	33.63	34.13	33.44	33.38
0:13:15	32.19	30.44	31.31	32.44	33.81	33.38	33.69	33.13	33.63	34.94	35.13	34	34.5	35	34.25	34.19
0:14:16	32.81	31.06	31.94	33.19	34.56	34.13	34.38	33.81	34.38	35.75	35.94	34.63	35.31	35.81	35	34.81
0:15:17	33.63	31.81	32.63	33.94	35.13	34.88	35.31	34.69	35.19	36.63	37	35.69	36.25	36.69	36	35.81
0:16:17	34.31	32.5	33.25	34.75	36	35.69	36.13	35.63	36.06	37.63	37.88	36.56	37	37.56	36.75	36.63
0:17:18	35.13	33.25	34.13	35.5	36.88	36.63	37	36.44	37	38.5	38.81	37.44	37.75	38.31	37.63	37.31
0:18:19	35.75	33.94	34.81	36.19	37.56	37.44	37.81	37.38	37.69	39.38	39.63	38.38	38.44	39.06	38.25	38.06
0:19:20	36.44	34.5	35.38	36.75	38.25	38.06	38.44	37.94	38.38	40.13	40.38	38.88	39.19	39.75	38.94	38.63
0:20:20	37.00	35.13	35.94	37.38	38.81	38.75	39.13	38.63	39.06	40.81	41.19	39.63	39.81	40.38	39.63	39.19
0:21:21	37.06	35.19	35.88	37.38	38.75	38.88	39.19	38.75	39.06	40.94	41.25	39.75	40.13	40.75	39.75	39.38
0:22:22	37.69	35.81	36.63	38.06	39.69	39.69	40.06	39.44	39.94	41.88	42.31	40.5	40.94	41.5	40.63	40.13
0:23:23	38.44	36.44	37.19	38.75	40.44	40.5	40.94	40.38	40.81	42.75	43.06	41.38	41.56	42.19	41.25	40.75
0:24:23	38.88	37	37.69	39.31	41	41	41.44	40.94	41.31	43.38	43.69	41.94	42.19	42.81	41.88	41.25
0:25:24	39.13	37.25	38	39.56	41.25	41.44	41.75	41.13	41.56	43.75	44.06	42.19	42.56	43.25	42.19	41.63
0:26:25	39.69	37.81	38.63	40.06	42.19	42.25	42.56	41.94	42.44	44.56	44.88	43	43.06	43.81	42.81	42.19
0:27:26	40.19	38.38	39.06	40.63	42.63	42.63	42.94	42.44	42.94	45.13	45.38	43.5	43.56	44.31	43.31	42.56
0:28:26	40.69	38.75	39.38	40.94	42.81	43.06	43.5	42.94	43.19	45.56	45.81	43.94	44	44.81	43.75	43.13
0:29:27	40.88	39.06	39.75	41.31	43.31	43.56	43.88	43.25	43.69	46.06	46.31	44.25	44.5	45.25	44.31	43.5
0:30:28	41.25	39.44	40	41.69	43.5	43.94	44.31	43.69	44	46.5	46.81	44.69	44.88	45.69	44.81	43.94
0:31:28	41.63	39.75	40.25	41.94	43.81	44.25	44.69	44.06	44.38	46.88	47.25	45.19	45.31	46.13	45.19	44.44
0:32:29	41.69	40	40.56	42.31	44.5	44.69	44.81	44.25	45.06	47.31	47.63	45.38	45.69	46.44	45.38	44.56
0:33:30	41.81	40	40.44	42.38	44.31	44.56	44.75	44.19	45.13	47.38	47.69	45.44	45.94	46.69	45.56	44.69
0:34:31	41.69	39.88	40.38	42.44	44.56	44.63	44.94	44.13	45.13	47.44	47.69	45.5	46.13	46.81	45.63	44.88
0:35:31	42.19	40.25	40.81	42.88	44.94	45.25	45.63	44.88	45.69	48.13	48.5	46.25	46.69	47.5	46.31	45.56
0:36:32	40.50	38.81	39.13	41.63	42.56	42.31	42.38	44	43.88	44.5	45.06	44.88	43.25	43.13	42.88	44.06
0:37:33	39.25	37.38	37.56	40.38	41.19	40.56	40.69	42.94	42.63	42.06	43.13	43.75	41.13	40.38	40.63	42.69
0:38:34	38.56	36.19	36.81	39.63	40.38	39.38	39.75	42.25	41.69	40.94	42.31	42.94	39.44	38.88	39.44	41.94
0:39:34	38.13	35.88	36.31	38.88	39.75	38.56	38.88	42.38	40.88	39.69	41.31	42.69	38.25	37.38	38.63	41.63
0:40:35	37.63	34.88	35.5	38.38	39.06	37.5	38.13	41.5	40.31	38.81	40.63	42.06	37.19	36.38	37.81	40.88
0:41:36	37.19	34.56	35.19	37.75	38.63	37.13	37.69	41.06	39.63	38.13	40.19	41.63	36.44	35.5	37.19	40.31
0:42:36	36.81	34.31	34.63	37.19	38.25	37.06	37.63	40.75	39.19	37.63	39.44	40.88	35.88	34.75	36.44	39.44
0:43:37	36.69	33.94	34.25	36.75	37.75	36.56	36.88	40.44	38.63	36.94	38.94	40.69	35.19	34	36.06	39.19
0:44:38	36.19	33.38	33.75	36.56	37.31	35.81	36.38	40.06	38.38	36.69	38.56	40.44	34.5	33.5	35.56	39
0:45:39	35.88	33.31	33.63	36	37	36.06	36.31	40	37.81	36.19	38.25	39.88	34.06	32.88	35.13	38.38
0:46:39	35.63	32.75	33.5	35.75	36.69	35.38	35.69	39.5	37.44	35.94	38.06	39.75	33.63	32.63	34.81	38.25
0:47:40	35.31	32.69	33.13	35.56	36.38	34.88	35.31	39	37.13	35.56	37.56	39.63	33.06	32.19	34.38	38
0:48:41	35.13	32.31	33.19	35.19	36.13	34.69	35.19	38.69	36.88	35.5	37.31	39.19	32.81	32.06	34.13	37.69
0:49:42	35.00	32.38	32.75	34.81	35.88	34.69	34.94	38.63	36.63	34.81	37	38.81	32.56	31.5	33.81	37.25
0:50:42	34.50	31.87	32.13	34.81	35.75	34.13	34.56	37.94	36.44	34.81	36.56	38.38	32.31	31.25	33.5	36.94
0:51:43	34.50	31.75	32.5	34.5	35.44	34.19	34.38	38.13	36.13	34.69	36.63	38.56	32	31.12	33.38	36.94
0:52:44	34.31	31.56	32.06	34.5	35.31	33.69	34.13	37.69	36	34.44	36.25	38.38	31.75	30.94	33.19	36.81
0:53:44	34.13	31.44	31.69	34.13	35.06	33.69	33.88	37.38	35.81	34.06	36	37.5	31.69	30.69	32.88	36.25
0:54:45	33.81	31.19	31.56	34.13	35.06	33.31	33.69	37.06	35.56	34	35.69	37.13	31.31	30.62	32.56	35.94
0:55:46	33.63	31.06	31.81	34.06	34.81	33.19	33.5	36.88	35.31	33.81	35.5	37.06	31.06	30.44	32.38	35.81
0:56:47	33.63	31	31.5	33.88	34.63	33.06	33.44	36.88	35.19	33.44	35.38	37	30.94	30.19	32.25	35.81
0:57:47	33.56	31	31.44	33.63	34.44	33	33.44	36.69	35.06	33.19	35.25	36.69	30.94	30	32	35.38
0:58:48	33.50	30.87	31.19	33.38	34.38	33.19	33.63	36.44	34.94	33	35.13	36.44	30.94	29.75	31.87	35.13
0:59:49	33.56	30.75	31	33.38	34.19	33	33.38	36.38	34.81	32.81	34.88	36.56	30.87	29.69	31.81	35.19
1:00:50	33.31	30.81	31.06	33.31	34.13	33	33.13	36.69	34.69	32.69	34.75	36.63	30.56	29.56	31.81	35.31

Anexo 4. Código para la obtención de datos en Excel

```
#include <OneWire.h>
#include <DallasTemperature.h>

// Establecer el pin 2 como bus OneWire
OneWire ourWire(2);

// Crear una instancia de la biblioteca de sensores DS18B20
DallasTemperature sensors(&ourWire);

// Dirección única del sensor DS18B20
DeviceAddress address1 = {0x28, 0x38, 0xAC, 0x49, 0xF6, 0xCC, 0x3C, 0x8B};

#include <OneWire.h>
#include <DallasTemperature.h>

// Establecer el pin 2 como bus OneWire
OneWire ourWire(2);

// Crear una instancia de la biblioteca de sensores DS18B20
DallasTemperature sensors(&ourWire);

// Dirección única del sensor DS18B20
DeviceAddress address1 = {0x28, 0x38, 0xAC, 0x49, 0xF6, 0xCC, 0x3C, 0x8B};

void setup() {
    // Retardo para asegurar que todo esté listo
    delay(5000);
    // Iniciar comunicación serial
    Serial.begin(9600);
    // Iniciar los sensores
    sensors.begin();
    // Enviar cabecera para PLX-DAQ
    Serial.println("CLEARDATA");
    Serial.println("LABEL, Time, Temperature (C)");
}

void loop() {
    // Solicitar la temperatura del sensor
    sensors.requestTemperatures();
    // Obtener la temperatura en °C del sensor
    float temp1 = sensors.getTempC(address1);

    // Obtener la hora exacta en milisegundos desde el inicio del programa
    unsigned long currentTime = millis();
    unsigned long seconds = currentTime / 1000;
    unsigned long minutes = seconds / 60;
    unsigned long hours = minutes / 60;

    // Ajustar las horas al formato de 24 horas
    hours = (hours + 0) % 24;

    // Imprimir los datos en formato PLX-DAQ
    Serial.print("DATA,");
    Serial.print(hours);
    Serial.print(":");
    Serial.print(minutes % 60);
    Serial.print(":");
    Serial.print(seconds % 60);
    Serial.print(",");
    Serial.println(temp1);

    // Retardo para estabilizar las lecturas
    delay(2000);
}
```

Anexo 5. Medición de la velocidad del viento que ingresa al módulo de 16 celdas



Anexo 6. Certificación de traducción del resumen

CALTEC 2.4

El suscrito Lic. **Edgar Patricio Garrochamba Pullaguari**, con ruc **1104771991001** gerente propietario del Centro de Desarrollo Académico CALTEC domiciliado en la ciudad de Quito con sedes en Cuenca, Loja y Zamora Chinchipe.

A petición de la parte interesada:

CERTIFICO

Que he revisado y verificado la traducción del resumen del trabajo titulado: "Design and construction of a tube bank with heat generation for emulation of cooling strategies in an air-cooled battery bank", cuya traducción al español es: "Diseño y construcción de un banco de tubos con generación de calor para emulación de estrategias de enfriamiento en un banco de baterías enfriadas por aire" realizada por el estudiante Juan Carlos Garrochamba Pullaguari.

Certifico que la traducción ha sido realizada con precisión y fidelidad al texto original, manteniendo el significado y contenido técnico del documento.

Para constancia de lo anterior, firmo el presente certificado en la fecha abajo indicada, es todo lo que puedo decir en honor a la verdad, facultándole al interesado el uso del presente certificado como lo creyere conveniente

Centro de Capacitación y Desarrollo Académico Quito, 30 de octubre de 2024

Atentamente



EDGAR PATRICIO
GARROCHAMBA
PULLAGUARI

Lic. Patricio Garrochamba

DIRECTOR ACADÉMICO

Reg. 1008-13-1251057



Este documento está firmado electrónicamente