



Universidad  
Nacional  
de Loja

## Universidad Nacional de Loja

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

### Maestría en Conversión de Energía y Sostenibilidad

### Análisis de la incidencia del ángulo de dispersión y distancia de aplicación de aire en un sistema de refrigeración de baterías de Ion de Litio.

Trabajo de Titulación, previo a  
la obtención del título Magister  
en Conversión de Energía y  
Sostenibilidad.

#### AUTOR:

Ing. Julio César Cabrera Sarmiento

#### DIRECTOR:

Ing. Byron Agustín Solorzano Castillo, Mg. Sc.

Loja - Ecuador

2024

## Certificación

**Loja, 16 de octubre del 2024**

Ing. Byron Agustín Solorzano Castillo, Mg. Sc.

**DIRECTOR DE TRABAJO DE TITULACIÓN**

### **CERTIFICO:**

Que he revisado y orientado todo el proceso de elaboración del Trabajo de Titulación denominado: **Análisis de la incidencia del ángulo de dispersión y distancia de aplicación de aire en un sistema de refrigeración de baterías de Ion de Litio**, previo a la obtención del título de Magister en Conversión de energía y sostenibilidad, de la autoría del **Ing. Julio César Cabrera Sarmiento** con cédula de identidad Nro. 1104251549, 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.

Ing. Byron Agustín Solorzano Castillo, Mg. Sc.

**Director del trabajo de titulación**

## **Autoría**

Yo, **Julio César Cabrera Sarmiento**, declaro ser el autor del presente Trabajo de Titulación 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 Titulación en el Repositorio Institucional – Biblioteca Virtual.

**Firma:**

**Cédula de identidad:** 1104251549

**Fecha:** 16 de octubre del 2024

**Correo electrónico:** [julio.cabrera@unl.edu.ec](mailto:julio.cabrera@unl.edu.ec)

**Teléfono:** 0992424255

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

Yo **Julio César Cabrera Sarmiento** declaro ser autor del Trabajo de Titulación denominado: **Análisis de la incidencia del ángulo de dispersión y distancia de aplicación de aire en un sistema de refrigeración de baterías de Ion de Litio**. Como requisito para optar por el título de **Magister en Conversión de Energía y Sostenibilidad**; autorizo al sistema Bibliotecario de la Universidad Nacional de Loja para que con fines académicos muestre la producción intelectual de la Universidad, a través de la visibilidad de su contenido de la siguiente manera en el Repositorio Institucional.

Los usuarios pueden consultar el contenido de este trabajo en el Repositorio Institucional, en las redes de información del país y del exterior con las cuales tenga convenio la Universidad. La Universidad Nacional de Loja, no se responsabiliza por el plagio o copia del Trabajo de Titulación que realice un tercero.

Para constancia de esta autorización, en la ciudad de Loja, a los ocho días del mes de marzo del dos mil veintitrés.

**Firma:**

**Autor:** Julio César Cabrera Sarmiento

**Cédula de identidad:** 1104251549

**Dirección:** Barrio San Francisco de Borja

**Correo electrónico:** [julio.cabrera@unl.edu.ec](mailto:julio.cabrera@unl.edu.ec)

**Teléfono:** 0992424255

**DATOS COMPLEMENTARIOS:**

**Director del Trabajo de Titulación:** Ing. Byron Agustín Solorzano Castillo, Mg. Sc.



## **Dedicatoria**

A mis padres Bolívar y Zoila, porque la mejor manera de buscar motivación en la vida es en el origen de los hogares. A mis hermanos y hermanas Patricia, Cristian y Cristina, porque un hermano/a puede amar como un padre, cuidar como una madre y apoyar como un amigo.

A mi amada esposa Janeth y a mis queridos hijos Emily y Sebastián: ustedes son los pilares fundamentales que me han permitido alcanzar cada meta y realizar cada sueño. Gracias por ser mi inspiración constante en nuestro camino hacia la superación personal y familiar.

***Julio Cesar Cabrera Sarmiento***

## **Agradecimiento**

A mis formadores desde la niñez, adolescencia y adultez, quienes han compartido desinteresadamente su conocimiento para instruirme en ciencia y valores. A la Universidad Nacional de Loja, carrera de Ingeniería Electromecánica y toda su planta docente por enseñarme las bases del que hacer ingenieril para poder desempeñarme con ética y responsabilidad en la vida profesional.

De manera especial, mi agradecimiento al Ing. Byron Agustín Solorzano Castillo y al Centro de Investigaciones Tecnológicas y Energéticas - CITE de la Universidad Nacional de Loja por el asesoramiento brindado y apoyo logístico, y los aportes de conocimiento

***Julio César Cabrera Sarmiento***

## Índice de contenidos

<b>Certificación.....</b>	<b>ii</b>
<b>Autoría.....</b>	<b>iii</b>
<b>Dedicatoria.....</b>	<b>v</b>
<b>Agradecimiento.....</b>	<b>vi</b>
<b>Índice de contenidos.....</b>	<b>vii</b>
<b>Índice de tablas:.....</b>	<b>xi</b>
<b>Índice de figuras:.....</b>	<b>xii</b>
<b>Índice de anexos:.....</b>	<b>xiv</b>
<b>Simbología:.....</b>	<b>xv</b>
<b>1. Título.....</b>	<b>1</b>
<b>2. Resumen.....</b>	<b>2</b>
<b>Abstract.....</b>	<b>3</b>
<b>3. Introducción.....</b>	<b>4</b>
<b>4. Marco teórico.....</b>	<b>7</b>
4.1    Batería ion litio.....	7
4.2    Tipos de batería de ion de litio.....	7
4.3    Problemas térmicos en las baterías ion litio.....	8
4.3.1    Baja temperatura de operación.....	8
4.3.2    Thermal runaway.....	9
4.4    Sistemas de refrigeración de batería ion de litio en vehículos eléctricos.....	9
4.4.2    Tipos de sistemas de refrigeración.....	10
4.4.2.1    Sistema de refrigeración por aire de la cabina.....	10
4.4.2.2    Sistema de refrigeración por aire independiente.....	10
4.4.2.3    Sistema de refrigeración directa.....	11

4.4.2.4	Refrigeración indirecta a base de agua y glicol. ....	11
4.5	Nociones de transferencia de calor. ....	12
4.5.1	Conducción. ....	12
4.5.2	Convección.....	12
4.5.3	Radiación.....	14
4.5.4	Ecuación fundamental de la transferencia de calor.....	14
4.6	Mecánica de Fluidos. ....	15
4.6.1	Ecuaciones NAVIER-STOKES. ....	15
4.6.2	Capa límite, flujo laminar y turbulento.....	17
4.6.3	Capa límite térmica. ....	18
4.7	Dinámica de fluidos computacional CFD. ....	19
4.7.1	Método de volúmenes finitos (fvm).....	20
4.8	Estado del arte sistemas de enfriamiento de BIL.....	20
4.9	Estado del arte sistemas de enfriamiento de BIL inter-baterías mediante tubos de refrigeración.....	24
<b>5</b>	<b>Metodología.....</b>	<b>28</b>
5.1	Área de estudio.....	28
5.2	Procedimiento. ....	29
<b>6</b>	<b>Resultados. ....</b>	<b>32</b>
6.1	Proceso constructivo de prototipo. ....	32
6.1.2	Barras cilíndricas (tomado de modelo batería 18650, experimental). ....	33
6.1.3	Resistencias tubulares 350 W 220 VAC. ....	33
6.1.4	Bases desmontables con diferentes opciones de configuración.....	34
6.1.5	Tubos de refrigeración con agujeros equidistantes. ....	36
6.1.6	Bastidor inferior. ....	37
6.1.7	Fuente variable DC (P-3010D). ....	38
6.2	Procesamiento y análisis de datos experimentación sobre varias condiciones de	

	enfriamiento de las BIL para establecer las condiciones de mejor operatividad térmica. .....	39
6.3	Datos obtenidos mediante pruebas en el Banco experimental de BIL.....	42
6.3.2	Datos obtenidos en plantilla de 10mm de separación batería y tubo de refrigeración....	43
6.3.3	Datos obtenidos en plantilla de 2mm de separación batería y tubo de refrigeración.....	44
6.3.4	Experimentación con flujo constante desde temperatura de trabajo inicial de Plantilla de 10 mm de separación entre baterías y tubos de refrigeración, tubos de refrigeración 1 mm tobera 60°. .....	47
6.4	Simulación CFD.....	53
6.4.1	Ecuaciones del modelo matemático .....	54
6.4.2	Mallado. ....	54
6.4.3	Modelo de turbulencia.....	56
6.4.4	Material y condiciones de frontera.....	57
6.4.5	Criterio de convergencia. ....	58
6.4.6	Resultados de simulación.....	59
6.4.7	Validación de los resultados de simulación .....	64
<b>7</b>	<b>Discusión. ....</b>	<b>66</b>
<b>8</b>	<b>Conclusiones .....</b>	<b>68</b>
<b>9</b>	<b>Recomendaciones .....</b>	<b>69</b>
<b>10</b>	<b>Bibliografía .....</b>	<b>70</b>
<b>11</b>	<b>Anexos .....</b>	<b>74</b>
	Anexo 1. Certificación de traducción de resumen. ....	74
	Anexo 2. Datos obtenidos en plantilla de 10 mm de separación batería y tubo de refrigeración.	76
	Anexo 3. Datos obtenidos en plantilla de 8 mm de separación batería y tubo de refrigeración. ..	77
	Anexo 4. Datos obtenidos en plantilla de 6 mm de separación batería y tubo de refrigeración. ..	78
	Anexo 5. Datos obtenidos en plantilla de 4 mm de separación batería y tubo de refrigeración. ..	79

Anexo 6. Datos obtenidos en plantilla de 2 mm de separación batería y tubo de refrigeración. ..	80
Anexo 7. Contorno de la velocidad en el depósito inferior del banco. ....	81
Anexo 8. Planos y ensamblaje Banco de Pruebas BIL.....	82

**Índice de tablas:**

<b>Tabla 1.</b> Componentes de una BIL. ....	8
<b>Tabla 2.</b> Datos obtenidos en plantilla de 10mm de separación entre tubos de refrigeración y baterías.....	43
<b>Tabla 3.</b> Datos obtenidos en plantilla de 2mm de separación entre tubos de refrigeración y baterías. ....	45
<b>Tabla 4.</b> Datos obtenidos en plantilla de 10mm de separación entre tubos de refrigeración y baterías.....	47
<b>Tabla 5.</b> Parámetros y métrica del mallado. ....	55
<b>Tabla 6.</b> Propiedades térmicas de los materiales. ....	57
<b>Tabla 7.</b> Velocidades iniciales en los tubos de refrigeración.....	58
<b>Tabla 8.</b> Error porcentual.....	65

## Índice de figuras:

<b>Figura 1.</b> Rango de temperatura óptima de operación _____	8
<b>Figura 2.</b> Sistema de refrigeración por aire de la cabina _____	10
<b>Figura 3.</b> Sistema de refrigeración por aire independiente _____	10
<b>Figura 4.</b> Sistema de refrigeración directa. _____	11
<b>Figura 5.</b> Sistema de refrigeración indirecta por líquido Tesla Modelo 3 _____	12
<b>Figura 6.</b> Valores de referencia de los distintos coeficientes de convección ( $hc$ ) _____	13
<b>Figura 7.</b> Capa límite, espesor capa limite. _____	17
<b>Figura 8.</b> Evolución de la capa limite y del comportamiento del fluido. _____	18
<b>Figura 9.</b> Perfil de velocidades de flujos desarrollados laminar y turbulento. _____	18
<b>Figura 10.</b> Capa limite térmica en una placa isotérmica. _____	19
<b>Figura 11.</b> Mallas con nodos centrados en los vértices y en las caras. _____	20
<b>Figura 12.</b> Esquema de (a) las posiciones de las baterías cilíndricas y las tuberías de distribución de _____	25
<b>Figura 13.</b> Esquema del módulo de batería utilizando el tubo de distribución de aire. _____	27
<b>Figura 14.</b> Facultad de Energía las Industrias y los Recursos Naturales no Renovables. _____	28
<b>Figura 15.</b> Diagrama de flujo de la metodología en esta investigación. _____	31
<b>Figura 16.</b> BIL INR 18650-30Q. _____	33
<b>Figura 17.</b> Resistencia tubulares A230713. _____	34
<b>Figura 18.</b> Modelo paramétrico para diferentes disposiciones dibujo en Inventor. _____	34
<b>Figura 19.</b> Base de prototipo de alojamiento de componentes. _____	35
<b>Figura 20.</b> Base de prototipo donde se especifica la distancia de incidencia. _____	35
<b>Figura 21.</b> Mecanizado por medio de CNC. _____	36
<b>Figura 22.</b> Disposición de plantillas. _____	36
<b>Figura 23.</b> Cobertura de dispersión. _____	36
<b>Figura 24.</b> Tubo de refrigeración. _____	37
<b>Figura 25.</b> Tubo de refrigeración con disposiciones. _____	37
<b>Figura 26.</b> Tubos de refrigeración con sus respectivos orificios de refrigeración y ángulos de dispersión. _____	37
<b>Figura 27.</b> Bastidor. _____	38
<b>Figura 28.</b> Bastidor y base. _____	38
<b>Figura 29.</b> Fuente Variable DC (P-3010D). _____	39
<b>Figura 30.</b> Calibración de temperatura de trabajo mediante cámara termográfica. _____	39



<b>Figura 31.</b> Regulador de presión. _____	40
<b>Figura 32.</b> Flujómetro. _____	40
<b>Figura 33.</b> Medición de temperatura ambiente. _____	41
<b>Figura 34.</b> Ubicación de termocuplas. _____	41
<b>Figura 35.</b> Ubicación de termocuplas banco experimental. _____	42
<b>Figura 36.</b> Temperaturas de pruebas. _____	42
<b>Figura 37.</b> Comparativa temperatura 1 y flujo de aire. _____	44
<b>Figura 38.</b> Comparativa temperatura 1 y tiempo. _____	44
<b>Figura 39.</b> Comparativa temperatura 1 y flujo de aire. _____	46
<b>Figura 40.</b> Comparativa temperatura 1 y tiempo. _____	46
<b>Figura 41.</b> Comportamiento de Temperatura Termocupla 1-2. _____	52
<b>Figura 42.</b> Límites del dominio computacional. _____	53
<b>Figura 43.</b> Esquema 3D del banco de baterías refrigerado por aire. _____	55
<b>Figura 44.</b> Mallado del banco: a) dominio del sólido, b) dominio del fluido y c) calidad ortogonal. _____	56
<b>Figura 45.</b> Tipos de zonas de frontera. a) Vista isométrica y b) Vista inferior. _____	58
<b>Figura 46.</b> Residuos de la simulación del banco de baterías. _____	59
<b>Figura 47.</b> Velocidad en el dominio del fluido. _____	60
<b>Figura 48.</b> Curva de velocidad $v$ en el interior de los tubos de refrigeración. _____	60
<b>Figura 49.</b> Velocidad en el orificio inferior: a) Ubicación de la línea de velocidad, b) Velocidad $u$ y c) Velocidad $v$ . _____	62
<b>Figura 50.</b> Temperatura en el banco de baterías: a) Vista isométrica y b) Vista frontal. _____	63
<b>Figura 51.</b> Vectorización del aire: a) Velocidad y b) Temperatura. _____	64
<b>Figura 52.</b> Comparativa de resultados de simulación y experimentales: a) Termocupla 1 y b) Termocupla 2. _____	65

## **Índice de anexos:**

<b>Anexo 1.</b> Certificación de traducción de resumen. ....	74
<b>Anexo 2.</b> Datos obtenidos en plantilla de 10 mm de separación batería y tubo de refrigeración. ....	76
<b>Anexo 3.</b> Datos obtenidos en plantilla de 8 mm de separación batería y tubo de refrigeración. ....	77
<b>Anexo 4.</b> Datos obtenidos en plantilla de 6 mm de separación batería y tubo de refrigeración. ....	78
<b>Anexo 5.</b> Datos obtenidos en plantilla de 4 mm de separación batería y tubo de refrigeración. ....	79
<b>Anexo 6.</b> Datos obtenidos en plantilla de 2 mm de separación batería y tubo de refrigeración. ....	80
<b>Anexo 7.</b> Contorno de la velocidad en el depósito inferior del banco. ....	81
<b>Anexo 8.</b> Planos y ensamblaje Banco de Pruebas BIL.....	82

## Simbología:

SWMCP	Potencia de carga media auto ponderada.
EV	Vehículo eléctrico.
BTMS	Gestión térmica de la batería sistema.
SOC	Estado de carga.
HVAC	Calefacción, ventilación y aire acondicionado.
HEV	Vehículos eléctricos Híbridos.
NYCC	Ciudad de New York.
US06	Ciclo de conducción agresiva de alta aceleración que simula la conducción en autopistas y caminos rurales.
$k$	Conductividad térmica
$\frac{\partial T}{\partial x}$	Gradiente de temperaturas.
$k$	Conductividad térmica ( $\frac{W}{mK}$ ).
$L$	Longitud equivalente( $m$ ).
$\sigma$	Constante de Stefan – Boltmann( $5.67 \times 10^{-8} W / m^2 K^4$ ).
$\varepsilon$	Emisividad.
$\partial V$	Diferencia de volumen.
$\partial m$	Diferencia de masa.
$\frac{\partial T}{\partial t}$	Distribución de temperaturas en el tiempo.
$\rho$	Densidad.
$C_p$	Capacidad calorífica.
$t$	Tiempo.
$\vec{v}$	Vector velocidad.
$\vec{n}$	Vector velocidad.
$p$	Presión del fluido.
$\rho \vec{f}_e$	Conjunto de fuerzas por unidad de volumen.
$\vec{T}$	Vector velocidad.
$\vec{u}$	Velocidad característica.
$\frac{\mu}{\rho}$	Viscosidad cinemática ( $v$ ).
$D$	Longitud característica.
$\mu$	Viscosidad dinámica.

## **1. Título**

**Análisis de la incidencia del ángulo de dispersión y distancia de aplicación de aire en un sistema de refrigeración de baterías de Ion de Litio.**

## 2. Resumen

En el presente trabajo se estudia y emula un prototipo de enfriamiento para un paquete de baterías de iones de litio. El sistema consiste en un banco experimental de 16 cilindros de aluminio (pseudo baterías) con geometría similar a la de las baterías 18650 en cuyo interior se alojan niquelinas, las pseudo baterías están dispuestas en una matriz 4 x 4 en cuyos espacios, inter cilindros, existen tubos con varias toberas de inyección de aire con dirección normal a las pseudo baterías. Este prototipo permite ensayar a diferentes temperaturas de las pseudo baterías, distintas distancias de disposición de las mismas, así como la distancia referente a los tubos de inyección de aire, los cuales, a su vez admiten probar o ensayar con diferentes caudales y ángulos de salida de aire en sus toberas, afectando el ángulo de dispersión y distancia de aplicación del flujo de refrigeración y consecuentemente la eficiencia del sistema de enfriamiento. Se realizó un conjunto de 15 experimentos para definir la configuración más eficiente a la hora de extraer calor del paquete de pseudo baterías. De la fase experimental, la configuración con 28.4 mm de separación entre centros de las pseudo baterías, con toberas de inyección de aire de 1 mm de diámetro, con ángulo de salida de 60° y un caudal promedio de 1.62 l/min es la de mejores prestaciones, manteniendo la menor temperatura de estado estacionario en la pseudo batería de mayor criticidad, ubicada aproximadamente en el centro del arreglo. Identificada la mejor configuración del sistema se procedió a contrastar su funcionamiento mediante una simulación de dinámica de fluidos computacional (CFD), la misma que demostró el correcto funcionamiento del prototipo con resultados de temperatura en el elemento crítico que difieren en un 3.1% de lo experimental. Este banco de pruebas servirá como una herramienta de análisis de esta alternativa de refrigeración relativamente novedosa estudiada principalmente en vehículos eléctricos.

**Palabras claves:** baterías de Ion de Litio, simulación CFD, toberas de enfriamiento, temperatura.

## **Abstract**

In this work, a cooling prototype for a lithium-ion battery pack is studied and emulated. The system consists of an experimental bank of 16 aluminum cylinders ("pseudo-batteries") with a geometry similar to 18650 batteries, inside which nickel strips are housed. The pseudo-batteries are arranged in a 4 x 4 matrix, with tubes containing several air injection nozzles placed in the inter-cylinder spaces and oriented perpendicularly to the pseudo-batteries. This prototype allows testing at different pseudo-battery temperatures, varying distances between them, as well as the distance to the air injection tubes. These tubes, in turn, allow for experimentation with different airflow rates and nozzle outlet angles, influencing the dispersion angle and application distance of the cooling flow, thus affecting the overall efficiency of the cooling system. A total of 15 experiments were conducted to determine the most efficient configuration for heat extraction from the pseudo-battery pack. The experimental phase identified that the optimal configuration includes a 28.4 mm separation between the centers of the pseudo-batteries, air injection nozzles with a diameter of 1 mm, an outlet angle of 60°, and an average flow rate of 1.62 l/min. This configuration maintained the lowest steady-state temperature in the most critical pseudo-battery, located approximately at the center of the array. After identifying the best configuration, its performance was validated using a computational fluid dynamics (CFD) simulation. The simulation demonstrated the proper operation of the prototype, with temperature results in the critical element differing by only 3.1% from the experimental data. This test bench will serve as an analytical tool for this relatively novel cooling alternative, primarily studied in electric vehicles.

**Keywords:** Lithium Ion batteries, CFD simulation, cooling nozzles, temperature.

### 3. Introducción

Los sistemas de baterías más comunes en la actualidad son los de iones de litio y de plomo-ácido. Sin embargo, ambos sistemas enfrentan desafíos y limitaciones que requieren una mejor solución. Las baterías de iones de litio (BIL) se utilizan en una variedad de dispositivos, como herramientas, artefactos e incluso vehículos eléctricos. Una gran dificultad de su uso es que su funcionamiento depende especialmente de la temperatura. La exposición de BIL a una temperatura superior a 60°C podría causar una combustión espontánea, y en el caso opuesto, con temperaturas bajo cero, la batería se vuelve inestable. Por lo tanto, las BIL deben mantenerse a una temperatura media entre 25°C y 45°C (Pesaran, 2002), (Kizilel et al., 2009).

Ante los efectos de la temperatura en el rendimiento y la vida útil de las baterías, existen diversos estudios enfocados en evaluar estrategias de enfriamiento para prevenir el sobrecalentamiento. Estas estrategias incluyen análisis basados en modelamiento matemático, simulaciones numéricas y experimentaciones físicas, donde uno de los principales objetivos es caracterizar y optimizar la generación de calor de las baterías.

Como se mencionó, existen varios estudios sobre esta problemática, pero este tema es relativamente nuevo en el mundo científico y de notable interés en la industria, ya que cada día se producen nuevos equipos con potencias considerables que incluyen baterías, lo que facilita su portabilidad y autonomía. Estos estudios proponen distintas configuraciones de enfriamiento, que pueden ser activas o pasivas, con fluido líquido o gaseoso, individuales o en bloques, con flujo natural o forzado, entre otros. En estos estudios se evalúa cada configuración y se proponen soluciones, optimizando costos y la operación térmica de la batería.

A nivel local, en la carrera de Ingeniería Electromecánica de la Universidad Nacional de Loja, actualmente se está desarrollando el proyecto de investigación denominado “Evaluación numérica de estrategias de enfriamiento de un módulo de baterías de iones de litio para la prevención del sobrecalentamiento”. Surgiendo la necesidad de proponer mejoras sobre alternativas estudiadas e incluso nuevas formas de enfriamiento.

En este caso, como aporte a este proyecto de investigación, se propone mejorar un sistema estudiado por Jahanpanah et al., (2023), Contreras Gallardo, (2017), Zhang et al., (2020), los cuales forman parte de las diversas propuestas sobre sistemas de refrigeración mediante tubos de distribución de aire inter-baterías de un paquete. En estos estudios se realizan comparativas a diferentes temperaturas y velocidades de flujo de aire bajo condiciones de circuitos de conducción de vehículos eléctricos. Sin embargo, no se aborda la influencia del ángulo de salida de aire, similar a una tobera, ni los efectos de la distancia entre las baterías y las salidas de aire.

En el presente estudio, se presta atención a estas limitaciones para conocer y caracterizar los

efectos sobre la capacidad de disipación de calor de la disposición de las baterías e inyección interna de aire refrigerante en un paquete de baterías de pruebas.

El objetivo general del presente trabajo es Implementar un banco experimental de un sistema de refrigeración de BIL mediante tubos de distribución de aire inter-baterías para analizar la incidencia de la sección de cobertura del refrigerante.

Los objetivos específicos son los siguientes:

- Estudiar trabajos sobre refrigeración de BIL mediante tubos de distribución de aire inter-baterías, con fines de determinar las condiciones operacionales y experimentales de las baterías y los sistemas de enfriamiento.
- Diseñar y construir un banco experimental de refrigeración de BIL mediante tubos de distribución de aire inter-baterías con sección cobertura de refrigerante variable.
- Realizar experimentación sobre varias condiciones de enfriamiento de las BIL para establecer las condiciones de mejor operatividad térmica.
- Validar los resultados mediante Simulación CFD.

Para el desarrollo del proyecto se propone diseñar y construir un banco experimental para realizar ensayos de refrigeración de BIL mediante diferentes espaciamentos entre baterías y diferentes flujos de aire entre ellas. Para emular las baterías en descarga, situación que genera calor, se propone utilizar cilindros de aluminio con geometría similar a la de la batería INR 18650-30Q en cuyo interior se alojan niquelinas de calentamiento controlado. El banco de pruebas se complementa con simulaciones numéricas y mediciones termográficas que permiten analizar la información de forma más objetiva con fines de establecer las mejores condiciones de operación del sistema de refrigeración.

En cuanto al contenido del presente documento, se lo ha dividido en 4 apartados principales. El primero, contiene contexto científico necesario para conceptualizar el objeto de estudio y los procesos de transferencia de calor y masa asociados, además, se expone un breve estado del arte sobre el sistema de enfriamiento de baterías, revelando la importancia del tema propuesto, así como los enfoques y metodologías utilizados en su estudio.

En el segundo apartado se presenta la metodología adoptada, detallando el modelado paramétrico del prototipo de pruebas, su proceso constructivo, la implementación de los componentes complementarios, la fase de pruebas, la toma de datos, la comparación entre metodologías de análisis y el procesamiento de información.

El tercer apartado contiene los resultados. Aquí se describe la confección del prototipo en sus



diferentes fases, las condiciones experimentales, los procesos de capturas de contornos de temperatura con termografía, el proceso de simulación y la comparación de resultados entre las diversas estrategias utilizadas.

Finalmente, se expone el apartado de discusión y conclusiones donde se contrasta los resultados con la bibliografía consultada, así como con las diferentes técnicas y metodologías de obtención de datos y de análisis del prototipo propuesto.

## 4. Marco teórico.

### 4.1 Batería ion litio.

Una batería eléctrica (Ion Litio), también llamada pila o acumulador eléctrico, es un artefacto compuesto por celdas electroquímicas, capaces de convertir la energía química en su interior en energía eléctrica. Así, las baterías generan corriente continua, de esta manera, sirven para alimentar distintos circuitos eléctricos, dependiendo de su tamaño y potencia (Barrón & Arellano, 2022).

En la actualidad las baterías son parte de un creciente mercado que mueve billones de dólares, hay un estimado en el mercado de las baterías de ácido plomo alcance el orden de los 70.1 mil de millones de dólares para el 2023 mientras que las baterías de litio deberán alcanzar los 105 mil millones de dólares para el 2025 (Quintero, 2021).

### 4.2 Tipos de batería de ion de litio.

En el siguiente apartado (*Lumieres - Repositorio institucional Universidad de América: Diseño de un sistema de gestión térmica para el sistema de alimentación por baterías de litio en un kart eléctrico*, s. f.), se afirma estas baterías se clasifican según el tipo de agentes aleantes utilizados para la fabricación del cátodo de éstas, ya que el material del ánodo suele ser grafito. Debido a que el litio por sí solo es un material algo inestable, tal como se puede apreciar en su respectiva evolución histórica.

Los materiales utilizados para las aleaciones varían de acuerdo a la aplicación y necesidad energética a resolver, **Tabla 1**, junto con factores asociados a costos, seguridad, rendimiento, vida útil, energía y potencia específica. Cada tipo de batería de ion de litio se representa con un código de tres letras, donde la primera letra, en la mayoría de ocasiones corresponde a la letra L, haciendo referencia al litio, o N, cuando el aleante principal es el níquel, material altamente compatible con varios tipos de baterías; y las otras dos letras varían de acuerdo con los elementos aleantes asociados a la fórmula química característica de cada clase.

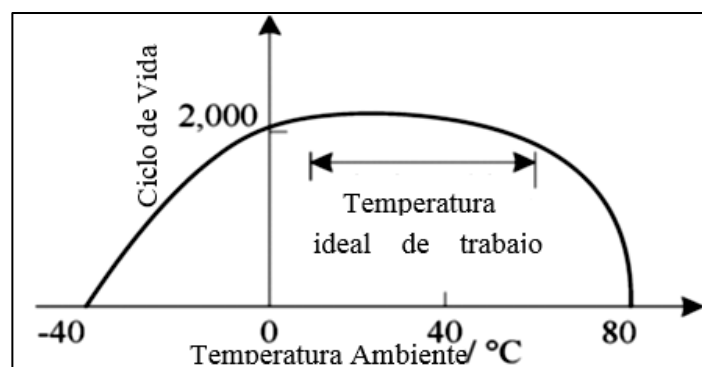
**Tabla 1.** Componentes de una BIL.

Fuente: BU-205, (2010)

TIPO DE ALEANTE	FÓRMULA QUÍMICA	DESIGNACIÓN TÉCNICA	AÑO DE CREACIÓN	PUNTO FUERTE	USOS COMUNES
Óxido de cobalto.	LiCoO2	LCO	1991	Energía Específica.	Dispositivos electrónicos.
Óxido de magnesio.	LiMn2O4	LMO	1996	Energía Específica.	Dispositivos médicos.
Óxido de níquel, cobalto y magnesio.	LiNiMnCoO2	NMC	2008	Propiedades balanceadas.	Bicicletas eléctricas y equipos de baja potencia.
Fosfato de hierro.	LiFePO4	LFP	1996	Potencia y vida útil.	Motores eléctricos y fuentes de poder.
Óxido de níquel, cobalto y aluminio.	LiNiCoAlO2	NCA	1999	Energía Específica.	Motores eléctricos (Panasonic) industrial.
Titanato de lito	Li2TiO3	LTO	2008	Performance y Seguridad.	Motores eléctricos de baja potencia.

### 4.3 Problemas térmicos en las baterías ion litio.

Según, Contreras Gallardo, (2017), en el funcionamiento de las baterías se presenta el inconveniente de la temperatura y almacenamiento de las celdas, teniendo como principales variables que afectan, la vida útil y seguridad de las baterías. Temperaturas bajo y sobre las recomendadas por el fabricante, thermal runaway, temperatura no-homogénea entre las celdas y pérdida de capacidad, son problemas térmicos que deben ser evitados, para que la batería funcione en un rango óptimo (Valdés Mery, 2015). Adicional se recomienda que los rangos de operación estén entre 24°C y 45 ° C. (ver **Figura 1**), y que la diferencia de temperatura entre las celdas del empaquetamiento no supere los 5°C.



**Figura 1.** Rango de temperatura óptima de operación

Fuente (Contreras Gallardo, 2017).

#### 4.3.1 Baja temperatura de operación.

Con la ley de Faraday (*Explicación de los términos de la batería de iones de litio*, s. f., 2024),

se denota que, a bajas temperaturas, la capacidad de carga/descarga disminuye, afectando el desempeño de la batería. A temperaturas bajas, la velocidad con la que los iones de litio pueden ingresar entre las capas de grafito es menor a la velocidad con la que los iones viajan desde el cátodo hasta el ánodo. Generando que los Iones de litio se acumulen en la parte del ánodo creando una película irreversible, disminuyendo la vida útil y capacidad de la batería.

#### **4.3.2 Thermal runaway.**

Una de las desventajas en la operación de las baterías es la creciente subida de temperatura, Según Valdés Mery, (2015), donde al aumentar la temperatura sobre un punto crítico, una serie de reacciones exotérmicas se producen). Condiciones de sobrecarga y sobre descarga, corto-circuitos debido a manufacturas, pueden con llevar a una subida de temperaturas, muy por sobre las condiciones de operación recomendadas por los fabricantes llevando al sistema al Thermal Runaway (Valdés Mery, 2015).

Según, Valdés Mery, (2015), el sobrecalentamiento puede ser causado por corrientes eléctricas excesivas, sobrecarga/sobre descarga o temperaturas externas elevadas. Entre la primera etapa es la descomposición de la interfaz sólida entre el electrolito y el ánodo (SEI, Solid Electrolyte Interphase layer), debido al sobrecalentamiento. La descomposición comienza a una temperatura relativamente baja, 80°C, y una vez que esta capa es traspasada por el electrolito, éste comienza a reaccionar con el ánodo de carbono, en una serie de reacciones exotérmicas que elevan la temperatura aún más alta.

#### **4.4 Sistemas de refrigeración de batería ion de litio en vehículos eléctricos.**

El sistema de refrigeración de la batería es de gran importancia ya que controla los valores de temperatura de estas, influye en el rendimiento, seguridad y durabilidad. Cualquier cambio de temperatura fuera de sus estándares de trabajo puede provocar una disminución de sus prestaciones.

Según, Cunguán Telpis & Ulcuango Novoa, (2023), la batería de los vehículos eléctricos debe funcionar en un rango no superior a los 45° C y tampoco por debajo de los 5°C debido a que hay alteraciones en las reacciones químicas que se producen dentro.

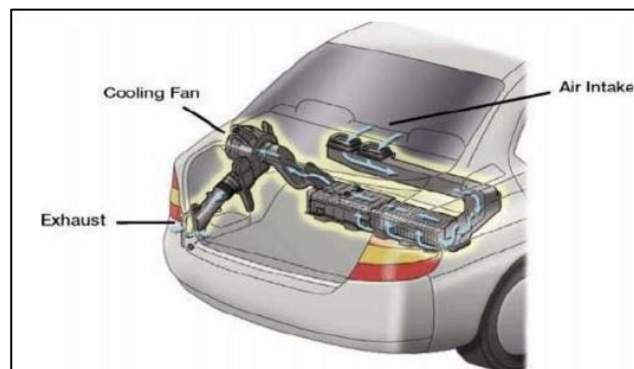
Cunguán Telpis & Ulcuango Novoa, (2023), menciona que el sistema típico de refrigeración de baterías está compuesto por: celda, placa fría e interfaz. Dándole a este diseño la ventaja de poder variar el modelo e incluso poder asociar el rediseño de las placas de refrigeración. La placa comúnmente encontrada que actúa de interfaz está compuesta de láminas de metal estampadas de aluminio, las cuales van soldadas entre sí para formar canales en el interior. La celda de la batería es parecida a un prisma con una delgada carcasa de aluminio; por otro lado, la interfaz entre celdas y la placa fría tienen una idealización de tolerancia de montaje cero.

#### 4.4.2 Tipos de sistemas de refrigeración.

La refrigeración por aire permite, el enfriamiento mediante el recorrido de un flujo de aire sobre las baterías, este flujo de aire puede provenir del exterior o en sistemas más complejos utilizan el flujo adicional del aire acondicionado del habitáculo.

##### 4.4.2.1 Sistema de refrigeración por aire de la cabina.

En este sistema, un ventilador se encarga de extraer el aire de la cabina del vehículo, el cual fluye sobre la superficie y / o a través de los circuitos de refrigeración de la batería y posteriormente sale hacia el exterior del vehículo. Este sistema de refrigeración se la puede encontrar en el Toyota Prius. En este método se emplea el aire pre acondicionado del sistema de refrigeración dentro de la cabina del vehículo para enfriar a la batería como se muestra en la siguiente **Figura 2**.

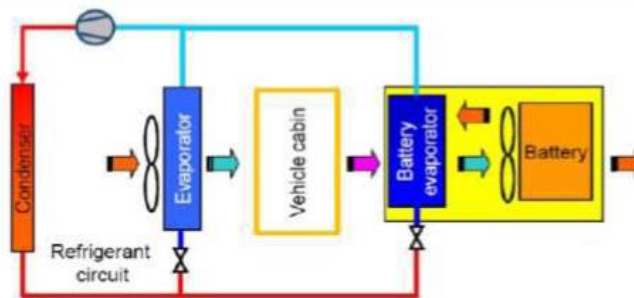


**Figura 2.** Sistema de refrigeración por aire de la cabina  
**Fuente** (Cunguán Telpis & Ulcuango Novoa, 2023b).

##### 4.4.2.2 Sistema de refrigeración por aire independiente.

Este sistema de refrigeración independiente se lo realiza mediante la utilización del aire que se encuentra en la cabina, este es tomado y es transferido al interior del pack de batería el cual seguidamente actúa en la refrigeración.

Para este sistema se emplea la unión del aire pre-acondicionado de la cabina más un evaporador que va enfocado a la batería como se puede observar en la siguiente **Figura 3**.

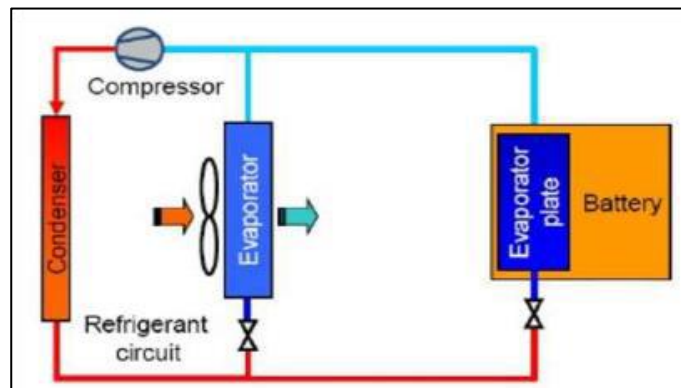


**Figura 3.** Sistema de refrigeración por aire independiente  
**Fuente** (Cunguán Telpis & Ulcuango Novoa, 2023a).

#### 4.4.2.3 Sistema de refrigeración directa.

Este sistema de refrigeración directa funciona por medio de la conexión en paralelo de una lámina de evaporador con el presente evaporador del sistema de aire acondicionado del vehículo. Esta placa del evaporador se encuentra en contacto directo en las celdas de la batería y el calor que producen las celdas de la batería.

En resumen, una placa del evaporador del sistema de aire acondicionado del vehículo va conectado hacia la batería directamente como se muestra en la siguiente **Figura 4**.

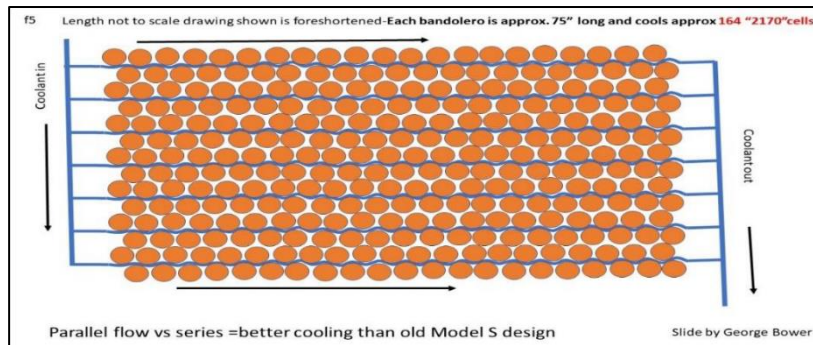


**Figura 4.** Sistema de refrigeración directa.  
**Fuente** (Cunguán Telpis & Ulcuango Novoa, 2023a).

#### 4.4.2.4 Refrigeración indirecta a base de agua y glicol.

La refrigeración con glicol nace como alternativa ecológica a la utilización al 100% de los gases fluorados que causan un gran impacto medioambiental. El glicol (etilenglicol) es un anticongelante para el agua y su uso en instalaciones frigoríficas consiste en utilizar el agua glicolada como fluido secundario para así obtener la mínima carga de refrigerantes tanto fluorados como naturales. Esto no solo es una muy buena medida medio ambiental, sino que también supone un ahorro energético considerable (Bernad, 2018). Este tipo de refrigeración consta de cavidades o ductos en el cual el líquido refrigerante circula para que no exista contacto directamente con las celdas de la batería, esto con el fin de evitar que se produzca cortos circuitos dentro del pack de batería.

En la **Figura 5**, se muestra que la marca de vehículos Tesla ha implementado un sistema de refrigeración de baterías que consiste en un serpentín de tubos de refrigeración ubicados paralelamente por el cual se transporta agua y glicol, estas van pegadas directamente a través de las celdas de la batería, logrando mejorar el enfriamiento de la batería.



**Figura 5.** Sistema de refrigeración indirecta por líquido Tesla Modelo 3  
**Fuente** (Cunguán Telpis & Ulcuango Novoa, 2023a)

#### 4.5 Nociones de transferencia de calor.

La transferencia de calor es un proceso de propagación del calor por distintos sistemas, que se encuentran a distintas temperaturas. Entendiendo el calor como el total de la energía cinética de todos los átomos o moléculas de una sustancia.

Cuando ambos sistemas alcanzan la misma temperatura, la transferencia de calor cesa y se llega a un equilibrio térmico.

Existen tres mecanismos de transferencia de calor:

##### 4.5.1 Conducción.

Se produce cuando hay una transferencia de calor sin transporte de materia entre dos cuerpos en contacto o en el interior del propio cuerpo, debido a la existencia de un gradiente de temperaturas. Es producto de la agitación térmica de fonones (sólidos no metálicos), electrones (sólidos metálicos) o moléculas (fluidos).

La ley de conducción de Fourier para materiales isótropos (conductividad térmica constante) para un caso unidimensional, indica que el flujo de calor es:

$$Q_x = -k \frac{\partial T}{\partial x} \quad (1)$$

Donde:

- ✓  $k =$  conductividad térmica.
- ✓  $\frac{\partial T}{\partial x} =$  gradiente de temperaturas.

##### 4.5.2 Convección.

Transferencia de calor entre un cuerpo y un fluido en movimiento a distintas temperaturas, con transporte de materia. Además, si se produce bajo la presencia de un campo gravitatorio origina corrientes de convección. Se trata de un problema sumamente complejo ya que es necesario realizar

el estudio térmico y fluidodinámico, donde se tienen en cuenta distintos aspectos: la geometría del cuerpo, las características del fluido (viscosidad, densidad, conductividad, capacidad calorífica) y las temperaturas de ambos medios.

Por ello, se suele simplificar esta situación mediante la Ley de enfriamiento de Newton. A través de esta fórmula, se puede calcular de manera sencilla el flujo de calor entre la pared del cuerpo y el fluido en movimiento.

$$Q = h_c A (T_{pared} - T_{fluido}) \quad (2)$$

Siendo:

✓  $h_c = \text{coeficiente de convección} \left( \frac{W}{m^2 K} \right)$

✓  $A = \text{área de la pared} (m^2)$

El coeficiente de convección o coeficiente de película ( $h_c$ ), representa la influencia de las distintas propiedades del fluido y la pared. Su determinación, mediante métodos analíticos es compleja, pero se puede obtener estimaciones por medio de correlaciones de número adimensionales.

$$\text{Número de Nusselt} (Nu) = \frac{h_c L}{k}$$

Siendo:

✓  $k = \text{conductividad térmica} \left( \frac{W}{mK} \right)$

✓  $L = \text{longitud equivalente} (m)$

Para la obtención de manera exacta, es necesario recurrir a ensayos experimentales donde se reproduzcan las condiciones necesarias. Se pueden distinguir dos tipos de convección: natural y forzada. En la convección forzada, el movimiento del fluido es producido por fuerzas exteriores, sin relación con la temperatura del fluido. En cambio, en la convección natural, el flujo es inducido por las fuerzas de empuje producto de las diferencias de densidades por las variaciones de temperatura del fluido, **Figura 6**, (aumento de temperatura implica disminución de densidad).

Coeficiente de convección (W/m <sup>2</sup> K)	
Convección natural (Gas)	2-25
Convección natural (Líquido)	50-1000
Convección forzada (Gas)	25-250
Convección forzada (Líquido)	50-20000
Convección cambio de fase (Ebullición/Condensación)	2500-100000

**Figura 6.** Valores de referencia de los distintos coeficientes de convección ( $h_c$ )  
**Fuente:** (Universidad Politécnica de Valencia, «Convección,» s. f.)



### 4.5.3 Radiación.

Consiste en la transferencia de calor en presencia o ausencia de un medio, a diferencia de los métodos anteriores. Los cuerpos que se encuentran a una temperatura superior a 0 K emiten radiación electromagnética, debido al movimiento térmico de las cargas contenidas en su interior (radiación térmica). La superficie efectiva es la pared exterior del cuerpo, ya que la radiación emitida por el interior del cuerpo no consigue propagarse más allá de los límites del cuerpo. Por tanto, únicamente la superficie exterior es capaz de radiar a otros cuerpos.

La ley de Stefan-Boltzmann permite conocer la potencia máxima ( $W/m^2$ ) emisiva de un cuerpo a una determinada temperatura ( $T_{Superficie}$ ).

$$E = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T_{Superficie}^4 \quad (3)$$

Siendo:

✓  $\sigma = \text{constante de Stefan – Boltzmann } (5.67 \times 10^{-8} W/m^2 K^4)$

✓  $\varepsilon = \text{emisividad}$

La emisividad ( $\varepsilon$ ) es una propiedad radiactiva que relaciona la radiación emitida por una superficie real y la emitida por un cuerpo negro a la misma temperatura. Se denomina cuerpo negro, aquel cuerpo que se comporta como un perfecto emisor, es decir, que emite la máxima potencia emisiva a una determinada temperatura ( $\varepsilon=1$ ).

### 4.5.4 Ecuación fundamental de la transferencia de calor.

La ecuación fundamental de la transferencia de calor permite conocer la distribución de temperaturas en un sistema. Para obtenerla, se supone un elemento diferencial, de un material isótropo, expuesto a un campo de temperaturas, al cual se aplica un balance de energía:

$$Q_{Entrada} + Q_{Saliente} + Q_{Generado} = Q_{Almacenado} \quad (4)$$

$$Q_{Entrada} = Q_x + Q_y + Q_z$$

$$Q_{Saliente} = Q_x + dx + Q_y + dy + Q_z + dz$$

$$Q_{Generado} = q_{Generado} \cdot dV$$

$$Q_{Almacenado} = \rho dV C_p \frac{\partial T}{\partial t} = dm C_p \frac{\partial T}{\partial t}$$

Siendo:

✓  $\partial V = \text{diferencia de volumen}$

✓  $\partial m = \text{diferencia de masa}$

✓  $\frac{\partial T}{\partial t} = \text{distribución de temperaturas en el tiempo}$

✓  $\rho = \text{densidad}$

✓  $C_p = \text{Capacidad calorífica}$

Aplicando la Ley de conducción Fourier y algunas simplificaciones, permite llegar a la ecuación fundamental de la transferencia de calor:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[ k \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ k \frac{\partial T}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ k \frac{\partial T}{\partial z} \right] + q_{\text{Generado}} = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (5)$$

#### 4.6 Mecánica de Fluidos.

La mecánica de fluidos es la rama de la física que las leyes de movimiento y los fenómenos que ocurren cuando interactúan con cuerpos sólidos. Se encuentra estrechamente relacionado con la transferencia de calor, ya que una modificación en la temperatura del fluido puede provocar la salida de reposo de este.

##### 4.6.1 Ecuaciones NAVIER-STOKES.

Las ecuaciones de Navier-Stokes son un conjunto de ecuaciones que permiten describir el movimiento de un fluido, que se encuentra en un determinado volumen ( $V$ ). El fluido debe ser newtoniano, es decir, que su viscosidad se mantenga constante para una determinada temperatura y presión. La obtención de las ecuaciones se basa en el hecho de que el comportamiento dinámico de un fluido está gobernado por las siguientes ecuaciones de conservación:

- ✓ Conservación de la masa o **ecuación de continuidad**: principio fundamental de la mecánica de fluido que afirma que la masa no puede ser creada ni destruida, por lo tanto, la masa de un fluido en un determinado volumen se conserva en el tiempo (MANUEL et al., 2017).

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho dV + \oint_{\partial V} \rho(\vec{v} \cdot \vec{n}) dS = 0 \quad (6)$$

Donde:

✓  $\rho = \text{densidad}$

✓  $t = \text{tiempo}$

✓  $\vec{v} = \text{vector velocidad}$

✓  $\vec{n} = \text{vector velocidad}$

Aplicando el Teorema de Gauss sobre las integrales permite obtener la ecuación de continuidad en forma diferencial.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{v} \rho) = 0 \quad (7)$$

- ✓ Conservación del momento cinético o **ecuación de movimiento**: se hace referencia a la segunda ley de Newton, donde se afirma que la variación del momento es la consecuencia del sumatorio de todas las fuerzas que actúan sobre el fluido (MANUEL et al., 2017).

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho \vec{v} dV + \oint_{\partial\Omega} \rho (\vec{v} \cdot \vec{n}) dS = \int_V \rho \vec{f}_e dV - \oint_{\partial V} p \vec{n} dS + \oint_{\partial V} (\vec{T} \cdot \vec{n}) dS \quad (8)$$

Donde:

- ✓  $p =$  presión del fluido
- ✓  $\rho \vec{f}_e =$  conjunto de fuerzas por unidad de volumen
- ✓  $\vec{T} =$  vector velocidad

Empleando de nuevo el Teorema de Gauss (Teorema de divergencia), como la ecuación de conservación anterior, para transformarla en forma diferencial.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{V}) = -\nabla p + \mu \nabla^2 \vec{v} + \rho \vec{f}_e \quad (9)$$

El primer término de la ecuación hace referencia a la variación temporal de cantidad de movimiento y el segundo, al flujo convectivo de cantidad de movimiento. El segundo miembro representa las fluctuaciones de cantidad de movimiento causadas por la diferencia de presiones, los efectos de las fuerzas másicas por unidad de volumen y los esfuerzos viscosos en el movimiento.

- ✓ Conservación de la energía: se trata de la primera ley de la termodinámica, que establece que la energía no puede ser creada ni destruida, solo se transforma.

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho E dV + \oint_{\partial\Omega} \rho E (\vec{v} \cdot \vec{n}) dS = \int_V (\rho \vec{f}_e \cdot \vec{v} + \dot{q}_h d\Omega + \oint_{\partial V} k (\vec{V} T \cdot \vec{n}) dS + \oint_{\partial V} (\vec{T} \cdot \vec{v}) \vec{n} dS \quad (10)$$

Donde:

- ✓  $E =$  energía total por unidad
- ✓  $\dot{q}_h =$  generación por unidad de masa

Aplicando el Teorema de Gauss, como en las ecuaciones de movimiento y continuidad, para obtener la forma diferencial.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho E) + \nabla \cdot (E \vec{v}) = \nabla \cdot (-p \vec{v}) + \nabla \cdot (\tau \cdot \vec{v}) - \nabla \cdot (k \nabla T) + \rho \vec{f}_e \cdot \vec{v} + \rho \dot{q}_h \quad (11)$$

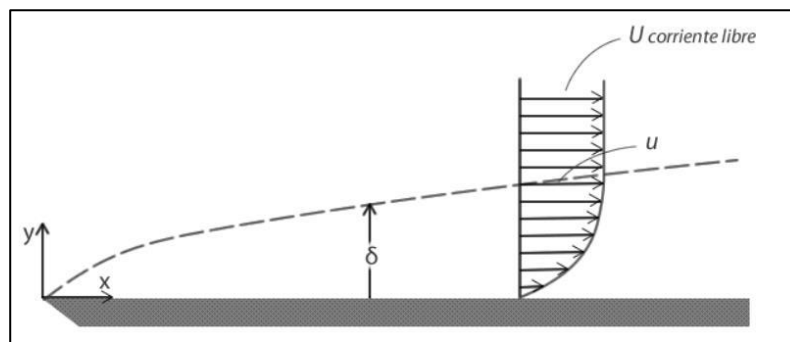
El primer miembro de la ecuación hace referencia a la variación de energía total por unidad de volumen y el flujo convectivo de energía. Por otro lado, el segundo miembro expresa distintos trabajos por unidad de volumen y tiempo, además de la generación calor por unidad de volumen. Las ecuaciones obtenidas se encuentran expresadas de forma integral y diferencial, cuyo uso depende del

problema estudiado. Por un lado, la forma diferencial se emplea para la descripción de un campo de fluidos completo, en cambio, la forma integral de las ecuaciones suele aplicarse para la obtención de magnitudes resultantes en el volumen de control (A. M. Domingo, *Apuntes de Mecánica de Fluidos*, 1997. - *Buscar con Google*, s. f.), (MANUEL et al., 2017)

#### 4.6.2 Capa límite, flujo laminar y turbulento

Durante el análisis del comportamiento de un fluido es importante conocer la influencia de las fuerzas de inercia y viscosas en el movimiento, **Figura 7**.

La mayoría de los fluidos viscosos pueden ser estudiados en dos regiones distintas. La primera, denominada capa límite, se trata del flujo más cercano a la pared del sólido, donde es necesario considerar los efectos viscosos del fluido. El resto del flujo, que se encuentra fuera de la capa límite, los efectos viscosos son prácticamente despreciables y el fluido se puede estudiar como un flujo no viscoso. Es importante tener en cuenta, que el punto del fluido en contacto con la superficie su velocidad es nula.



**Figura 7.** Capa límite, espesor capa límite.

**Fuente.** (Bono, 1989)

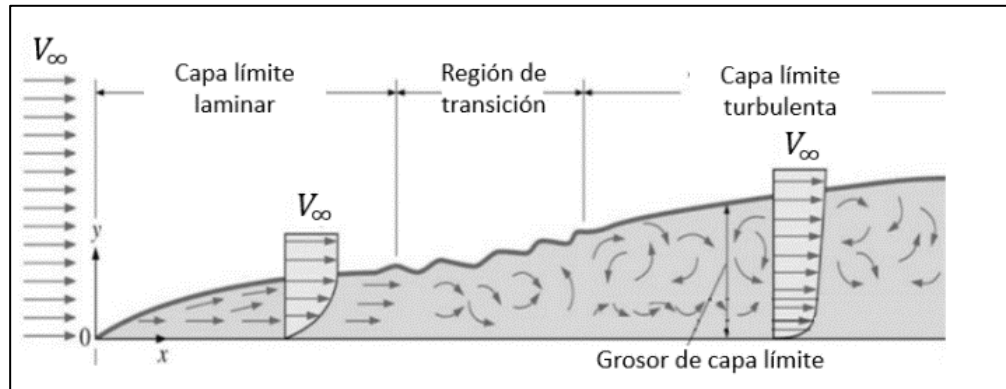
Para la caracterización del flujo, que se encuentra en el interior de la capa límite, se emplea el **número de Reynolds**. Se trata de un número adimensional resultado de la relación de las fuerzas de inercia y viscosas de las ecuaciones de Navier-Stokes, resultando:

$$Re = \frac{\rho \bar{u} D}{\mu} = \frac{\bar{u} D}{\nu} \quad (12)$$

Donde:

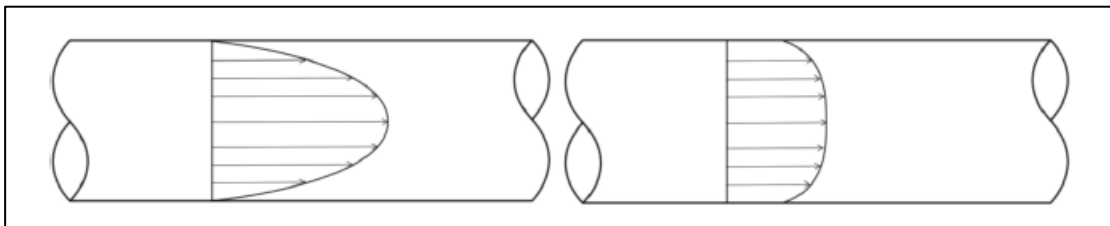
- ✓  $\bar{u}$  = velocidad característica
- ✓  $\rho$  = densidad del fluido
- ✓  $\frac{\mu}{\rho}$  = viscosidad cinemática ( $\nu$ )
- ✓  $D$  = longitud característica
- ✓  $\mu$  = viscosidad dinámica

De forma experimental, se observa que para números de Reynolds menores de 2000-2400 (depende de diversos factores como la rugosidad de la pared, el gradiente de presión o la transferencia de calor) el movimiento del flujo es **laminar**, es decir, predominan las fuerzas de rozamiento. En cambio, para valores superiores del número de Reynolds, se denomina flujo **turbulento**, ya que tiene una mayor influencia las fuerzas de inercia respecto de las de rozamiento, **Figura 8**.



**Figura 8.** Evolución de la capa límite y del comportamiento del fluido.

En un tubo, se denomina flujo desarrollado cuando las velocidades describen un perfil de velocidades constante. Dependiendo del número de Reynolds, puede existir flujo desarrollado laminar o turbulento, **Figura 9**.



**Figura 9.** Perfil de velocidades de flujos desarrollados laminar y turbulento.

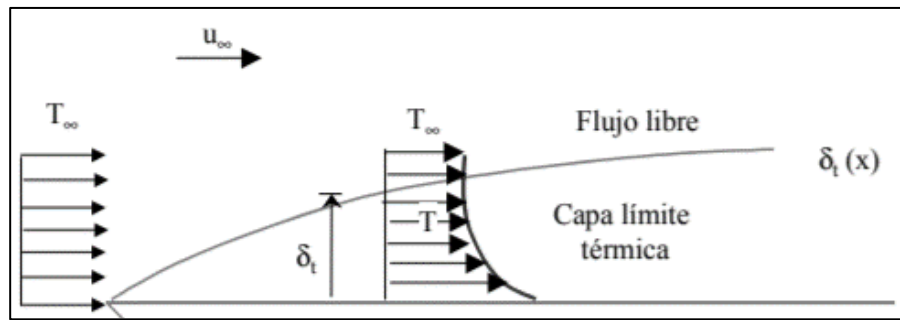
El flujo laminar describe un perfil parabólico, en cambio, el flujo turbulento es más uniforme en la zona central, debido al elevado transporte de cantidad de movimiento en sentido transversal (MANUEL et al., 2017).

#### 4.6.3 Capa límite térmica.

En el análisis de fluidos, el estudio térmico es vital importancia debido a que, tanto los valores de la densidad como la viscosidad de flujos compresibles, se ven afectados por la temperatura.

Al mismo tiempo, que se desarrolla una capa límite de velocidad también se forma una capa límite térmica. Si se analiza para una pared isotérmica: el fluido en contacto directo con la superficie (velocidad nula) tendrá una temperatura en equilibrio igual a la de la superficie, mediante conducción. De forma análoga a las velocidades, las partículas van transmitiendo la energía de unas a otras, dando lugar a un perfil donde la temperatura evoluciona desde la que presenta el fluido

externo hasta la temperatura propia de la superficie, **Figura 10**.



**Figura 10.** Capa límite térmica en una placa isotérmica.

#### 4.7 Dinámica de fluidos computacional CFD.

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 principal objetivo es la resolución de las ecuaciones de conservación (Navier-Stokes) que determinan el estado termodinámico de un fluido, para unas determinadas condiciones. Además, la solución analítica no siempre es posible, debido a la complejidad de problemas reales, por ello, es necesario la utilización de métodos numéricos.

Un programa de CFD emplea métodos numéricos con el fin de aproximar funciones por medio de un polinomio. Además, se aplica una serie de algoritmos para hacer converger la solución. Cuanto mayor sea el grado del polinomio empleado y menor el número de iteraciones necesarias para la convergencia, menor será el error cometido.

Para poder llevar a cabo la simulación, hay que realizar una discretización espacial del dominio estudiado y del tiempo, si se trata de una situación transitoria. Este proceso consiste en la división del espacio en distintas unidades, formando una malla

Se pueden diferenciar dos tipos de mallados:

- **Estructurados:** cada punto de la malla está identificado por los índices  $(i,j,k)$  en coordenadas cartesianas. Las celdas son cuadriláteros bidimensionales y hexaedros tridimensionales. También, pueden clasificarse en ortogonales o no ortogonales, si las líneas que forman las distintas celdas forman  $90^\circ$  o no.
- **No estructurados:** los puntos de la malla no tienen un orden establecido y, por lo tanto, los puntos cercanos a uno dado no pueden identificarse directamente por los índices. Las celdas son cuadriláteros y triángulos bidimensionales y tetraedros y hexaedros tridimensionales. El tiempo requerido por el ordenador para realizar esta

metodología es mucho menor que para un mallado estructurado, pero necesitan una mayor memoria.

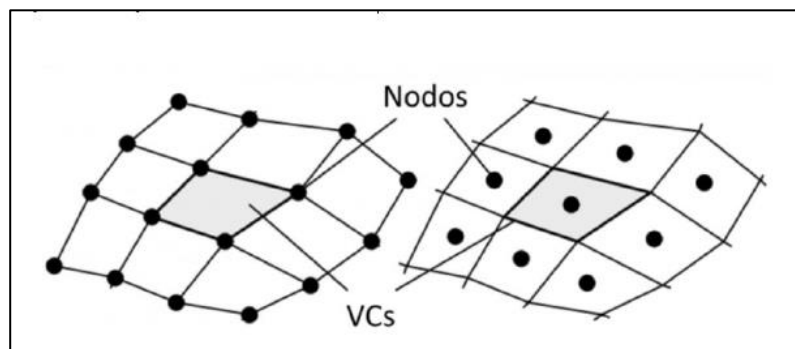
Dependiendo del método de discretización de las ecuaciones empleado, se emplea un tipo de mallado u otro. Existen tres tipos de discretización: método de diferencias finitas, método de elementos finitos y método de volúmenes finitos.

#### 4.7.1 Método de volúmenes finitos (fvm)

El método de volúmenes (Finite Volume Method) fue introducido en 1970 por McDonald, MacCormack y Paullay, como alternativa a los métodos ya existentes (método de diferencias finitas y método de elementos finitos).

Este método se basa en la formulación de las ecuaciones integrales de conservación (Navier-Stokes) para cada volumen de control, previamente generado en el mallado del dominio. El mallado es muy flexible, pudiendo ser (estructurado y no estructurado), permitiendo su uso en geometrías muy complejas.

Posteriormente, se obtiene la solución discreta para los puntos de control de cada volumen, por ello, cuanto mayor sea la precisión requerida mayor tendrá que ser el refinado de la malla. Los puntos de control, donde se guardan los valores obtenidos, pueden situarse en los vértices de cada celda o en el centro de estas, **Figura 11**, esta última opción es la aplicada por ANSYS Fluent.



**Figura 11.** Mallas con nodos centrados en los vértices y en las caras.

El método de diferencias finitas presenta problemas en la transformación entre sistemas de coordenadas. Sin embargo, el método de volúmenes finitos no se encuentra con ese inconveniente, ya que realiza la discretización directa en el espacio del problema.

Además, en determinadas condiciones, el método de volúmenes finitos se comporta como el método de diferencias finitas. En consecuencia, es uno de los métodos más empleados, a pesar de los avances producidos en la implementación de códigos utilizados en el método de elementos finitos

#### 4.8 Estado del arte sistemas de enfriamiento de BIL.

Un tema relacionado a la transferencia de calor de las baterías de los automóviles eléctricos,

es cómo o a través de qué manera se puede hacer un sistema de refrigeración de las baterías, dado que debido a las altas intensidades a las que están sometidas, provoca un aumento notorio de la temperatura en su estructura física, es decir más intensidad mayor temperatura, es de recalcar que prácticamente la batería es el corazón de un vehículo eléctrico en el cual (Tacuri, 2018).

El calor generado al interior de la celda puede tener varias causas, estas se presentan a continuación:

- Reacción entre electrolito y ánodo.
- Descomposición térmica del electrolito
- Reacción entre electrolito y cátodo.
- Descomposición térmica del ánodo.
- Descomposición térmica del cátodo.
- Cambio de entropía en el material activo del cátodo o el ánodo.
- Corriente fluyendo a través de una celda con resistencia interna.

Por lo general se tiene que la causa predominante en la generación de calor dentro de la batería resulta ser el flujo de corriente de aire a través de ella, el cual dada su resistencia interna produce disipación de energía en forma de calor, como se muestra en la siguiente ecuación (Moser Kahl, 2015).

$$Q_{celda} = R_{cell} \cdot I^2 \quad (13)$$

Donde:

- $Q_{celda}$  = *el calor generado por la celda.*
- $R_{cell}$  = *la resistencia eléctrica interna de la celda.*
- $I$  = *Intesidad de correinte que pasa por la celda.*

El empaquetamiento de una batería está dado por la distribución geométrica de las celdas, junto con los otros componentes requeridos para el correcto funcionamiento de ésta. El material y el diseño de la caja en que se contendrán las celdas resultan ser factores relevantes tanto por razones de seguridad, en caso de un desperfecto, como por razones de funcionamiento. Para el diseño de un banco de baterías se deben tener en cuenta un importante número de parámetros definidos por la aplicación para la que se está diseñando. Esto definirá capacidad de almacenamiento, potencia eléctrica, voltaje y otros parámetros. En conjunto con lo anterior, también se debe tener en cuenta las limitaciones económicas y técnicas (Wang et al., 2014).



Un buen diseño del empaquetamiento de una batería resulta crucial, dado que éste definirá su costo y desempeño en la aplicación para la que es diseñado. Cabe destacar que en muchos casos existe una compensación entre las distintas características deseables de una batería.

Dado lo anterior, diseño óptimo de un banco resulta ser una tarea compleja.

Los aspectos que se tratan de resolver por medio de un buen empaquetamiento son los siguientes:

- Aspectos mecánicos.
  - Correcta disipación de calor en la batería, robustez frente a impactos, vibraciones y fallas.
- Aspectos eléctricos.
  - Potencia, voltaje y corrientes adecuados, contactos eléctricos robustos, sistema de control robusto y eficiente.
- Aspectos de diseño.
  - Sistema simple, pequeño, de fácil y segura manipulación.
- Aspectos económicos.
  - Lograr lo anterior manteniendo un precio competitivo, maximizando la vida útil.

En relación a las publicaciones enfocadas en la regulación de temperatura en bancos utilizando aire como refrigerante, el mayor número de estas se enfoca en la modelación computacional del comportamiento del banco utilizando de softwares de fluidodinámica computacional, CFD, acoplados con modelos eléctricos para simular el calentamiento de las celdas, o modelos netamente teóricos, (Wang et al., 2014), (Sun & Dixon, 2014), (Saw et al., 2014), (Li et al., 2013), (Zhu et al., 2013), (Fan et al., 2013), (Contreras Gallardo, 2017), (Zhang et al., 2020) (Jahanpanah et al., 2023), Cabe mencionar que por medio de estas herramientas es posible llegar a resultados que predigan muy bien la realidad, se hace necesario el contraste experimental para dar validez a los resultados.

A continuación, se presenta el trabajo existente a la fecha:

- T. Wang et al., (2014) investiga con CFD del empaquetamiento óptimo de una batería de 24 celdas cilíndricas. Esta optimización la hacen en función de la disposición geométrica de las celdas, la ubicación del ventilador y salida de aire. El objetivo de esta investigación es minimizar las temperaturas máximas de las celdas ( $T_{max}$ ), la máxima diferencia de temperatura a lo largo del banco ( $\Delta T$ ) y la temperatura promedio del banco ( $T_{promedio}$ ), todas estas pruebas en régimen estacionario.

- Sun & Dixon, (2014), efectúa simulaciones mezclando tres tipos de modelos distintos para la optimización y determinación de distintas variables, tales como caída de presión, distribución de temperatura, etc. Dentro de los modelos utilizados está presente el software de CFD Fluent. El trabajo realizado es generado utilizando celdas prismáticas las cuales se encuentran ordenadas una frente a la otra, teniendo como parámetro la distancia entre ellas. El modelamiento se orienta en comportamiento transitorio y estacionario del pack. Cabe destacar que, si bien existe optimización en cuanto a la disposición, la investigación solo abarca dos disposiciones que son las que el autor define como disposición tipo U y tipo Z, siendo la disposición Z la que entrega mejores resultados.
- Según Saw et al., (2014), busca generar un modelo teórico del comportamiento de una batería de celdas cilíndricas utilizando ciclos de descarga de diversos tipos, entre estos (ciclos de descarga) destaca el Simplified Federal Driving Schedule Profile (SFUDS). Dentro de sus conclusiones destaca el descubrimiento de que una potencia de ventilación muy alta puede ser perjudicial para las celdas, si es que estas últimas son las que alimentan a los ventiladores.
- Según Li et al., (2013), su investigación en el control de temperatura de una batería de 24 celdas utilizando CFD (Ansys-Fluent) y la validación de los resultados en un túnel de viento para una disposición simple de 8 celdas. En esta investigación el modelo de CFD utilizado es 2D, por el contrario de las otras. Posteriormente con los resultados crea un modelo para predecir el comportamiento, sin embargo, el modelo tiene errores de predicción de hasta 3°C para algunos casos.
- Según Zhu et al., (2013), en su investigación se dedica al desarrollo de un modelo teórico para la predicción de la temperatura en un banco de 20 celdas prismáticas. Además de la creación de un modelo teórico Zhu et al., (2013), descubre la existencia de que dada una potencia del ventilador, existe siempre un óptimo para el coeficiente de resistencia aerodinámica, que entrega la mayor disipación de energía calórica en el banco, lo cual apunta también a la existencia de un óptimo de ventilación.
- Según Fan et al., (2013) este realiza una investigación paramétrica sobre la separación entre celdas para una batería de 8 celdas prismáticas por medio de un software de CFD. La optimización se realiza bajo la condición de que la separación entre celdas sea igual para todas. Posteriormente se procede a variar el flujo de aire a través de

ellas. El objetivo de la optimización se centra en los criterios de temperatura máxima, promedio y variación de temperatura en la celda.

Esta investigación pretende corroborar los modelos realizados en CFD con datos experimentales, sin embargo, la disposición de las celdas puede ser cambiada fácilmente, permitiendo que en futuras investigaciones la optimización pueda abarcar una amplia gama de parámetros existentes para la generación de las disposiciones.

#### **4.9 Estado del arte sistemas de enfriamiento de BIL inter-baterías mediante tubos de refrigeración.**

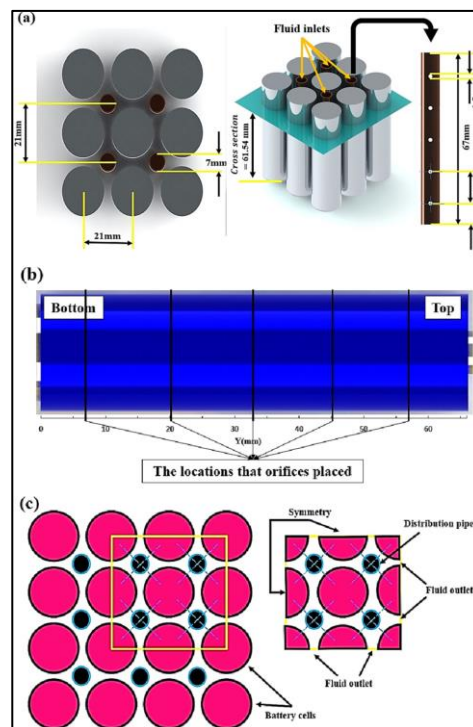
La revisión de la literatura muestra que la evaluación del desempeño de BTMS en condiciones inestables ha recibido una atención muy limitada. Para abordar esta brecha, la investigación actual tiene como objetivo examinar el rendimiento térmico dependiente del tiempo de un módulo de batería de iones de litio 18650 con tubos de distribución de fluido integrados entre las baterías para la distribución uniforme del fluido en la superficie exterior de las baterías.

Se propone un nuevo tipo de sistema de refrigeración que varía con la temperatura de las baterías en diferentes ciclos de conducción.

- En su artículo Jahanpanah et al., (2023), los vehículos eléctricos están sujetos a cargas dinámicas importantes que provocan un calentamiento transitorio de la batería que no se produce en estado estable. Para evaluar la importancia de tales efectos, Jahanpanah et al., (2023), presenta un análisis dependiente del tiempo del proceso de enfriamiento de la batería, basado en un sistema de enfriamiento existente que opera satisfactoriamente en condiciones estables. Para parecerse a condiciones realistas, las variaciones temporales en el consumo de energía de la batería se deducen de diferentes ciclos de conducción estándar. Luego se utiliza la dinámica de fluidos computacional para predecir las temperaturas del refrigerante y de la batería dentro de un módulo de batería durante un período de 900 s. Está demostrado que, para refrigeración por aire, la temperatura de las baterías puede exceder el límite de seguridad. Por ejemplo, en un ciclo de conducción de alto rendimiento, después de 200 s, la temperatura de la batería supera el valor crítico de 308 K. Sin embargo, las temperaturas siempre están dentro de la región segura cuando se utiliza líquido para enfriar el módulo de batería. Además, durante un ciclo de alto rendimiento donde el caudal es de 1.230 g/s, la temperatura de la batería disminuyó por debajo del umbral crítico y alcanzó 304 K. Además, para mantener la temperatura de las baterías por debajo del umbral crítico durante el tráfico NYCC y US06 En ciclos de conducción

se requiere una presión máxima de entrada de refrigerante de 1,52 y 0,848 g/s, equivalentes a 100 Pa y 50 Pa, respectivamente. También se discuten los cambios temporales en la distribución del número de Nusselt sobre el módulo de batería, inducidos por la aceleración del vehículo durante los ciclos de conducción. Se concluye que la suposición de un estado estacionario podría conducir a un diseño no óptimo de los BTMS.

Como se muestra en **Figura 12**, para la distribución del refrigerante alrededor de las celdas de la batería se seleccionó un tubo de distribución con cinco orificios de 1,5 mm de diámetro. Estos son similares a los presentados por Zhou et al., (2019) y podría distribuir el refrigerante por toda la pared de las baterías para reducir la temperatura de manera uniforme. La distribución de tuberías con cinco orificios y un diámetro de 1,5 mm mostró el mejor rendimiento de refrigeración según los resultados de Zhou et al., (2019). Por lo tanto, el flujo de fluido ingresa a la sección superior de las tuberías y fluye a través de los orificios con mayor velocidad, mientras los extremos de las tuberías están cerrados.



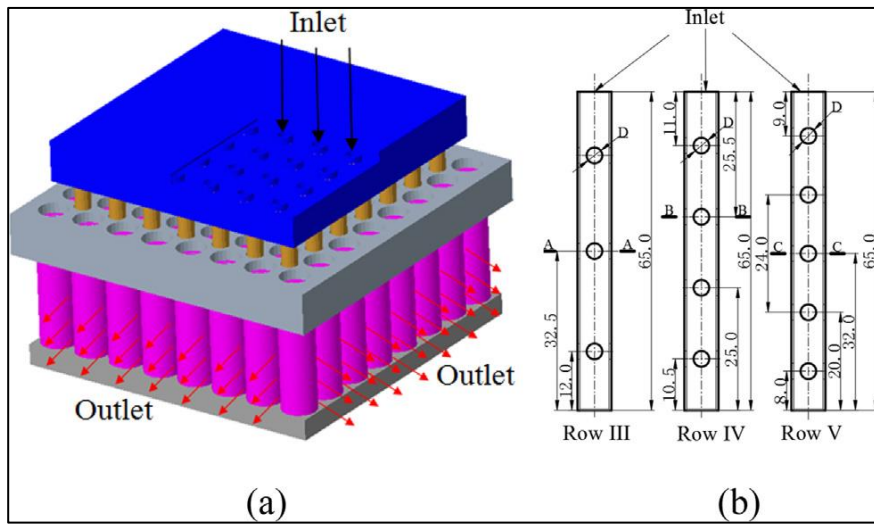
**Figura 12.** Esquema de (a) las posiciones de las baterías cilíndricas y las tuberías de distribución de agua/aire con los orificios (b) La ubicación donde el fluido de enfriamiento entra en contacto con la superficie de la batería a través de los orificios (c) dominio computacional.

**Fuente:** (Jahanpanah et al., 2023)

Otro sistema de refrigeración propuesto que varía cantidad de orificios en el sistema de refrigeración se detalla a continuación:

- En su artículo Zhou et al., (2019) propone una novedosa estrategia de enfriamiento basada en tuberías de distribución de aire para el módulo de batería cilíndrica de iones de litio. El modelo tridimensional de dinámica de fluidos computacional del módulo de batería se construye y valida mediante pruebas experimentales. Se exploró el comportamiento térmico del módulo de batería y el campo de flujo de aire mediante simulaciones numéricas a diferentes velocidades de descarga, y luego se analizaron los efectos de los parámetros del orificio, la presión de entrada y la velocidad de descarga en el rendimiento de la estrategia de enfriamiento del aire. Los resultados muestran que la temperatura máxima del módulo de batería se puede reducir efectivamente mediante el aumento de la presión de entrada, lo que resulta en un aumento significativo del consumo de energía. Mientras tanto, disminuye cuando aumentan el diámetro y el número de filas del orificio, tras un ligero aumento del consumo de energía. Cuando la presión de entrada es de 100 Pa, el diámetro del orificio es de 1,5 mm, el número de filas del orificio es 5 y la velocidad de descarga es de 3 °C, la temperatura máxima del módulo de batería disminuye de 325,9 K a 305,7 K en comparación con la baja ninguna condición de refrigeración por aire. Además, la diferencia de temperatura máxima del módulo de batería está dentro de 3 K. Cuando el módulo de batería se descarga a la velocidad actual de 4 C y 5 C, la temperatura máxima del módulo de batería se mantiene dentro de 313,15 K, pero la diferencia de temperatura excede ligeramente el rango óptimo en Descarga de 5C cuando la presión de entrada es de 200 Pa, el diámetro del orificio es de 1,5 mm y el número de filas del orificio es 5. Además, es una estrategia de enfriamiento eficiente y práctica sin necesidad de modificar la disposición de la batería. módulo.

La batería cilíndrica 18,650 se usa ampliamente en el módulo de batería compuesto por la conexión de múltiples baterías como se muestra en **Figura 13a**. El diseño del módulo de batería es popular en muchas empresas de paquetes de baterías. Con base en este diseño, en este estudio se aplicó la tubería de distribución de aire. Los parámetros de estructura de la tubería de distribución de aire se muestran en **Figura 13b**. Los orificios están dispuestos uniformemente a lo largo de la dirección axial de la tubería, se plantean tres tipos de colocación de orificios con un número de filas 3, 4 y 5 en la tubería y el diámetro del orificio se establece en 1 mm, 1,5 mm y 2 mm respectivamente. El aire entra por la entrada de la tubería y sale por los orificios que sella el extremo de la tubería en el estudio. El diseño propuesto no está abierto al ambiente con alta temperatura ambiental. Si el módulo de batería funciona en ambientes calurosos (verano), la temperatura del aire de entrada debe controlarse mediante equipo de refrigeración (Hong et al., 2018).

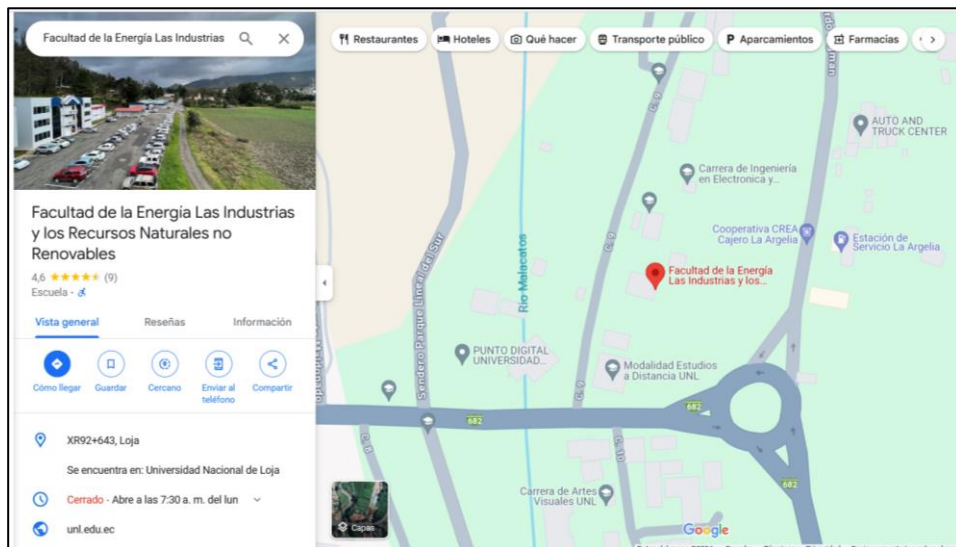


**Figura 13.** Esquema del módulo de batería utilizando el tubo de distribución de aire.

## 5 Metodología

### 5.1 Área de estudio.

El área de estudio considerada en nuestro proyecto encuentra emplazada en la Facultad de la Energía las Industrias y los Recursos Naturales no Renovables de la Universidad Nacional de Loja en la latitud.  $-4.03575^{\circ}$  o  $4^{\circ} 2' 9''$  sur; longitud.  $-79.20166^{\circ}$  o  $79^{\circ} 12' 6''$  oeste; Altitud. 2,200 metros, en la Ciudad Universitaria Guillermo Falconí E. cuya dirección es: Av. Pio Jaramillo Alvarado, Loja 110103. En la **Figura 14** se muestra un mapa de la ubicación del área de estudio.



**Figura 14.** Facultad de Energía las Industrias y los Recursos Naturales no Renovables.

Así mismo, es importante mencionar los materiales, equipos y recursos empleados en el presente proyecto, los mismos que son:

#### **Materiales:**

- Banco de pruebas BIL.

#### **Recursos tecnológicos:**

En este contexto se utilizará herramientas como:

- Cámara térmica (NOYafa HF-521).
- Flujoímetros (OHMEDA AHE-L10326).
- Anemómetro (UNI-T UT363).
- Instrumentos de medición eléctrica.
  - (ESP-WROOM-32).
  - (P-3010D)
- Instrumentos de medición para ambiente.
  - FIELDPIECE SDP2.

Por medio de estos dispositivos se visualizará las condiciones como:

- Flujo de aire.
- Velocidad de aire.
- Capacidad de disipación de calor mediante los tubos de refrigeración.
- Consumos energéticos del sistema planteado.
- Temperatura ambiente en diferentes áreas del prototipo.

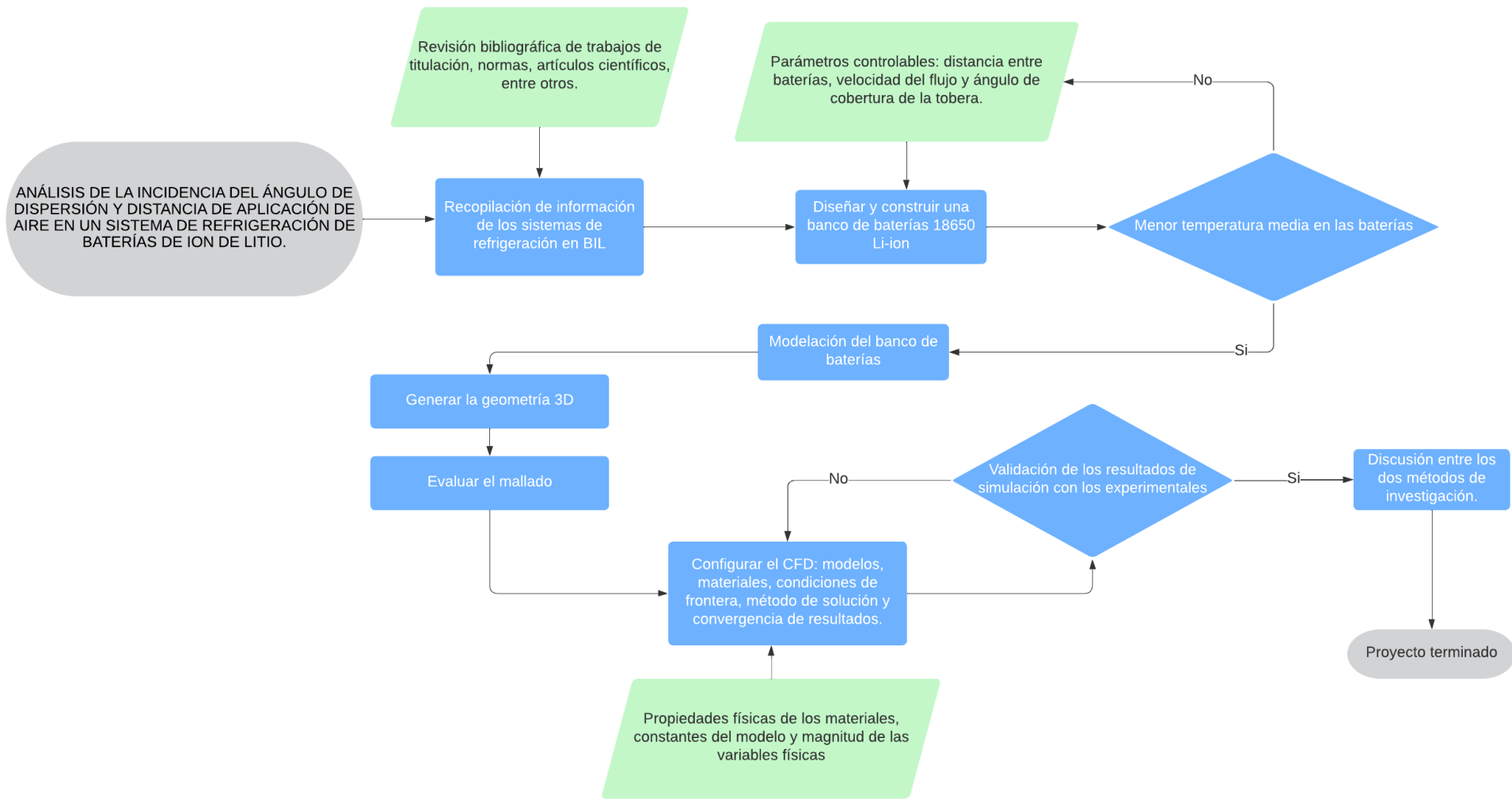
## **5.2 Procedimiento.**

La metodología de trabajo propuesta para dar fiel cumplimiento a los objetivos es:

- ✓ Consultar, organizar y sintetizar información teórica referente a los sistemas de enfriamiento BIL. La información proveniente especialmente de libros y textos académicos relacionados a transferencia de calor y sistemas de enfriamiento de BIL, permitirá comprender de mejor manera el fenómeno en estudio para distinguir sus parámetros y comportamientos característicos inherentes.
- ✓ Consultar, organizar y resumir información proveniente de estudios, artículos científicos, sobre diseño, simulaciones y experimentación de sistemas de enfriamiento de BIL, por medio de tubos y toberas para el análisis de la incidencia del ángulo de dispersión y distancia de aplicación de aire.
- ✓ La información de revistas especializadas, servirá, a más de establecer el estado del arte, para definir aspectos de la simulación de BIL a desarrollar, tales como: geometría del dominio computacional, tipo, estructura y densidad del mallado, modelo de turbulencia y métodos de solución.
- ✓ Definir y diseñar un banco de experimental que incluya cilindros similares a la geometría de las baterías 18650 Li-ion con capacidad de:
  - Incrementar su temperatura controladamente mediante insertos de niquelinas simulando sus rangos operacionales.
  - Variar la posición entre las baterías afectando la distancia de aplicación de fluido refrigerante desde los agujeros de salida de aire.
  - Intercambiar los ángulos de dispersión de los agujeros de salida de aire similar a una tobera.
  - Obtener información de interés como: temperatura de los cilindros (pseudo baterías), temperatura y flujo de aire refrigerante, entre otros.



- ✓ Definir los niveles de las variables involucradas, temperatura, velocidad del flujo (Aire), ángulo de cobertura de la tobera, distancia entre baterías y respecto a la tobera, Temperaturas de las baterías, temperatura del aire.
- ✓ Configurar las simulaciones de la BIL bajo las condiciones de enfriamiento propuesto:
  1. Generar la geometría 3D del banco de baterías.
  2. Evaluar el mallado.
  3. Configurar el CFD:
    - 3.1 Definir los modelos:
      - De viscosidad: laminar, k-épsilon, k-omega, transición k-kl-omega, transición SST, entre otros.
        - Precisar las constantes del modelo.
      - De energía.
    - 3.2 Establecer los materiales en el fluido y los sólidos.
    - 3.3 Definir las condiciones de frontera en dependencia de la variable física (velocidad, presión, temperatura, entre otros).
    - 3.4 Seleccionar el método de solución.
    - 3.5 Análisis del criterio de convergencia en los resultados por iteraciones o residuales.
  4. Post-procesamiento de los resultados mediante gráficas, tablas y evaluación de variables en puntos específicos.
  5. Validación de los resultados de simulación con los datos experimentales.
- ✓ Discutir y concluir sobre los diversos resultados obtenidos y la aplicabilidad del sistema de refrigeración para posibles aplicaciones reales.
- ✓ Discutir con otro sistema de enfriamiento de BIL similares.



**Figura 15.** Diagrama de flujo de la metodología en esta investigación.

## 6 Resultados.

### 6.1 Proceso constructivo de prototipo.

El presente apartado expone el diseño conceptual del banco experimental para pruebas de enfriamiento de las baterías. Se detallan las diversas partes y su funcionamiento. El enfoque conceptual consiste en describir cada sistema, parte y pieza de acuerdo a la necesidad operacional del prototipo a diseñar. Se resalta que las baterías de iones de litio (BIL) dependen especialmente de la temperatura y la exposición de ellas a una temperatura superior a 60°C podría causar una combustión espontánea, y en el caso opuesto, con temperaturas bajo cero, la batería se vuelve inestable. Por lo tanto, las BIL deben mantenerse a una temperatura media entre 25°C y 45°C, esto justifica el estudio del presente sistema.

En los estudios realizan comparativas a diferentes temperaturas y velocidades de flujo de aire bajo condiciones de circuitos de conducción de vehículos eléctricos (Jahanpanah et al., 2023), (Zhou et al., 2019). Dentro de las variables principales están, el flujo másico de aire, la distancia entre orificios, cantidad de agujeros, diámetro de los agujeros. A través de esta investigación, se busca no solo comprender la estructura física del banco de baterías, sino también destacar la importancia de las consideraciones de diseño para el desarrollo de soluciones.

Dentro del diseño y funcionamiento del BIL se ha adoptado múltiples componentes tomados de algunos estudio como los expuestos en el estudio del arte expuestos por Jahanpanah et al. (2023), Zhou et al. (2019). Se propone diseñar y construir un banco experimental para realizar ensayos de refrigeración mediante diferentes espaciamientos entre baterías y diferentes flujos de aire de enfriamiento.

Los componentes principales son:

- Barras cilíndricas (tomado de modelo batería 18650, experimental).
- Resistencias tubulares 350 W 220 VAC.
- Bases desmontables con diferentes opciones de configuración.
- Tubos de refrigeración con agujeros equidistantes.
- Bastidor inferior.
- Fuente variable DC (P-3010D).
- Instrumentación para medición.

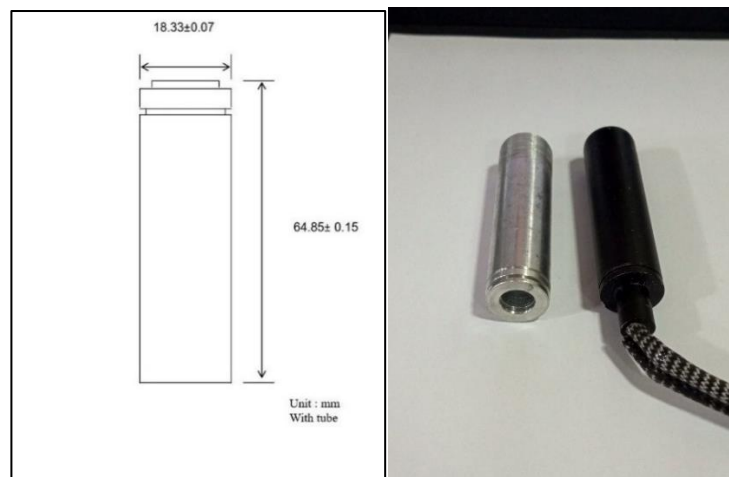
### 6.1.2 Barras cilíndricas (tomado de modelo batería 18650, experimental).

Se propone utilizar cilindros de aluminio con geometría similar a la de la batería 18650-30Q en cuyo interior se alojan niquelinas de calentamiento controlado.

Para el maquinado de las baterías se tomará como base, barras cilíndricas de aluminio cuyas características se detallan a continuación:

- ✓ Densidad  $2830 \text{ kg/m}^3$ .
- ✓ Módulo de elasticidad  $71500 \text{ N/mm}^2$ .
- ✓ Coeficiente de expansión térmica de  $20^\circ\text{C}$  a  $100^\circ\text{C}$  ( $23 \times 10^{-6}$ ).
- ✓ Conductividad térmica  $165 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ .
- ✓ Calor específico  $890 \text{ J/kg } ^\circ\text{C}$

Mediante el proceso de torneado se mecaniza barras de 20 mm de diámetro, hasta lograr las mismas medidas estándar de una BIL (INR 18650-30Q), las cuales se detallan en la siguiente **Figura 16**.



**Figura 16.** BIL INR 18650-30Q.

### 6.1.3 Resistencias tubulares 350 W 220 VAC.

Estas resistencias cilíndricas tendrán las siguientes características **Figura 17**:

- ✓ Modelo A230713.
- ✓ Voltaje 220 V.
- ✓ Potencia 350 W.
- ✓ Diámetro 9.5 mm.

Serán encajadas dentro de las barras de aluminio (BIL), las mismas servirán para elevar la temperatura de los cilindros con el fin de emular el aumento de la temperatura cuando una batería está en descarga (Temperatura de pruebas  $45^\circ\text{C}$ ).



**Figura 17.** Resistencia tubulares A230713.

### 6.1.4 Bases desmontables con diferentes opciones de configuración.

Para el análisis de la distancia de aplicación de los tubos de refrigeración de aire en el sistema de refrigeración de baterías planteado, se diseñó 5 bases desmontables de grilón cuyas características se denotan a continuación:

- ✓ El grilón se caracteriza por su alta resistencia mecánica y rigidez, lo que lo hace ideal para aplicaciones que requieren soportar cargas pesadas. Además, presenta una excelente resistencia a la abrasión, al impacto y a los productos químicos.
- ✓ Cuenta con una buena resistencia a la intemperie y a los rayos UV, lo que lo hace adecuado para uso en exteriores.
- ✓ El grilón es fácil de procesar, ya que puede ser moldeado mediante inyección, extrusión o soplado. Además, se puede colorear fácilmente para adaptarse a las necesidades estéticas de cada aplicación.

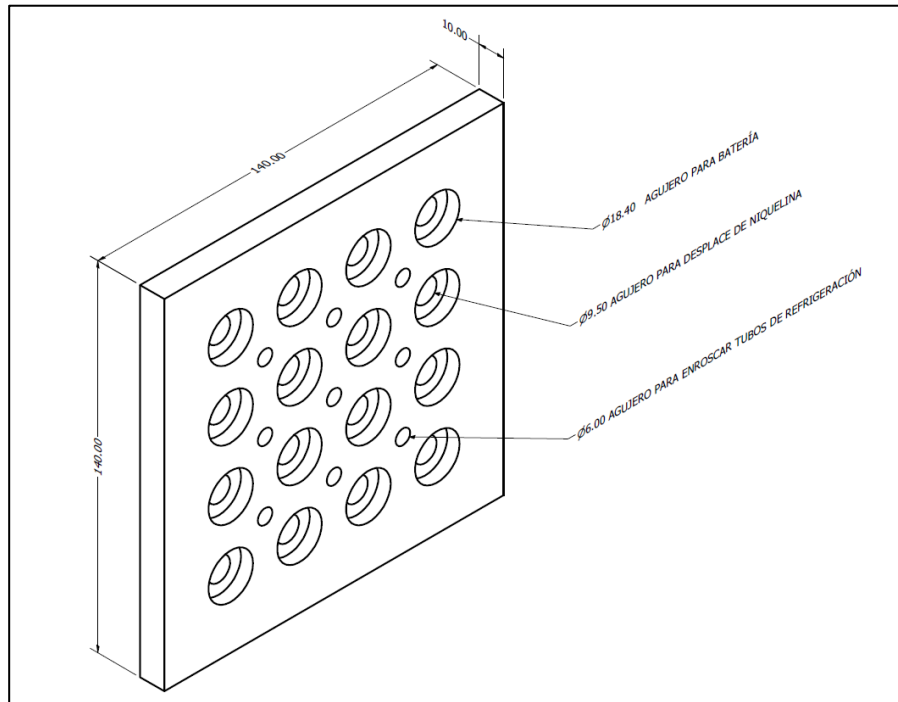
Estas bases permiten analizar diferentes configuraciones de disposición, como se muestra en la **Figura 18**.

Nombre de parámetro	Consumido por	Unidad/Tipo	Ecuación	Valor nominal	Tolerancia	Valor cota del m	Clave	Expor	Comentario
ancho	d1, Boceto1	mm	140 mm	140,000000	±Por	140,000000			
d1	Boceto1	mm	ancho	140,000000	±Por	140,000000			
d2	d10, d7, Boc...	mm	18,4 mm	18,400000	±Por	18,400000			
d5	Boceto1	su	4 su	4,000000	±Por	4,000000			
d7	d19, d16, Boc...	mm	d2 + sep	20,400000	±Por	20,400000			
d8	Boceto1	su	4 su	4,000000	±Por	4,000000			
d10	Boceto1	mm	d2 + sep	20,400000	±Por	20,400000			
tb2	Boceto1	mm	6 mm	6,000000	±Por	6,000000			
d14	Boceto1	su	3 su	3,000000	±Por	3,000000			
d16	Boceto1	mm	d7	20,400000	±Por	20,400000			
d17	Boceto1	su	3 su	3,000000	±Por	3,000000			
d19	Boceto1	mm	d7	20,400000	±Por	20,400000			
d22	Extrusión1	mm	10 mm	10,000000	±Por	10,000000			
d23	Extrusión1	gr	0,00 gr	0,000000	±Por	0,000000			
d24	Extrusión2	mm	5 mm	5,000000	±Por	5,000000			
d25	Extrusión2	gr	0,00 gr	0,000000	±Por	0,000000			
d26	Agujero1	mm	9,5 mm	9,500000	±Por	9,500000			
d51	Agujero2	mm	2 mm	2,000000	±Por	2,000000			
sep	d10, d7	mm	2 mm	2,000000	±Por	2,000000			

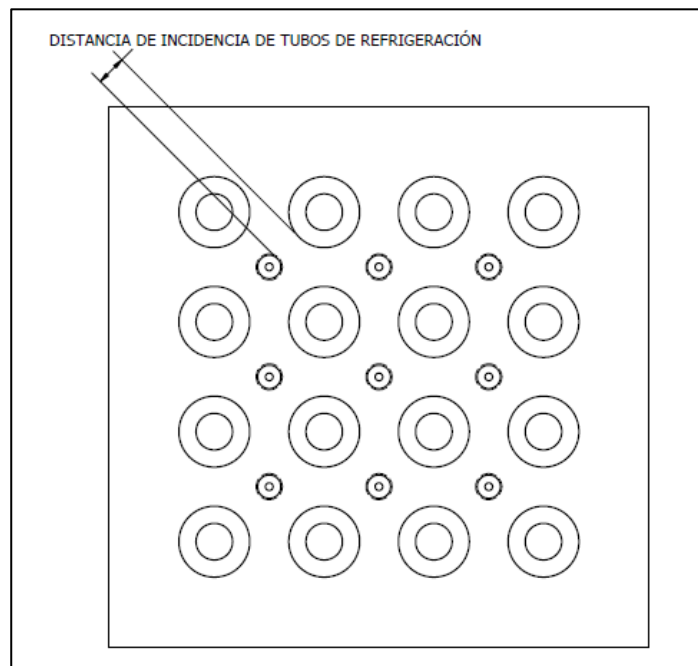
**Figura 18.** Modelo paramétrico para diferentes disposiciones dibujo en Inventor.

**Fuente:** Cuadro de parametrización Inventor.

Dentro de la parametrización se detalla la disposición de para el alojamiento de los diferentes componentes como se muestra en la **Figura 19-20**.

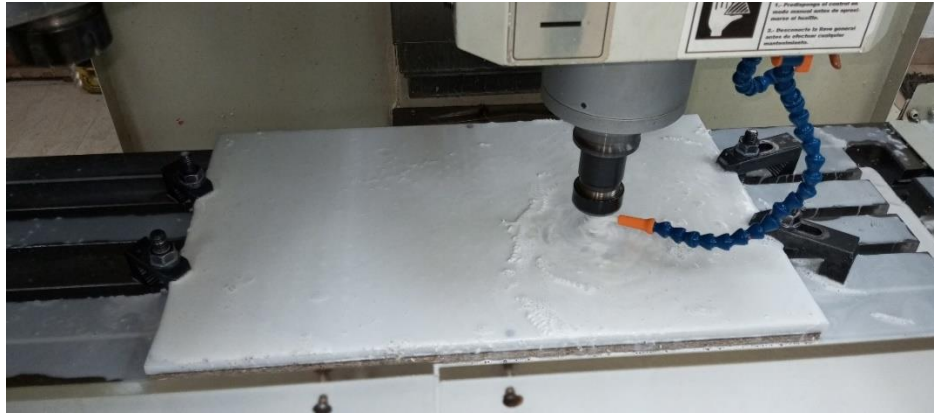


**Figura 19.** Base de prototipo de alojamiento de componentes.



**Figura 20.** Base de prototipo donde se especifica la distancia de incidencia.

Para realizar el mecanizado se utilizará el corte en CNC para tener una precisión y exactitud en las diferentes cavidades **Figura 21-22**.



**Figura 21.** Mecanizado por medio de CNC.

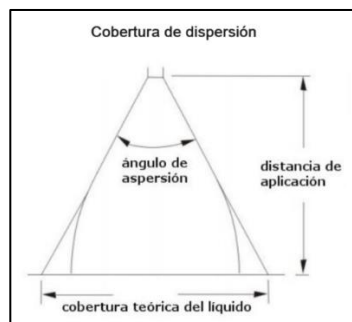


**Figura 22.** Disposición de plantillas.

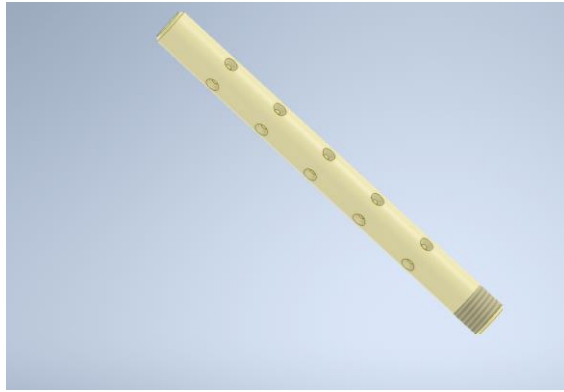
### 6.1.5 Tubos de refrigeración con agujeros equidistantes.

Dentro del planteamiento se diseñó tubos de refrigeración como los estudiados en los artículos de (Zhang et al., 2020) (Jahanpanah et al., 2023), de 5 agujeros equidistantes.

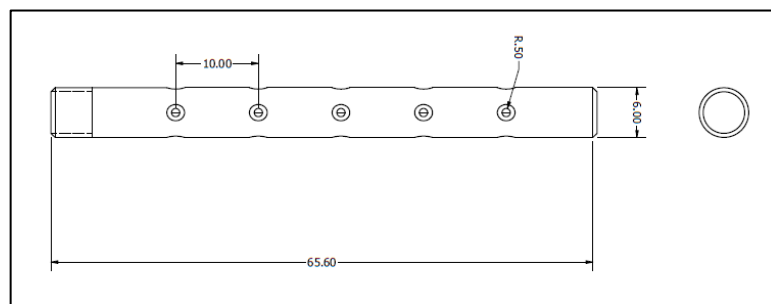
Se aborda la influencia de la forma del agujero de salida de aire, similar a una tobera, el número de agujeros y los efectos de la distancia entre la batería y la salida de aire, detallados en la **Figura 23-24-25-26**.



**Figura 23.** Cobertura de dispersión.



**Figura 24.** Tubo de refrigeración.  
**Fuente.** Inventor.



**Figura 25.** Tubo de refrigeración con disposiciones.

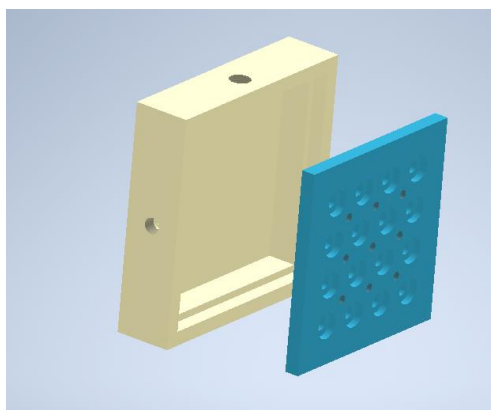


**Figura 26.** Tubos de refrigeración con sus respectivos orificios de refrigeración y ángulos de dispersión.

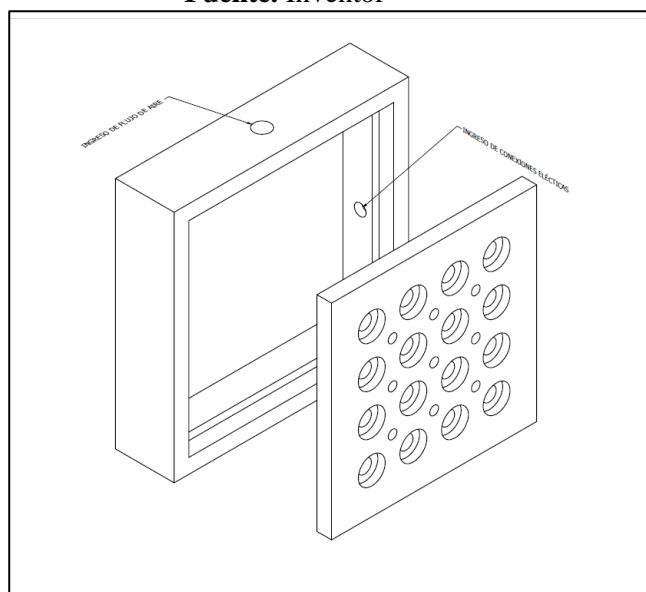
### 6.1.6 Bastidor inferior.

El bastidor tendrá la capacidad de alojar las diferentes bases de pruebas, adicional esta recepta la entrada de flujo de aire y las instalaciones eléctricas para alimentar las niquelinas como se muestra en la **Figura 27-28**.





**Figura 27.** Bastidor.  
**Fuente.** Inventor



**Figura 28.** Bastidor y base.

### **6.1.7 Fuente variable DC (P-3010D).**

La fuente de Voltaje variable DC juega un papel muy importante, su funcionamiento será direccionada a realizar regulaciones de voltaje y amperaje, por medio de este dispositivo se podrá controlar la temperatura de los cilindros para obtener valores de pruebas, que permita dar a las barras cilíndricas tipo BIL, condiciones para realizar las diferentes pruebas planteadas dentro de la investigación.

## 6.2 Procesamiento y análisis de datos experimentación sobre varias condiciones de enfriamiento de las BIL para establecer las condiciones de mejor operatividad térmica.

Entre las diferentes variables que se aplicó al banco experimental para realizar la toma de información tenemos las siguientes variables:

- Calibración de temperatura a las BIL (45° la temperatura más alta en los rangos de trabajos), estas se las dio mediante la fuente variable DC, a la cual se la calibro en los parámetros que se adjunta en la **Figura 29-30**.



**Figura 29.** Fuente Variable DC (P-3010D).



**Figura 30.** Calibración de temperatura de trabajo mediante cámara termográfica.

Calibración de regulador de presión y flujómetro, adjunta en la **Figura 31-32**.



**Figura 31.** Regulador de presión.



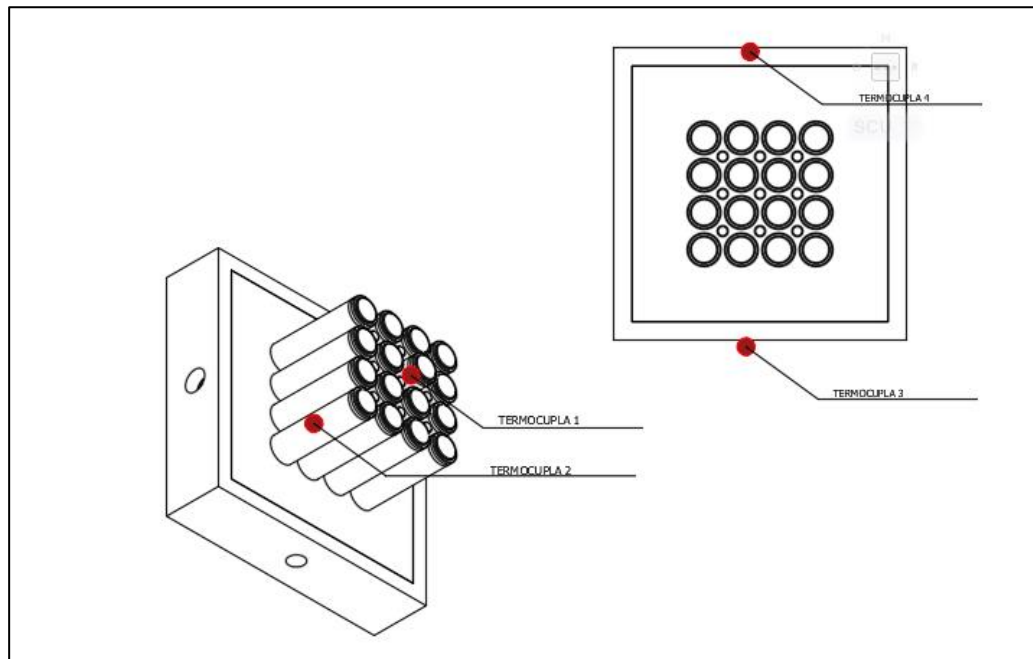
**Figura 32.** Flujómetro.

- Medición de temperatura ambiente de área de pruebas adjunto **Figura 33**.



**Figura 33.** Medición de temperatura ambiente.

- Ubicación de sensores de temperatura adjunta en la **Figura 34-35**.



**Figura 34.** Ubicación de termocuplas.



**Figura 35.** Ubicación de termocuplas banco experimental.

### **6.3 Datos obtenidos mediante pruebas en el Banco experimental de BIL.**

Las pruebas se realizaron mediante la obtención de datos de caudal, tiempo y temperatura de las termocuplas en las ubicaciones detalladas anteriormente, se adjunta **Figura 36**.



**Figura 36.** Temperaturas de pruebas.

Dentro de la obtención de datos, se presentará los cuadros en las cuales hemos tomado como referencia la mejor disposición:

- Distancia entre baterías y tuberías de refrigeración.
- Caudal L/min variable.
- Presión de entrada (psi).
- Forma de agujeros de tubos de refrigeración.

### 6.3.1 Datos obtenidos en plantilla de 10mm de separación batería y tubo de refrigeración

En la **Tabla 2**, se puede apreciar la mejor disposición para poder enfriar el paquete de baterías, con una distancia de 10 mm de distancia entre batería y tubos de refrigeración, los agujeros de dispersión con un diámetro de 1 mm de agujero, con cuatro columnas de 5 agujeros cada uno y equidistantes 45° y un ángulo de dispersión de 60°, manteniendo una temperatura de 45.13°C con una flujo de aire de 20 L/min, presión de 14 psi, con un tiempo de 1920 s.

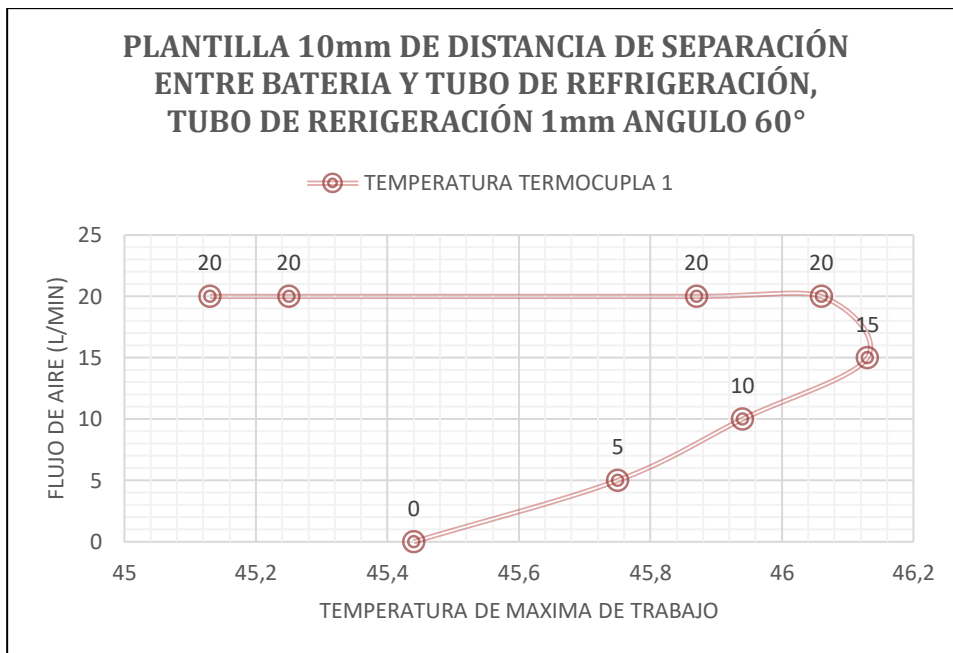
**Tabla 2.** Datos obtenidos en plantilla de 10mm de separación entre tubos de refrigeración y baterías.

PLANTILLA 10 mm DE DISTANCIA DE SEPARACIÓN ENTRE BATERIA Y TUBO DE REFRIGERACIÓN, TUBO DE REFRIGERACIÓN 1 mm ANGULO 0°													
TEMPERATURA AMBIENTE	HUMEDAD AMBIENTE				TEMPERATURA TERMOCUPLA 1	TEMPERATURA TERMOCUPLA 2	TEMPERATURA TERMOCUPLA 3	TEMPERATURA TERMOCUPLA 4	VOLTAJE	AMPERAJE	PRESIÓN	FLUJO DE AIRE	TIEMPO
°C	%RH	WB	DP	KJ/KG	°C	°C	°C	°C	VDC	ADC	PSI	L/MIN	MIN
20,7	64	16,4	13,7	45,89	45,44	35,63	21,31	20,81	13,1	1,3	0	0	0
20,7	64	16,4	13,7	45,89	46,19	36,00	21,44	20,94	13,1	1,3	14	5	1
20,7	64	16,4	13,7	45,89	46,38	36,00	21,44	20,94	13,1	1,3	14	10	1
20,7	64	16,4	13,7	45,89	46,38	35,94	21,50	21,06	13,1	1,3	14	15	2
20,7	64	16,4	13,7	45,89	46,25	36,50	21,50	21,00	13,1	1,3	14	20	3
20,7	64	16,4	13,7	45,89	45,88	36,56	21,62	21,19	13,1	1,3	14	20	5
20,7	64	16,4	13,7	45,89	45,25	36,81	25,56	21,06	13,1	1,3	14	20	10

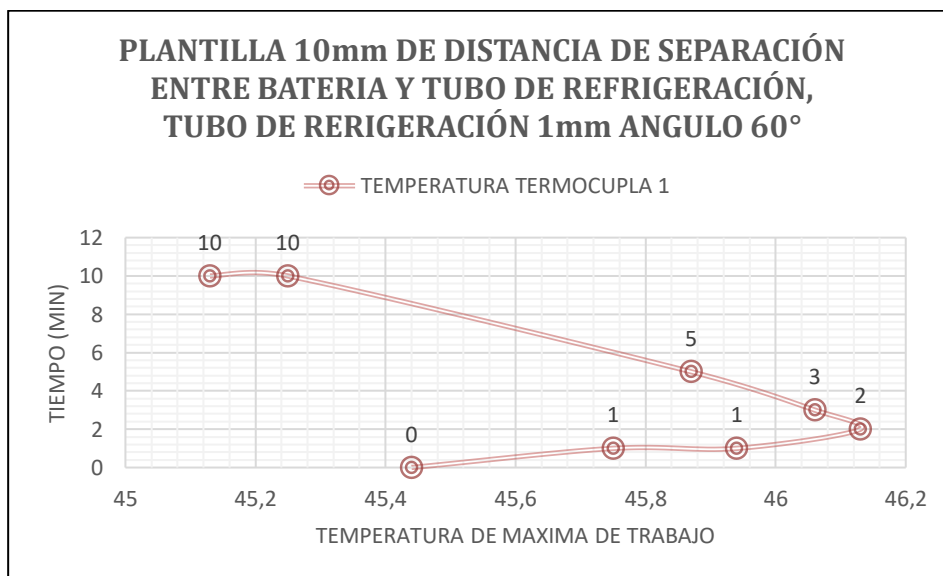
PLANTILLA 10 mm DE DISTANCIA DE SEPARACIÓN ENTRE BATERIA Y TUBO DE REFRIGERACIÓN, TUBO DE REFRIGERACIÓN 1 mm ANGULO 30°													
TEMPERATURA AMBIENTE	HUMEDAD AMBIENTE				TEMPERATURA TERMOCUPLA 1	TEMPERATURA TERMOCUPLA 2	TEMPERATURA TERMOCUPLA 3	TEMPERATURA TERMOCUPLA 4	VOLTAJE	AMPERAJE	PRESIÓN	FLUJO DE AIRE	TIEMPO
°C	%RH	WB	DP	KJ/KG	°C	°C	°C	°C	VDC	ADC	PSI	L/MIN	MIN
20,7	64	16,4	13,7	45,89	45,44	35,55	21,72	20,95	13,1	1,3	0	0	0
20,7	64	16,4	13,7	45,89	45,63	35,13	21,44	21,12	13,1	1,3	14	5	1
20,7	64	16,4	13,7	45,89	45,88	35,31	21,50	21,06	13,1	1,3	14	10	1
20,7	64	16,4	13,7	45,89	46,19	35,56	21,50	21,12	13,1	1,3	14	15	2
20,7	64	16,4	13,7	45,89	46,38	35,75	21,62	21,12	13,1	1,3	14	20	3
20,7	64	16,4	13,7	45,89	46,38	36,25	21,69	21,12	13,1	1,3	14	20	5
20,7	64	16,4	13,7	45,89	46,13	36,88	21,62	21,25	13,1	1,3	14	20	10

PLANTILLA 10 mm DE DISTANCIA DE SEPARACIÓN ENTRE BATERIA Y TUBO DE REFRIGERACIÓN, TUBO DE REFRIGERACIÓN 1 mm ANGULO 60°													
TEMPERATURA AMBIENTE	HUMEDAD AMBIENTE				TEMPERATURA TERMOCUPLA 1	TEMPERATURA TERMOCUPLA 2	TEMPERATURA TERMOCUPLA 3	TEMPERATURA TERMOCUPLA 4	VOLTAJE	AMPERAJE	PRESIÓN	FLUJO DE AIRE	TIEMPO
°C	%RH	WB	DP	KJ/KG	°C	°C	°C	°C	VDC	ADC	PSI	L/MIN	MIN
20,7	64	16,4	13,7	45,89	45,44	35,38	21,94	21,56	13,1	1,3	0	0	0
20,7	64	16,4	13,7	45,89	45,75	35,63	21,94	21,62	13,1	1,3	14	5	1
20,7	64	16,4	13,7	45,89	45,94	35,75	21,87	21,62	13,1	1,3	14	10	1
20,7	64	16,4	13,7	45,89	46,13	36,06	21,87	21,62	13,1	1,3	14	15	2
20,7	64	16,4	13,7	45,89	46,06	36,31	21,87	21,69	13,1	1,3	14	20	3
20,7	64	16,4	13,7	45,89	45,87	36,69	22,06	21,87	13,1	1,3	14	20	5
20,7	64	16,4	13,7	45,89	45,25	37,31	22,00	21,94	13,1	1,3	14	20	10
20,7	64	16,4	13,7	45,89	45,13	37,13	22,12	22,12	13,1	1,3	14	20	10

Donde se presenta la siguiente gráfica en la cual se evidencia el comportamiento de la temperatura en función del flujo de aire y el tiempo identificado en la **Figura 37-38**,



**Figura 37.** Comparativa temperatura 1 y flujo de aire.



**Figura 38.** Comparativa temperatura 1 y tiempo.

### 6.3.2 Datos obtenidos en plantilla de 2mm de separación batería y tubo de refrigeración.

En la **Tabla 3**, se puede apreciar la peor disposición para poder enfriar el paquete de baterías, con una distancia de 2 mm de distancia entre batería y tubos de refrigeración, los agujeros de dispersión con un diámetro de 1 mm de agujero, con cuatro columnas de 5 agujeros cada uno y equidistantes 45° y un ángulo de dispersión de 0°, con un incremento de temperatura de 52.63°C con un flujo de aire de 20 L/min, presión de 14 psi, con un tiempo de 1320 s.

**Tabla 3.** Datos obtenidos en plantilla de 2mm de separación entre tubos de refrigeración y baterías.

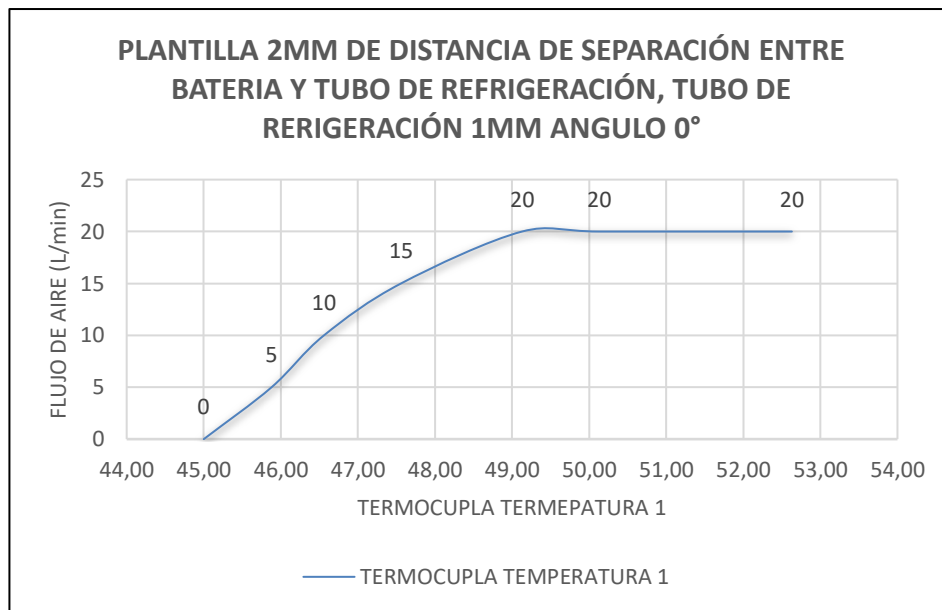
<b>PLANTILLA 2 mm DE DISTANCIA DE SEPARACIÓN ENTRE BATERIA Y TUBO DE REFRIGERACIÓN, TUBO DE REFRIGERACIÓN 1 mm ANGULO 0°</b>													
TEMPERATURA AMBIENTE	HUMEDAD AMBIENTE				TEMPERATURA TERMOCUPLA 1	TEMPERATURA TERMOCUPLA 2	TEMPERATURA TERMOCUPLA 3	TEMPERATURA TERMOCUPLA 4	VOLTAJE	AMPERAJE	PRESIÓN	FLUJO DE AIRE	TIEMPO
°C	%RH	WB	DP	KJ/KG	°C	°C	°C	°C	VDC	ADC	PSI	L/MIN	MIN
19,2	65,8	15,3	12,6	42,52	45,00	34,94	20,00	19,50	13,1	1,3	0	0	0
19,2	65,8	15,3	12,6	42,52	45,88	35,75	20,00	19,50	13,1	1,3	14	5	1
19,2	65,8	15,3	12,6	42,52	46,56	36,25	20,06	19,50	13,1	1,3	14	10	1
19,2	65,8	15,3	12,6	42,52	47,56	37,56	20,37	19,50	13,1	1,3	14	15	2
19,2	65,8	15,3	12,6	42,52	49,13	39,63	20,56	19,62	13,1	1,3	14	20	3
19,2	65,8	15,3	12,6	42,52	50,13	41,00	20,50	19,62	13,1	1,3	14	20	5
19,2	65,8	15,3	12,6	42,52	52,63	43,63	20,62	19,69	13,1	1,3	14	20	10

<b>PLANTILLA 2 mm DE DISTANCIA DE SEPARACIÓN ENTRE BATERIA Y TUBO DE REFRIGERACIÓN, TUBO DE REFRIGERACIÓN 1 mm ANGULO 30°</b>													
TEMPERATURA AMBIENTE	HUMEDAD AMBIENTE				TEMPERATURA TERMOCUPLA 1	TEMPERATURA TERMOCUPLA 2	TEMPERATURA TERMOCUPLA 3	TEMPERATURA TERMOCUPLA 4	VOLTAJE	AMPERAJE	PRESIÓN	FLUJO DE AIRE	TIEMPO
°C	%RH	WB	DP	KJ/KG	°C	°C	°C	°C	VDC	ADC	PSI	L/MIN	MIN
20,00	63,00	15,5	12,7	43,75	45,06	38,19	21,12	20,12	13,1	1,3	0	0	0
20,00	63,00	15,5	12,7	43,75	46,42	38,38	20,87	20,12	13,1	1,3	14	5	1
20,00	63,00	15,5	12,7	43,75	47,40	38,63	20,75	20,19	13,1	1,3	14	10	1
20,00	63,00	15,5	12,7	43,75	48,50	39,94	20,81	20,12	13,1	1,3	14	15	2
20,00	63,00	15,5	12,7	43,75	49,69	41,25	21,00	20,06	13,1	1,3	14	20	3
20,00	63,00	15,5	12,7	43,75	51,06	42,63	20,69	20,19	13,1	1,3	14	20	5
20,00	63,00	15,5	12,7	43,75	52,60	44,38	20,69	20,12	13,1	1,3	14	20	10

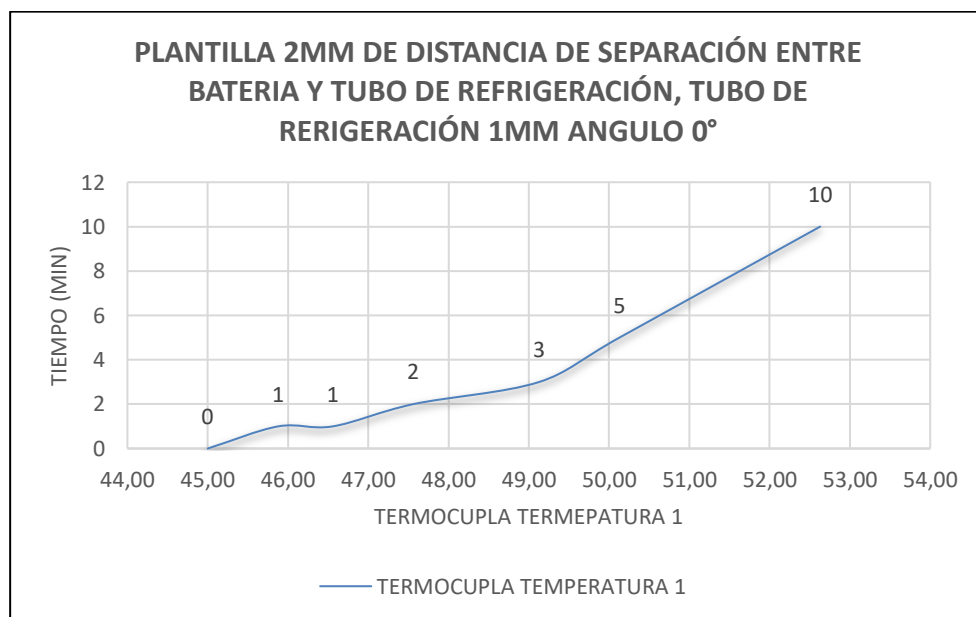
<b>PLANTILLA 2 mm DE DISTANCIA DE SEPARACIÓN ENTRE BATERIA Y TUBO DE REFRIGERACIÓN, TUBO DE REFRIGERACIÓN 1 mm ANGULO 60°</b>													
TEMPERATURA AMBIENTE	HUMEDAD AMBIENTE				TEMPERATURA TERMOCUPLA 1	TEMPERATURA TERMOCUPLA 2	TEMPERATURA TERMOCUPLA 3	TEMPERATURA TERMOCUPLA 4	VOLTAJE	AMPERAJE	PRESIÓN	FLUJO DE AIRE	TIEMPO
°C	%RH	WB	DP	KJ/KG	°C	°C	°C	°C	VDC	ADC	PSI	L/MIN	MIN
19,4	65,2	15,6	12,9	43,39	45,06	36,75	20,50	20,37	13,1	1,3	0	0	0
19,4	65,2	15,6	12,9	43,39	45,69	37,19	20,50	20,44	13,1	1,3	14	5	1
19,4	65,2	15,6	12,9	43,39	46,38	37,94	20,50	20,37	13,1	1,3	14	10	1
19,4	65,2	15,6	12,9	43,39	47,31	39,25	20,56	20,25	13,1	1,3	14	15	2
19,4	65,2	15,6	12,9	43,39	48,31	40,75	20,69	20,31	13,1	1,3	14	20	3
19,4	65,2	15,6	12,9	43,39	49,56	42,38	20,94	20,31	13,1	1,3	14	20	5
19,4	65,2	15,6	12,9	43,39	51,69	44,63	21,06	20,44	13,1	1,3	14	20	10
					53,38	46,19	21,00	20,69	13,1	1,3	14	20	10



Donde se presenta la siguiente gráfica en la cual se evidencia el comportamiento de la temperatura en función del flujo de aire y el tiempo identificado en la **Figura 39-40**.



**Figura 39.** Comparativa temperatura 1 y flujo de aire.



**Figura 40.** Comparativa temperatura 1 y tiempo.

### 6.3.3 Experimentación con flujo constante desde temperatura de trabajo inicial de Plantilla de 10 mm de separación entre baterías y tubos de refrigeración, tubos de refrigeración 1 mm tobera 60°.

Dentro de las fases de experimentación se realizan pruebas más extensas con la disposición de enfriamiento más idónea del prototipo (10 mm de separación entre tobera de enfriamiento y BIL), los datos se obtendrán en tiempos de 30 s, para obtener unas variables más idóneas para poder contrastar en la simulación CFD, ver **Tabla 4**.

**Tabla 4.** Datos obtenidos en plantilla de 10mm de separación entre tubos de refrigeración y baterías.

PLANTILLA 10MM DE DISTANCIA DE SEPARACIÓN ENTRE BATERIA Y TUBO DE REFRIGERACIÓN, TUBO DE REFRIGERACIÓN 1MM ANGULO 60°													
TEMPERATURA AMBIENTE	HUMEDAD AMBIENTE				TEMPERATURA TERMOCUPL A 1	TEMPERATURA TERMOCUPL A 2	TEMPERATURA TERMOCUPL A 3	TEMPERATURA TERMOCUPL A 4	VOLTAJE	AMPERAJE	PRESIÓN	FLUJO DE AIRE	TIEMPO
°C	%RH	WB	DP	KJ/KG	°C	°C	°C	°C	VDC	ADC	PSI	L/MIN	SEG
20,6	57	15,3	12	43,02	21,81	20,87	21,19	20,87	13,1	1,3	14	20	0
20,6	57	15,3	12	43,02	21,81	20,87	21,19	20,87	13,1	1,3	14	20	30
20,6	57	15,3	12	43,02	22,00	21,19	21,12	20,87	13,1	1,3	14	20	60
20,6	57	15,3	12	43,02	22,12	21,25	21,12	20,87	13,1	1,3	14	20	90
20,6	57	15,3	12	43,02	22,44	21,56	21,06	20,87	13,1	1,3	14	20	120
20,6	57	15,3	12	43,02	22,81	21,94	21,12	20,94	13,1	1,3	14	20	150
20,6	57	15,3	12	43,02	23,31	22,94	21,62	21,19	13,1	1,3	14	20	180
20,6	57	15,3	12	43,02	23,75	22,81	21,12	21,00	13,1	1,3	14	20	210
20,6	57	15,3	12	43,02	24,25	23,25	21,12	21,00	13,1	1,3	14	20	240
20,6	57	15,3	12	43,02	24,69	23,56	21,06	21,06	13,1	1,3	14	20	270
20,6	57	15,3	12	43,02	25,12	24,00	21,06	21,06	13,1	1,3	14	20	300
20,6	57	15,3	12	43,02	25,69	24,37	21,00	21,06	13,1	1,3	14	20	330
20,6	57	15,3	12	43,02	26,12	24,75	21,06	21,12	13,1	1,3	14	20	360
20,6	57	15,3	12	43,02	26,62	25,12	21,00	21,06	13,1	1,3	14	20	390
20,6	57	15,3	12	43,02	27,06	25,50	21,00	21,06	13,1	1,3	14	20	420
20,6	57	15,3	12	43,02	27,56	25,81	21,00	21,06	13,1	1,3	14	20	450
20,6	57	15,3	12	43,02	27,94	26,12	21,00	21,12	13,1	1,3	14	20	480
20,6	57	15,3	12	43,02	28,44	26,44	21,00	21,12	13,1	1,3	14	20	510
20,6	57	15,3	12	43,02	28,87	26,69	21,00	21,12	13,1	1,3	14	20	540
20,6	57	15,3	12	43,02	29,31	27,06	21,00	21,12	13,1	1,3	14	20	570
20,6	57	15,3	12	43,02	29,69	27,31	21,06	21,12	13,1	1,3	14	20	600
20,6	57	15,3	12	43,02	30,12	27,62	21,06	21,19	13,1	1,3	14	20	630
20,6	57	15,3	12	43,02	30,56	27,87	21,12	21,19	13,1	1,3	14	20	660
20,6	57	15,3	12	43,02	30,94	28,12	21,12	21,25	13,1	1,3	14	20	690
20,6	57	15,3	12	43,02	31,31	28,31	21,19	21,25	13,1	1,3	14	20	720
20,6	57	15,3	12	43,02	31,69	28,44	21,19	21,25	13,1	1,3	14	20	750
20,6	57	15,3	12	43,02	32,06	28,69	21,19	21,25	13,1	1,3	14	20	780
20,6	57	15,3	12	43,02	32,44	28,87	21,12	21,25	13,1	1,3	14	20	810
20,6	57	15,3	12	43,02	32,81	29,00	21,12	21,25	13,1	1,3	14	20	840
20,6	57	15,3	12	43,02	33,13	29,25	21,12	21,31	13,1	1,3	14	20	870
20,6	57	15,3	12	43,02	33,44	29,44	21,25	21,37	13,1	1,3	14	20	900

**PLANTILLA 10MM DE DISTANCIA DE SEPARACIÓN ENTRE BATERIA Y TUBO DE REFRIGERACIÓN, TUBO DE REFRIGERACIÓN 1MM ANGULO 60°**

TEMPERATURA AMBIENTE	HUMEDAD AMBIENTE				TEMPERATURA TERMOCUPLA 1	TEMPERATURA TERMOCUPLA 2	TEMPERATURA TERMOCUPLA 3	TEMPERATURA TERMOCUPLA 4	VOLTAJE	AMPERAJE	PRESIÓN	FLUJO DE AIRE	TIEMPO
20,6	57	15,3	12	43,02	33,75	29,56	21,37	21,44	13,1	1,3	14	20	930
20,6	57	15,3	12	43,02	34,06	29,69	21,37	21,44	13,1	1,3	14	20	960
20,6	57	15,3	12	43,02	34,31	29,81	21,31	21,37	13,1	1,3	14	20	990
20,6	57	15,3	12	43,02	34,56	29,87	21,37	21,37	13,1	1,3	14	20	1020
20,6	57	15,3	12	43,02	34,88	30,06	21,37	21,56	13,1	1,3	14	20	1050
20,6	57	15,3	12	43,02	35,13	30,31	21,31	21,62	13,1	1,3	14	20	1080
20,6	57	15,3	12	43,02	35,38	30,50	21,37	21,62	13,1	1,3	14	20	1110
20,6	57	15,3	12	43,02	35,63	30,81	21,37	21,62	13,1	1,3	14	20	1140
20,6	57	15,3	12	43,02	35,81	31,06	21,37	21,56	13,1	1,3	14	20	1170
20,6	57	15,3	12	43,02	36,06	31,12	21,37	21,62	13,1	1,3	14	20	1200
20,6	57	15,3	12	43,02	36,38	31,19	21,44	21,69	13,1	1,3	14	20	1230
20,6	57	15,3	12	43,02	36,63	31,37	21,44	21,69	13,1	1,3	14	20	1260
20,6	57	15,3	12	43,02	36,75	31,44	21,50	21,69	13,1	1,3	14	20	1290
20,6	57	15,3	12	43,02	36,94	31,69	21,56	21,81	13,1	1,3	14	20	1320
20,6	57	15,3	12	43,02	37,19	31,50	21,50	21,75	13,1	1,3	14	20	1350
20,6	57	15,3	12	43,02	37,44	31,56	21,50	21,75	13,1	1,3	14	20	1380
20,6	57	15,3	12	43,02	37,63	31,56	21,56	21,75	13,1	1,3	14	20	1410
20,6	57	15,3	12	43,02	37,88	31,62	21,56	21,75	13,1	1,3	14	20	1440
20,6	57	15,3	12	43,02	38,13	31,75	21,56	21,81	13,1	1,3	14	20	1470
20,6	57	15,3	12	43,02	38,25	31,75	21,56	21,81	13,1	1,3	14	20	1500
20,6	57	15,3	12	43,02	38,44	31,81	21,62	21,81	13,1	1,3	14	20	1530
20,6	57	15,3	12	43,02	38,63	31,87	21,62	21,94	13,1	1,3	14	20	1560
20,6	57	15,3	12	43,02	38,81	31,94	21,62	21,94	13,1	1,3	14	20	1590
20,6	57	15,3	12	43,02	39,00	31,94	21,62	21,94	13,1	1,3	14	20	1620
20,6	57	15,3	12	43,02	39,19	32,00	21,62	21,94	13,1	1,3	14	20	1650
20,6	57	15,3	12	43,02	39,31	32,13	21,69	21,94	13,1	1,3	14	20	1680
20,6	57	15,3	12	43,02	39,44	32,19	21,69	21,87	13,1	1,3	14	20	1710
20,6	57	15,3	12	43,02	39,56	32,44	21,69	21,94	13,1	1,3	14	20	1740
20,6	57	15,3	12	43,02	39,69	32,31	21,69	22,00	13,1	1,3	14	20	1770
20,6	57	15,3	12	43,02	39,88	32,31	21,69	22,00	13,1	1,3	14	20	1800
20,6	57	15,3	12	43,02	40,00	32,31	21,69	22,06	13,1	1,3	14	20	1830
20,6	57	15,3	12	43,02	40,13	32,38	21,75	22,06	13,1	1,3	14	20	1860
20,6	57	15,3	12	43,02	40,25	32,50	21,69	22,06	13,1	1,3	14	20	1890
20,6	57	15,3	12	43,02	40,38	32,44	21,75	22,12	13,1	1,3	14	20	1920
20,6	57	15,3	12	43,02	40,50	32,38	21,81	22,19	13,1	1,3	14	20	1950
20,6	57	15,3	12	43,02	40,56	32,44	21,81	22,25	13,1	1,3	14	20	1980
20,6	57	15,3	12	43,02	40,63	32,69	21,87	22,25	13,1	1,3	14	20	2010
20,6	57	15,3	12	43,02	40,75	32,88	21,87	22,25	13,1	1,3	14	20	2040
20,6	57	15,3	12	43,02	40,81	33,06	21,94	22,25	13,1	1,3	14	20	2070
20,6	57	15,3	12	43,02	40,94	33,13	21,87	22,25	13,1	1,3	14	20	2100
20,6	57	15,3	12	43,02	41,00	33,13	21,87	22,25	13,1	1,3	14	20	2130
20,6	57	15,3	12	43,02	41,13	33,19	21,87	22,25	13,1	1,3	14	20	2160
20,6	57	15,3	12	43,02	41,19	33,25	21,87	22,25	13,1	1,3	14	20	2190
20,6	57	15,3	12	43,02	41,19	33,50	21,94	22,50	13,1	1,3	14	20	2220

**PLANTILLA 10MM DE DISTANCIA DE SEPARACIÓN ENTRE BATERIA Y TUBO DE REFRIGERACIÓN, TUBO DE REFRIGERACIÓN 1MM ANGULO 60°**

TEMPERATURA AMBIENTE	HUMEDAD AMBIENTE				TEMPERATURA TERMOCUPLA 1	TEMPERATURA TERMOCUPLA 2	TEMPERATURA TERMOCUPLA 3	TEMPERATURA TERMOCUPLA 4	VOLTAJE	AMPERAJE	PRESIÓN	FLUJO DE AIRE	TIEMPO
20,6	57	15,3	12	43,02	41,25	33,38	21,87	22,75	13,1	1,3	14	20	2250
20,6	57	15,3	12	43,02	41,31	33,50	22,00	22,81	13,1	1,3	14	20	2280
20,6	57	15,3	12	43,02	41,38	33,44	21,94	22,75	13,1	1,3	14	20	2310
20,6	57	15,3	12	43,02	41,44	33,44	22,00	22,69	13,1	1,3	14	20	2340
20,6	57	15,3	12	43,02	41,63	33,38	22,00	22,56	13,1	1,3	14	20	2370
20,6	57	15,3	12	43,02	41,75	33,38	22,00	22,56	13,1	1,3	14	20	2400
20,6	57	15,3	12	43,02	41,81	33,31	22,00	22,50	13,1	1,3	14	20	2430
20,6	57	15,3	12	43,02	41,94	33,25	22,00	22,50	13,1	1,3	14	20	2460
20,6	57	15,3	12	43,02	41,94	33,31	22,00	22,50	13,1	1,3	14	20	2490
20,6	57	15,3	12	43,02	42,06	33,31	22,06	22,56	13,1	1,3	14	20	2520
20,6	57	15,3	12	43,02	42,13	33,38	22,06	22,50	13,1	1,3	14	20	2550
20,6	57	15,3	12	43,02	42,19	33,31	22,06	22,56	13,1	1,3	14	20	2580
20,6	57	15,3	12	43,02	42,19	33,63	22,06	22,75	13,1	1,3	14	20	2610
20,6	57	15,3	12	43,02	42,25	33,75	22,00	22,69	13,1	1,3	14	20	2640
20,6	57	15,3	12	43,02	42,38	33,63	22,06	22,62	13,1	1,3	14	20	2670
20,6	57	15,3	12	43,02	42,44	33,75	22,06	22,62	13,1	1,3	14	20	2700
20,6	57	15,3	12	43,02	42,50	33,75	22,06	22,75	13,1	1,3	14	20	2730
20,6	57	15,3	12	43,02	42,50	33,75	22,06	22,62	13,1	1,3	14	20	2760
20,6	57	15,3	12	43,02	42,56	33,63	22,06	22,75	13,1	1,3	14	20	2790
20,6	57	15,3	12	43,02	42,63	33,63	22,06	22,75	13,1	1,3	14	20	2820
20,6	57	15,3	12	43,02	42,69	33,75	22,12	22,69	13,1	1,3	14	20	2850
20,6	57	15,3	12	43,02	42,75	33,81	22,12	22,69	13,1	1,3	14	20	2880
20,6	57	15,3	12	43,02	42,81	33,88	22,12	22,62	13,1	1,3	14	20	2910
20,6	57	15,3	12	43,02	42,75	34,06	22,19	22,87	13,1	1,3	14	20	2940
20,6	57	15,3	12	43,02	42,81	34,00	22,12	22,81	13,1	1,3	14	20	2970
20,6	57	15,3	12	43,02	42,88	34,00	22,19	22,81	13,1	1,3	14	20	3000
20,6	57	15,3	12	43,02	43,00	34,06	22,12	22,81	13,1	1,3	14	20	3030
20,6	57	15,3	12	43,02	43,00	34,00	22,06	22,87	13,1	1,3	14	20	3060
20,6	57	15,3	12	43,02	43,00	34,13	22,12	23,00	13,1	1,3	14	20	3090
20,6	57	15,3	12	43,02	43,06	34,06	22,19	23,00	13,1	1,3	14	20	3120
20,6	57	15,3	12	43,02	43,06	34,19	22,19	22,94	13,1	1,3	14	20	3150
20,6	57	15,3	12	43,02	43,13	34,31	22,19	22,87	13,1	1,3	14	20	3180
20,6	57	15,3	12	43,02	43,13	34,44	22,25	22,94	13,1	1,3	14	20	3210
20,6	57	15,3	12	43,02	43,13	34,50	22,25	23,00	13,1	1,3	14	20	3240
20,6	57	15,3	12	43,02	43,13	34,69	22,25	23,00	13,1	1,3	14	20	3270
20,6	57	15,3	12	43,02	43,19	34,69	22,25	23,00	13,1	1,3	14	20	3300
20,6	57	15,3	12	43,02	43,19	34,81	22,31	23,00	13,1	1,3	14	20	3330
20,6	57	15,3	12	43,02	43,19	34,81	22,37	23,19	13,1	1,3	14	20	3360
20,6	57	15,3	12	43,02	43,19	34,81	22,37	23,25	13,1	1,3	14	20	3390
20,6	57	15,3	12	43,02	43,19	34,81	22,44	23,19	13,1	1,3	14	20	3420
20,6	57	15,3	12	43,02	43,25	34,63	22,44	23,12	13,1	1,3	14	20	3450
20,6	57	15,3	12	43,02	43,31	34,38	22,44	23,12	13,1	1,3	14	20	3480
20,6	57	15,3	12	43,02	43,38	34,44	22,50	23,12	13,1	1,3	14	20	3510
20,6	57	15,3	12	43,02	43,38	34,56	22,44	23,12	13,1	1,3	14	20	3540

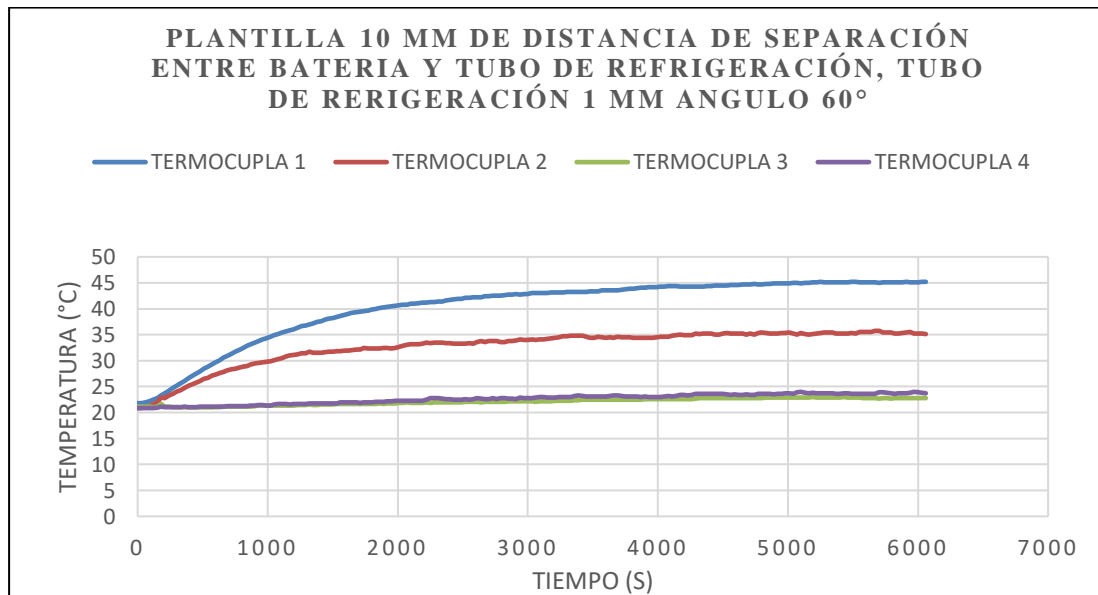
**PLANTILLA 10MM DE DISTANCIA DE SEPARACIÓN ENTRE BATERIA Y TUBO DE REFRIGERACIÓN, TUBO DE REFRIGERACIÓN 1MM ANGULO 60°**

TEMPERATURA AMBIENTE	HUMEDAD AMBIENTE				TEMPERATURA TERMOCUPLA 1	TEMPERATURA TERMOCUPLA 2	TEMPERATURA TERMOCUPLA 3	TEMPERATURA TERMOCUPLA 4	VOLTAJE	AMPERAJE	PRESIÓN	FLUJO DE AIRE	TIEMPO
20,6	57	15,3	12	43,02	43,50	34,50	22,50	23,12	13,1	1,3	14	20	3570
20,6	57	15,3	12	43,02	43,50	34,44	22,44	23,06	13,1	1,3	14	20	3600
20,6	57	15,3	12	43,02	43,50	34,50	22,44	23,19	13,1	1,3	14	20	3630
20,6	57	15,3	12	43,02	43,56	34,44	22,50	23,31	13,1	1,3	14	20	3660
20,6	57	15,3	12	43,02	43,56	34,56	22,50	23,25	13,1	1,3	14	20	3690
20,6	57	15,3	12	43,02	43,69	34,50	22,44	23,19	13,1	1,3	14	20	3720
20,6	57	15,3	12	43,02	43,75	34,50	22,50	23,12	13,1	1,3	14	20	3750
20,6	57	15,3	12	43,02	43,81	34,50	22,50	23,12	13,1	1,3	14	20	3780
20,6	57	15,3	12	43,02	43,88	34,38	22,50	23,12	13,1	1,3	14	20	3810
20,6	57	15,3	12	43,02	43,94	34,38	22,50	23,06	13,1	1,3	14	20	3840
20,6	57	15,3	12	43,02	44,06	34,44	22,50	23,00	13,1	1,3	14	20	3870
20,6	57	15,3	12	43,02	44,06	34,38	22,56	23,06	13,1	1,3	14	20	3900
20,6	57	15,3	12	43,02	44,19	34,44	22,56	23,00	13,1	1,3	14	20	3930
20,6	57	15,3	12	43,02	44,19	34,44	22,56	23,00	13,1	1,3	14	20	3960
20,6	57	15,3	12	43,02	44,19	34,50	22,56	23,00	13,1	1,3	14	20	3990
20,6	57	15,3	12	43,02	44,25	34,56	22,62	23,00	13,1	1,3	14	20	4020
20,6	57	15,3	12	43,02	44,31	34,63	22,62	23,06	13,1	1,3	14	20	4050
20,6	57	15,3	12	43,02	44,38	34,63	22,62	23,19	13,1	1,3	14	20	4080
20,6	57	15,3	12	43,02	44,38	34,81	22,62	23,12	13,1	1,3	14	20	4110
20,6	57	15,3	12	43,02	44,38	34,94	22,56	23,19	13,1	1,3	14	20	4140
20,6	57	15,3	12	43,02	44,31	35,00	22,56	23,44	13,1	1,3	14	20	4170
20,6	57	15,3	12	43,02	44,31	34,94	22,56	23,44	13,1	1,3	14	20	4200
20,6	57	15,3	12	43,02	44,31	34,94	22,62	23,31	13,1	1,3	14	20	4230
20,6	57	15,3	12	43,02	44,31	34,94	22,62	23,44	13,1	1,3	14	20	4260
20,6	57	15,3	12	43,02	44,31	35,19	22,69	23,56	13,1	1,3	14	20	4290
20,6	57	15,3	12	43,02	44,31	35,13	22,75	23,56	13,1	1,3	14	20	4320
20,6	57	15,3	12	43,02	44,31	35,25	22,75	23,56	13,1	1,3	14	20	4350
20,6	57	15,3	12	43,02	44,38	35,19	22,75	23,56	13,1	1,3	14	20	4380
20,6	57	15,3	12	43,02	44,38	35,25	22,75	23,62	13,1	1,3	14	20	4410
20,6	57	15,3	12	43,02	44,44	35,06	22,81	23,62	13,1	1,3	14	20	4440
20,6	57	15,3	12	43,02	44,44	35,06	22,81	23,56	13,1	1,3	14	20	4470
20,6	57	15,3	12	43,02	44,50	35,19	22,81	23,56	13,1	1,3	14	20	4500
20,6	57	15,3	12	43,02	44,50	35,31	22,81	23,50	13,1	1,3	14	20	4530
20,6	57	15,3	12	43,02	44,56	35,19	22,81	23,44	13,1	1,3	14	20	4560
20,6	57	15,3	12	43,02	44,56	35,25	22,81	23,50	13,1	1,3	14	20	4590
20,6	57	15,3	12	43,02	44,56	35,19	22,81	23,44	13,1	1,3	14	20	4620
20,6	57	15,3	12	43,02	44,63	35,19	22,81	23,44	13,1	1,3	14	20	4650
20,6	57	15,3	12	43,02	44,63	35,06	22,75	23,50	13,1	1,3	14	20	4680
20,6	57	15,3	12	43,02	44,63	35,19	22,81	23,44	13,1	1,3	14	20	4710
20,6	57	15,3	12	43,02	44,75	35,06	22,81	23,44	13,1	1,3	14	20	4740
20,6	57	15,3	12	43,02	44,69	35,31	22,81	23,62	13,1	1,3	14	20	4770
20,6	57	15,3	12	43,02	44,69	35,44	22,81	23,56	13,1	1,3	14	20	4800
20,6	57	15,3	12	43,02	44,75	35,31	22,94	23,56	13,1	1,3	14	20	4830
20,6	57	15,3	12	43,02	44,81	35,25	22,94	23,56	13,1	1,3	14	20	4860

**PLANTILLA 10MM DE DISTANCIA DE SEPARACIÓN ENTRE BATERIA Y TUBO DE REFRIGERACIÓN, TUBO DE REFRIGERACIÓN 1MM ANGULO 60°**

TEMPERATURA AMBIENTE	HUMEDAD AMBIENTE				TEMPERATURA TERMOCUPLA 1	TEMPERATURA TERMOCUPLA 2	TEMPERATURA TERMOCUPLA 3	TEMPERATURA TERMOCUPLA 4	VOLTAJE	AMPERAJE	PRESIÓN	FLUJO DE AIRE	TIEMPO
20,6	57	15,3	12	43,02	44,88	35,25	22,94	23,50	13,1	1,3	14	20	4890
20,6	57	15,3	12	43,02	44,88	35,19	22,87	23,56	13,1	1,3	14	20	4920
20,6	57	15,3	12	43,02	44,88	35,31	22,87	23,62	13,1	1,3	14	20	4950
20,6	57	15,3	12	43,02	44,88	35,31	22,87	23,69	13,1	1,3	14	20	4980
20,6	57	15,3	12	43,02	44,88	35,38	22,87	23,69	13,1	1,3	14	20	5010
20,6	57	15,3	12	43,02	45,00	35,25	22,87	23,62	13,1	1,3	14	20	5040
20,6	57	15,3	12	43,02	44,94	35,06	22,87	23,94	13,1	1,3	14	20	5070
20,6	57	15,3	12	43,02	44,88	35,31	22,87	24,00	13,1	1,3	14	20	5100
20,6	57	15,3	12	43,02	45,00	35,13	22,87	23,81	13,1	1,3	14	20	5130
20,6	57	15,3	12	43,02	45,00	35,06	22,87	23,75	13,1	1,3	14	20	5160
20,6	57	15,3	12	43,02	45,06	35,13	23,00	23,81	13,1	1,3	14	20	5190
20,6	57	15,3	12	43,02	45,13	35,25	22,94	23,75	13,1	1,3	14	20	5220
20,6	57	15,3	12	43,02	45,19	35,31	22,94	23,69	13,1	1,3	14	20	5250
20,6	57	15,3	12	43,02	45,13	35,38	22,94	23,75	13,1	1,3	14	20	5280
20,6	57	15,3	12	43,02	45,06	35,44	22,87	23,69	13,1	1,3	14	20	5310
20,6	57	15,3	12	43,02	45,13	35,38	22,94	23,69	13,1	1,3	14	20	5340
20,6	57	15,3	12	43,02	45,13	35,25	22,94	23,62	13,1	1,3	14	20	5370
20,6	57	15,3	12	43,02	45,13	35,25	22,94	23,62	13,1	1,3	14	20	5400
20,6	57	15,3	12	43,02	45,13	35,19	23,00	23,69	13,1	1,3	14	20	5430
20,6	57	15,3	12	43,02	45,13	35,19	22,87	23,69	13,1	1,3	14	20	5460
20,6	57	15,3	12	43,02	45,19	35,31	22,94	23,62	13,1	1,3	14	20	5490
20,6	57	15,3	12	43,02	45,19	35,25	22,87	23,62	13,1	1,3	14	20	5520
20,6	57	15,3	12	43,02	45,13	35,50	22,87	23,62	13,1	1,3	14	20	5550
20,6	57	15,3	12	43,02	45,13	35,56	22,81	23,56	13,1	1,3	14	20	5580
20,6	57	15,3	12	43,02	45,13	35,56	22,81	23,56	13,1	1,3	14	20	5610
20,6	57	15,3	12	43,02	45,13	35,56	22,81	23,56	13,1	1,3	14	20	5640
20,6	57	15,3	12	43,02	45,06	35,75	22,75	23,56	13,1	1,3	14	20	5670
20,6	57	15,3	12	43,02	45,00	35,75	22,69	23,87	13,1	1,3	14	20	5700
20,6	57	15,3	12	43,02	45,06	35,44	22,75	23,87	13,1	1,3	14	20	5730
20,6	57	15,3	12	43,02	45,06	35,44	22,75	23,81	13,1	1,3	14	20	5760
20,6	57	15,3	12	43,02	45,06	35,44	22,69	23,69	13,1	1,3	14	20	5790
20,6	57	15,3	12	43,02	45,13	35,25	22,75	23,56	13,1	1,3	14	20	5820
20,6	57	15,3	12	43,02	45,13	35,25	22,75	23,75	13,1	1,3	14	20	5850
20,6	57	15,3	12	43,02	45,13	35,31	22,75	23,69	13,1	1,3	14	20	5880
20,6	57	15,3	12	43,02	45,19	35,44	22,81	23,75	13,1	1,3	14	20	5910
20,6	57	15,3	12	43,02	45,13	35,50	22,81	23,81	13,1	1,3	14	20	5940
20,6	57	15,3	12	43,02	45,13	35,25	22,81	24,00	13,1	1,3	14	20	5970
20,6	57	15,3	12	43,02	45,13	35,25	22,81	23,94	13,1	1,3	14	20	6000
20,6	57	15,3	12	43,02	45,19	35,25	22,81	23,81	13,1	1,3	14	20	6030
20,6	57	15,3	12	43,02	45,19	35,13	22,81	23,75	13,1	1,3	14	20	6060

En la siguiente gráfica se tomará en cuenta las Termocuplas 1 y 2 la cual serán las comparativa con simulación CFD y ver el comportamiento de estas dos modelos de experimentación **Figura 41**.



**Figura 41.** Comportamiento de Temperatura Termocupla 1-2.

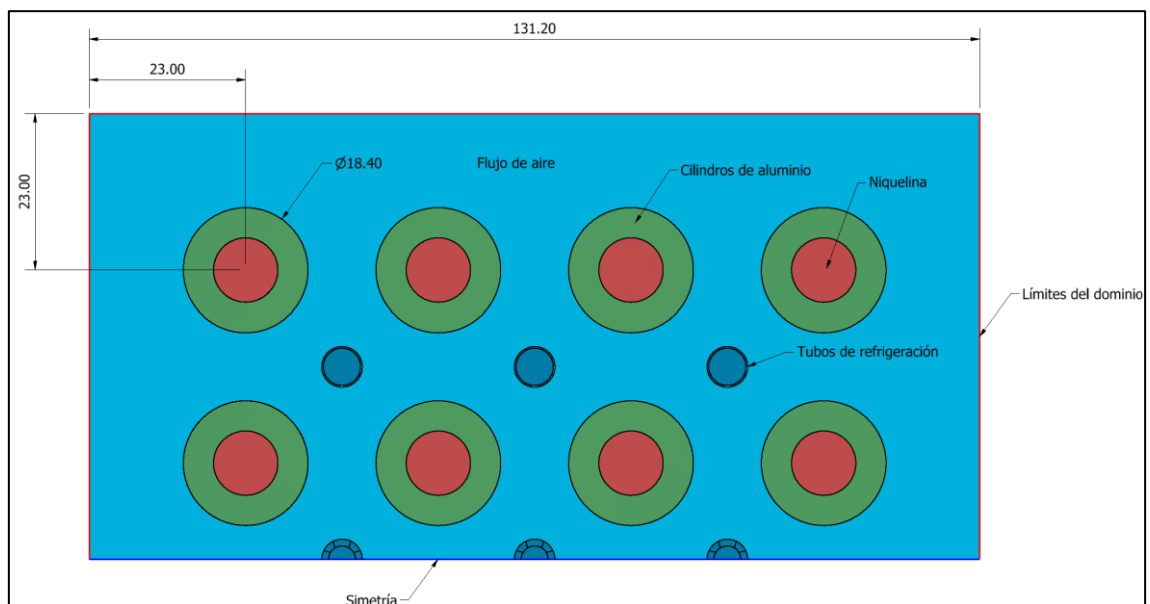
#### 6.4 Simulación CFD.

Para el proceso de simulación del banco de baterías de litio, se utilizó un modelo transitorio para estudiar el fenómeno físico de transferencia de calor en el paquete de 16 baterías, ensambladas en una configuración de 4x4. El comportamiento térmico de las baterías se analizó mediante un estudio numérico basado en un modelo de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD), utilizando el software ANSYS® en su versión estudiantil.

El proceso de carga y descarga de las celdas se emuló mediante resistencias térmicas (niquelinas), ubicadas en el interior de un cilindro hueco cuya geometría es similar al modelo 18650 en baterías de Litio. La energía suministrada a las niquelinas fue controlada mediante una fuente de corriente continua (DC) variable.

Dentro del dominio computacional, se distinguen dos regiones: el dominio de los sólidos y el dominio del fluido. El dominio de los sólidos incluye los cuerpos generadores de calor (niquelinas) y los cilindros de aluminio, cuyo comportamiento térmico depende de las propiedades del material. La transferencia de calor desde el centro hasta la superficie exterior de las baterías es por conducción, dicha energía se disipa en el dominio del fluido mediante convección forzada. Esta convección es generada por un caudal total de 20 L/min, distribuido de manera homogénea a través de 9 cilindros huecos perforados, orientados a 45° con respecto a las celdas.

La delimitación de los bordes de frontera del sistema se estableció en base a las simulaciones realizadas por Zhou et al., (2019), Jahanpanah et al., (2023). Estos autores consideraron que los bordes del sistema debían proyectarse un 125% del diámetro de las baterías con respecto a las caras longitudinales de las celdas, (ver **Figura 42**).



**Figura 42.** Límites del dominio computacional.



### 6.4.1 Ecuaciones del modelo matemático

La transferencia de calor y el flujo del fluido a través de las celdas se describen mediante las siguientes ecuaciones diferenciales de continuidad, energía y conservación del momento.

- Ecuación 14 de continuidad:

$$\frac{\partial \rho_f}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0 \quad (14)$$

Donde  $\rho_f$  es la densidad de trabajo del fluido.

- Ecuación 15 de energía:

$$\rho_f C_{p,f} * \frac{\partial T_f}{\partial t} + \Delta(\rho_f C_{p,f} \vartheta_f T_f) = \nabla * (k_f \nabla T_f) \quad (15)$$

Donde  $C_{p,f}$  es el calor específico del fluido,  $T_f$  es la temperatura del fluido y  $k_f$  es la conductividad térmica del fluido.

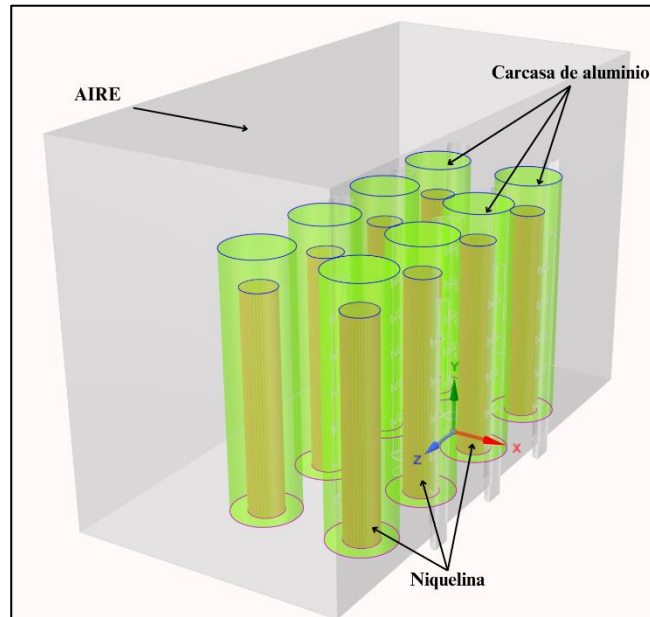
- Ecuación 16 del momento:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} * \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \right] + \frac{i \partial}{\partial x_j} (-\rho_f \overline{u_i' u_j'}) \quad (16)$$

Donde  $-\rho_f \overline{u_i' u_j'}$  representa el estrés tensor de Reynolds.

### 6.4.2 Mallado.

El mallado estructurado del modelo computacional tridimensional se generó a partir de la geometría 3D del banco de baterías modelado en el software Autodesk Inventor. Para reducir la carga computacional, se simplificó el modelo 3D original a la mitad y se omitieron los procesos de mecanizado, como ranuras y chaflanes, ya que estos aumentan el número de elementos en el mallado sin tener una incidencia significativa en los resultados. En la **Figura 43**, se observa cuerpos de color verde que son la carcasa de aluminio, los cuerpos naranjas indican a las niquelinas, y el cuerpo gris que rodea las baterías representa el fluido de aire.



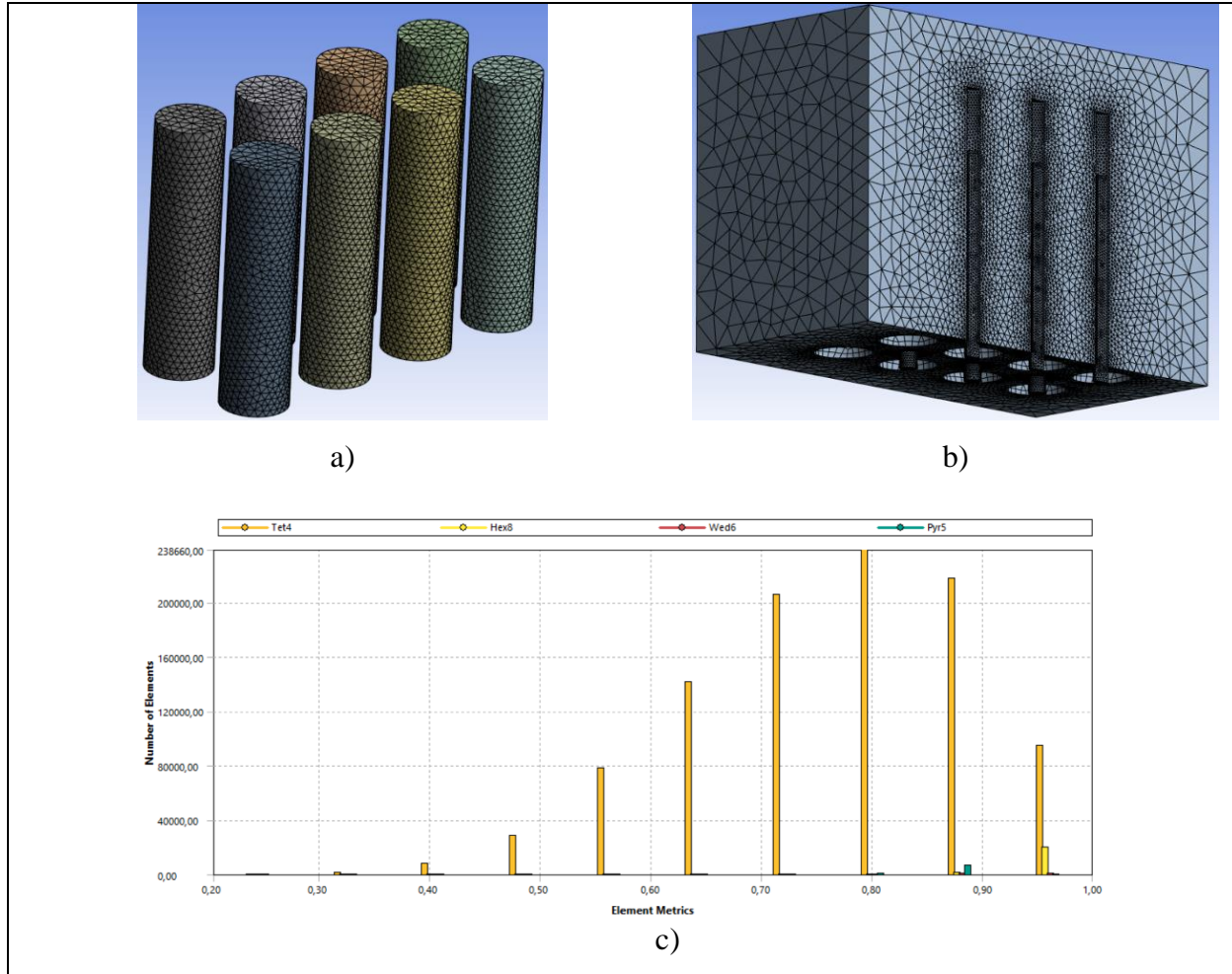
**Figura 43.** Esquema 3D del banco de baterías refrigerado por aire.

Limitados por la capacidad del análisis en elementos para la versión académica del software, se consideró utilizar la máxima cantidad disponible, equivalente a 1048576 elementos. Para garantizar la correcta integración del mallado entre dominios se activó la función de “share” de Workbench, que permite compartir la coincidencia de topología entre cuerpos y superficies alojados dentro de otros cuerpos. Los parámetros y métrica del mallado de todo el sistema se especifican en la **Tabla 5**.

**Tabla 5.** Parámetros y métrica del mallado.

Tamaño del elemento	Física de preferencia	Nodos	Cantidad de elementos	Inflación automática	Calidad de ortogonalidad promedio	Calidad de elementos promedio	Asimetría del mallado promedio	Tipo de elementos
50 mm	CFD	212269	1042748	Ninguna	0,76793	0,83421	0,2328	Tetraédrico Hexaédrico Prismático Piramidal

Según Lawrence, (2012), el rango de valores considerados “muy buenos” y “excelente” en las métricas de calidad ortogonal son 0,7-0,95 y para asimetría es 0,25-0,5. Los valores cercanos a 1 indican una calidad de los elementos próxima a la de un cubo o cuadrado perfecto, mientras que los valores cercanos a cero pueden reflejar volúmenes nulos o negativos (Almlöv & Hammar, 2024). En la **Figura 44**, se observa que el tipo de elementos predominantes en el mallado de ambos dominios son tetraédricos.



**Figura 44.** Mallado del banco: a) dominio del sólido, b) dominio del fluido y c) calidad ortogonal.

### 6.4.3 Modelo de turbulencia.

Los modelos utilizados en el análisis térmico de baterías son de energía y turbulencia. Según Zhou & et al. (2019) y Jahanpanah & et al (2023), el modelo de turbulencia k-épsilon realizable describe de forma precisa el comportamiento del fluido en los bancos de baterías refrigerados por aire. Las ecuaciones 17 y 18, correspondientes al transporte de energía cinética turbulenta y a la velocidad de disipación, se definen de la siguiente manera:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_f k_f) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho_f k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho_f \varepsilon - Y_M + S_k \quad (17)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_f \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho_f \varepsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho_f C_1 S \varepsilon - \rho_f C_2 * \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{v \varepsilon}} + C_{1\varepsilon} * \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_{b\varepsilon} \quad (18)$$

El modelo de turbulencia tiene un tratamiento mejorado de pared que considera los efectos térmicos y tiene un factor de curvatura de corrección de 1. El modelo k-épsilon Realizable tiene

varias constantes que ajustan el modelo. En el estudio realizado por Jahanpanah & et al (2023) esos factores se definen como:

- C2- épsilon: 1,9
- Número de Prantdl TKE: 1
- Número de Prantdl TDR: 1,2
- Energía del número de Prantdl: 0,85
- Pared número de Prantdl: 0,85.

#### 6.4.4 Material y condiciones de frontera

Los materiales definidos para el fluido corresponden a aire y para los cuerpos de las barras cilíndricas es aluminio, cuyas dimensiones son similares al modelo de baterías de litio INR 18650-30Q. En el interior de estas barras se alojan las resistencias térmicas, cuyo material se ha definido como acero inoxidable AISI 304 debido a su encapsulado. Según la experimentación la tasa de generación de calor por cada batería equivale a 250268,6 [W/m<sup>3</sup>]. Las propiedades térmicas de los materiales utilizados se presentan en la **Tabla 6**.

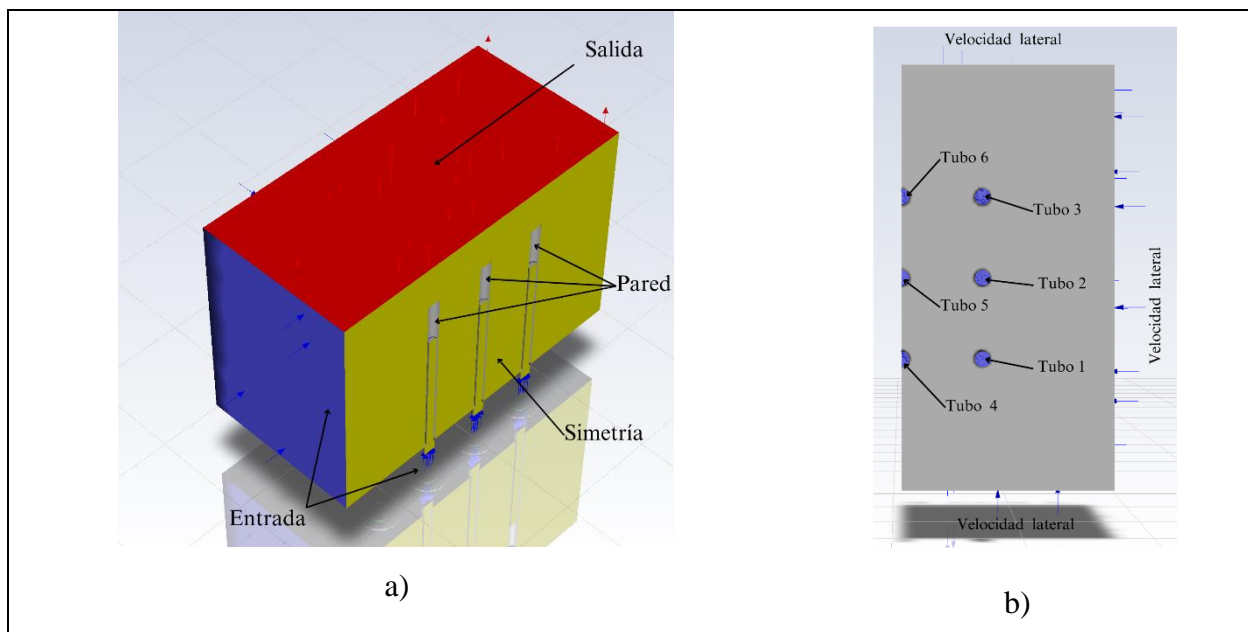
**Tabla 6.** Propiedades térmicas de los materiales.

Material	Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]	Conductividad térmica [W/(m*k)]	Calor específico [J/(kg*k)]	Viscosidad[kg/m*s]
Aire	1,225	0,0242	1006,43	1,7894 e-05
Aluminio	2830	165	890	-----
Acero inoxidable AISI 304	8000	16,2	500	-----

En la **Figura 45** se observa las condiciones de frontera que se estableció en el sistema, en dependencia del tipo de zona: entrada, salida, simetría y paredes.

- ✓ **Entrada:** en las caras laterales y en la entrada de los tubos de refrigeración, la condición inicial se definió a la velocidad, cuya magnitud varía en función de la ubicación de los orificios. El banco de baterías, ubicado en la parte inferior, está equipado con un depósito que distribuye un caudal total de 20 l/min entre los 9 tubos de refrigeración. Para asegurar una mayor precisión en la velocidad de entrada de cada tubo, se llevó a cabo una simulación independiente del depósito de flujo, cuyos resultados se presentan en la **Tabla 7**. Al encontrarse expuesto el banco de baterías al ambiente en los contornos laterales, se consideró una velocidad del viento de 0,02 [m/s], con una temperatura de 20,6 °C. Esta ligera corriente de aire influye en la transferencia de calor de las baterías exteriores.

- ✓ **Salida:** en la cara superior del dominio, se definió el contorno con presión atmosférica y una temperatura de 20,6 °C.
- ✓ **Simetría:** se aplicó un plano de simetría a la mitad del dominio original para reducir la carga computacional. Sin embargo, al utilizar esta simplificación, se reconoce que puede afectar en los resultados, debido a que en modelos de turbulencia cuyos límites de bordes no se encuentren controlados, las más pequeñas variaciones inciden en los resultados.
- ✓ **Paredes:** en la interfaz entre la celda de la batería y el fluido, se aplicó una condición de contorno antideslizante, así como la continuidad del flujo de calor.



**Figura 45.** Tipos de zonas de frontera. a) Vista isométrica y b) Vista inferior.

**Tabla 7.** Velocidades iniciales en los tubos de refrigeración.

	<b>Tubo 1</b>	<b>Tubo 2</b>	<b>Tubo 3</b>	<b>Tubo 4</b>	<b>Tubo 5</b>	<b>Tubo 6</b>
<b>Velocidad</b>	1,62	1,63	1,66	1,63	1,61	1,56
<b>[m/s]</b>						

*Nota:* en el **Anexos 7** se visualiza la simulación del fluido del depósito.

#### 6.4.5 Criterio de convergencia.

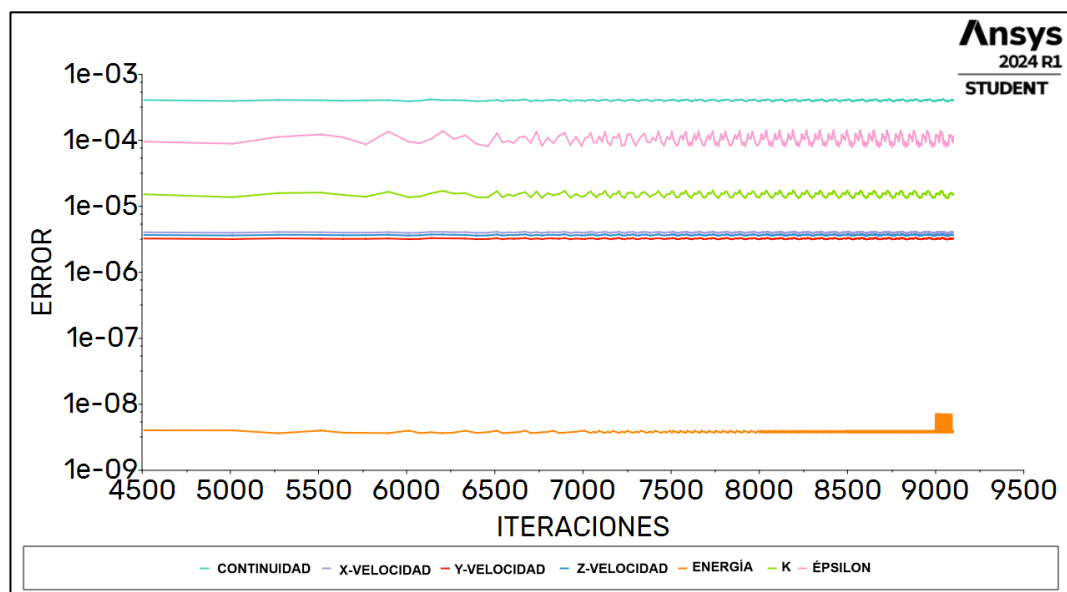
El algoritmo de solución “SIMPLEC” se definió para el método de solución según Zhou & et al (2019). Este método emplea un esquema de barlovento de segundo orden en la discretización de las ecuaciones de momento, energía cinética turbulenta y tasa de disipación de energía cinética.

La convergencia de los resultados en una simulación puede evaluarse mediante diversos

métodos, como los residuales o la cantidad de iteraciones. Los residuales en una simulación indican el error del modelo; a mayor residual, menor será la precisión de los resultados. A menudo, las curvas de los residuales tienden a estabilizarse antes de alcanzar el criterio de convergencia definido. En estos casos, la simulación se trunca basándose en la cantidad de iteraciones, que a su vez depende de una variable física específica del estudio.

El criterio de convergencia de residuos para todas las ecuaciones del sistema se propuso en  $1 \times 10^{-6}$ , con un tamaño del paso de tiempo en 5 s. Sin embargo, la simulación se truncó en la iteración 9100, debido al elevado tiempo y gasto computacional. La cantidad de iteraciones dependió del tiempo en el que la curva de temperatura en las baterías se estabilizó que fue aproximadamente a los 4000 s.

En la **Figura 46**, se observa que las curvas de los residuales mantienen un patrón estable, con las ecuaciones de velocidad estabilizándose en el criterio de convergencia. Mientras tanto, las ecuaciones de turbulencia “k” y épsilon se mantienen en el rango de  $1 \times 10^{-4}$  y  $1 \times 10^{-5}$ . La ecuación de continuidad mantiene un mayor margen de error de  $4 \times 10^{-4}$ , motivo por el cual se detuvo la simulación por la cantidad de iteraciones necesarias hasta que la temperatura de las baterías se estabilice. Por otro lado, los residuos de la energía se figan por valores menores a  $1 \times 10^{-6}$ , indicando un correcto flujo de calor en el sistema.



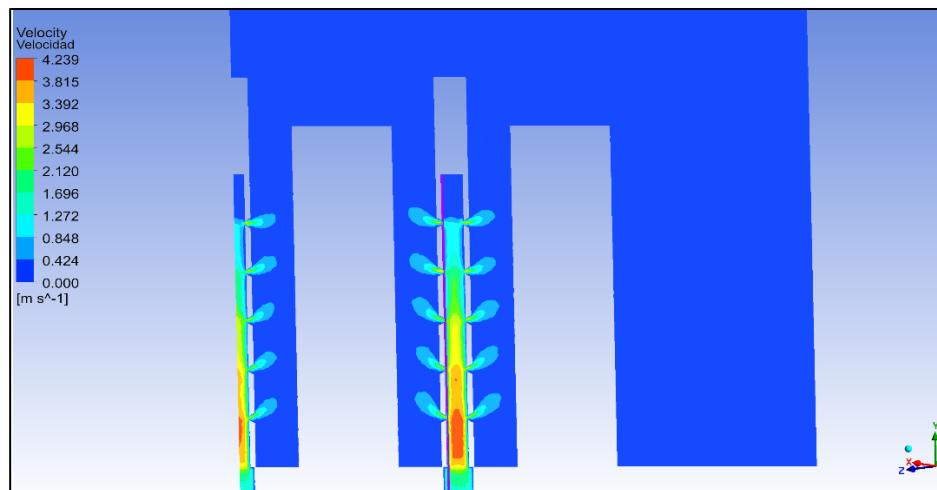
**Figura 46.** Residuos de la simulación del banco de baterías.

#### 6.4.6 Resultados de simulación.

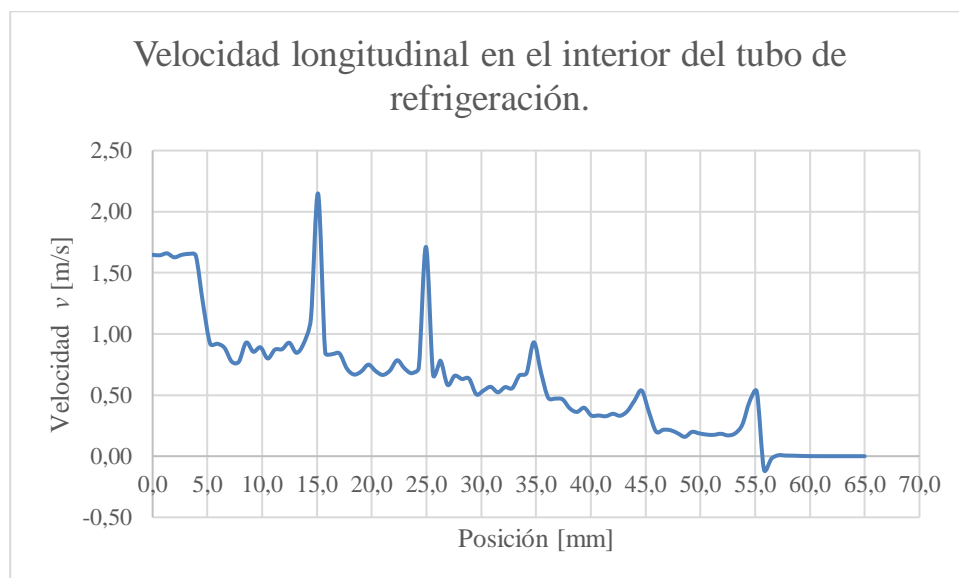
Al finalizar la simulación del banco de baterías, se procedió al preprocesamiento de los resultados, analizando las variables de temperatura y velocidad.

La velocidad del sistema es relativamente baja fuera de los tubos de refrigeración, debido

a que el sistema se encuentra abierto al ambiente. Al analizar el comportamiento del fluido dentro de los tubos se observa que en la **Figura 47**, la magnitud de la velocidad disminuye a medida que el flujo asciende. Al trazar una línea de color morada en el diámetro interior del tubo, se gráfica la componente en  $y$  de la velocidad. La curva de la gráfica de la velocidad  $v$  (Ver **Figura 48**) comienza con una velocidad elevada que disminuye progresivamente, con algunos picos causados por perturbaciones del flujo al salir por las toberas.



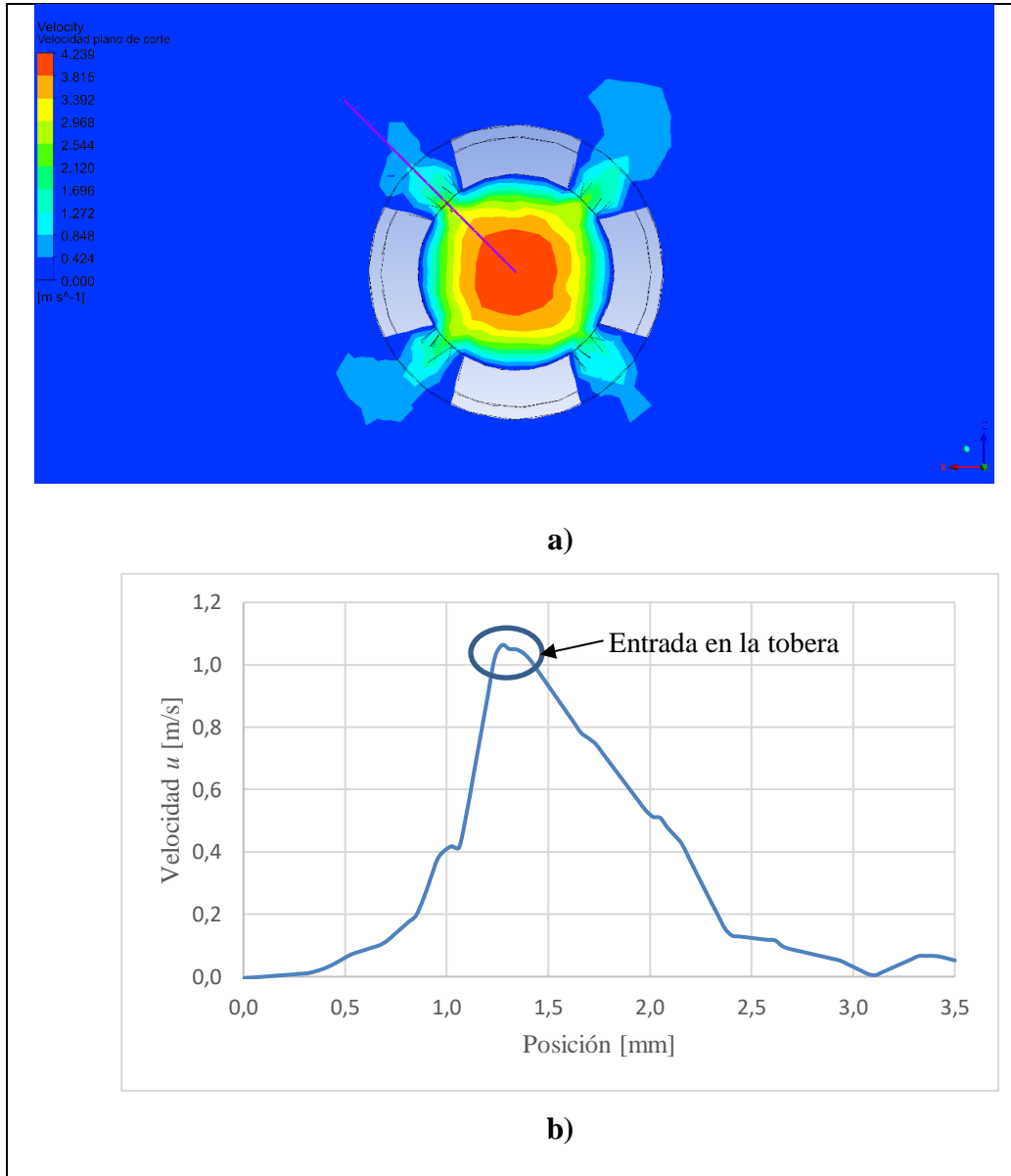
**Figura 47.** Velocidad en el dominio del fluido.



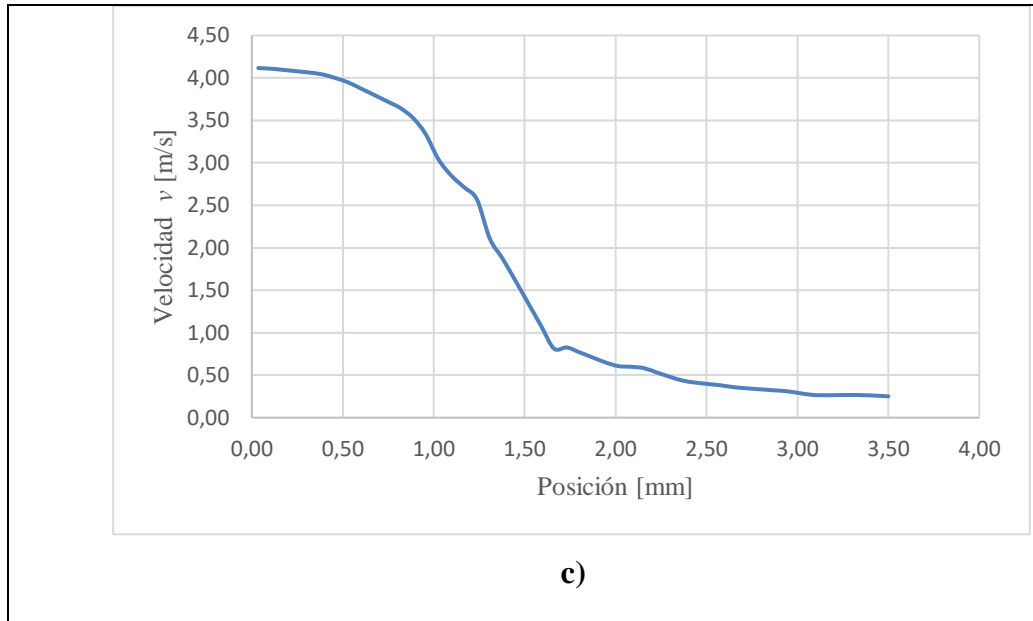
**Figura 48.** Curva de velocidad  $v$  en el interior de los tubos de refrigeración.

Al analizar el comportamiento de las componentes de la velocidad desde el interior de los tubos hacia el exterior (Ver **Figura 49a**), inicialmente la velocidad en el centro del diámetro interior pertenece a únicamente a la componente en  $v$ , paralela a la dirección del flujo. A medida que se desplaza hacia el exterior, su magnitud disminuye (Ver **Figura 49c**). Sin embargo, las componentes  $u$  y  $w$  que son similares tienden a aumentar hasta alcanzar su máximo valor en la

entrada de la tobera (Ver **Figura 49b**). Posteriormente, la curva disminuye conforme el flujo se expande hacia al ambiente.

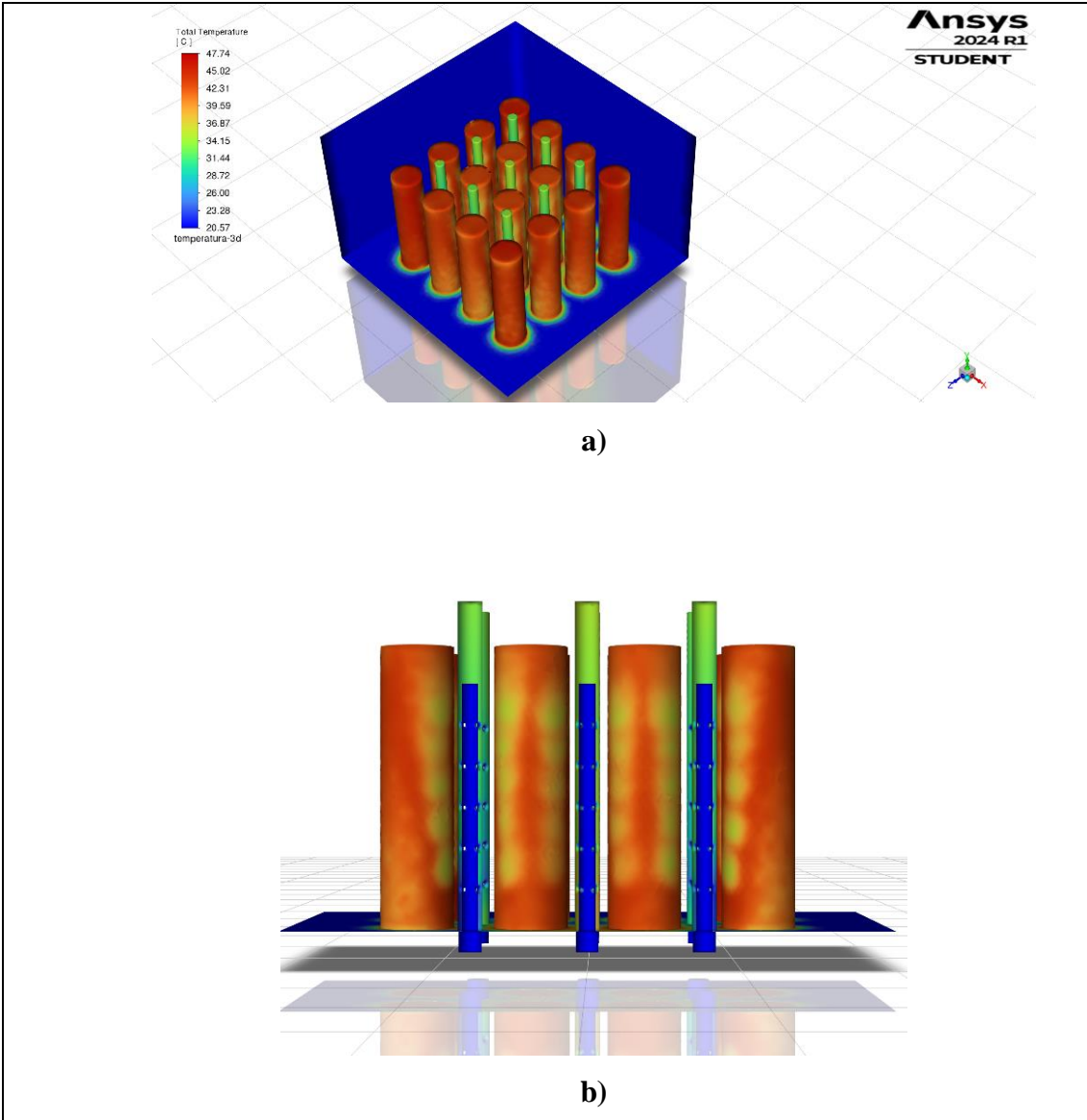






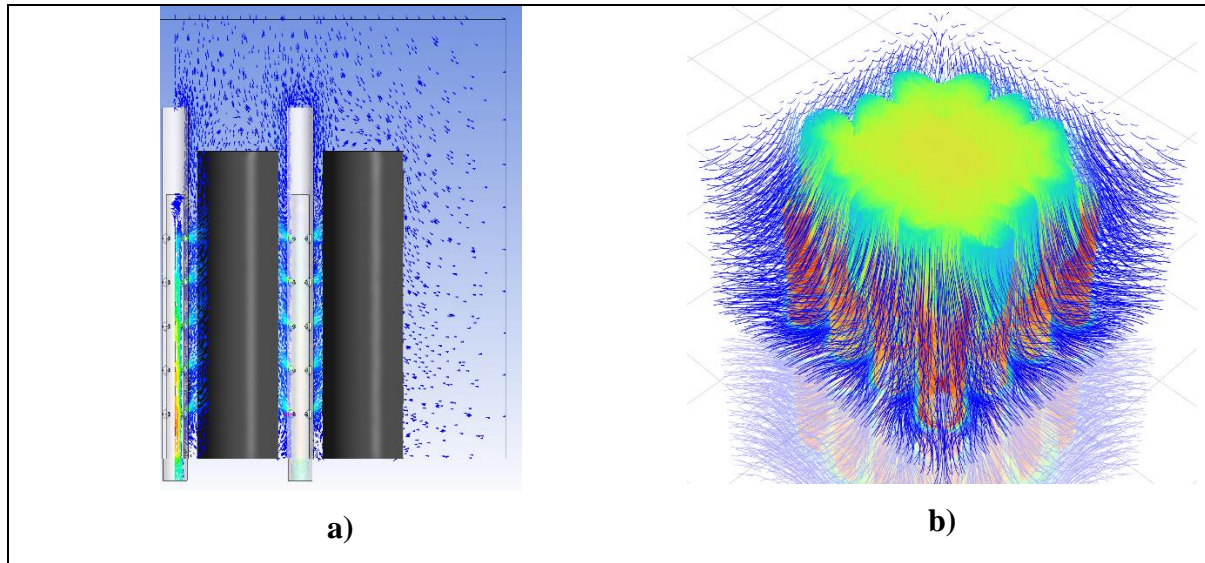
**Figura 49.** Velocidad en el orificio inferior: a) Ubicación de la línea de velocidad, b) Velocidad  $u$  y c) Velocidad  $v$ .

La temperatura de las baterías mostrada en la **Figura 50a**, no supera los  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ , que garantiza su vida útil. La orientación de las perforaciones en los tubos a  $45^{\circ}$ , con respecto a las celdas, favorece una mejor transferencia de calor por convección. Al encontrarse una mayor cantidad de flujo en los orificios inferiores en comparación con los superiores, se genera una menor temperatura en la zona inferior de las baterías (Ver **Figura 50b**). La temperatura más crítica se encontraría en la cara superior de las baterías, ya que el flujo forzado de aire en esa superficie no es directo, lo que reduce el coeficiente de transferencia de calor por convección.



**Figura 50.** Temperatura en el banco de baterías: a) Vista isométrica y b) Vista frontal.

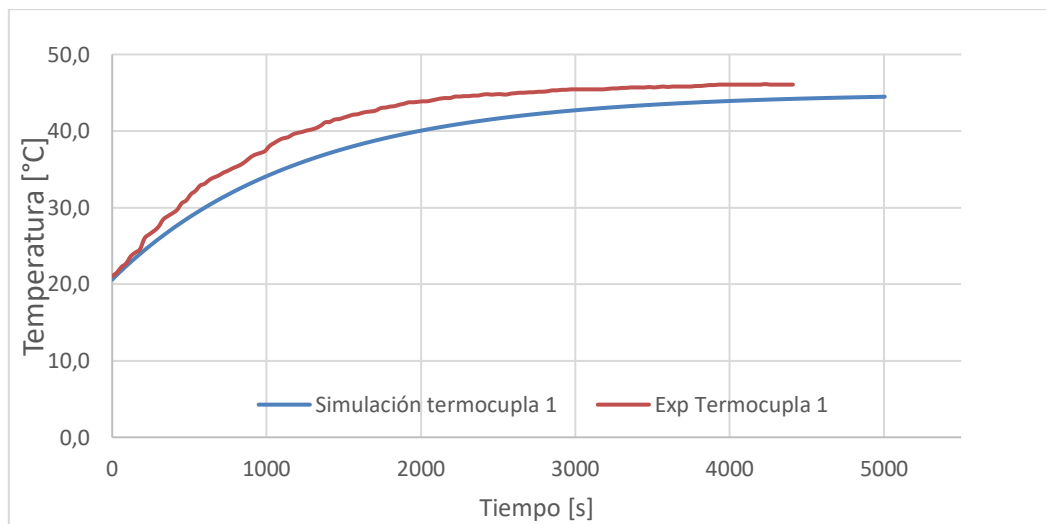
Al graficar una vectorización del aire proveniente de los tubos de refrigeración y del entorno (Ver **Figura 51a**), se visualiza que el flujo es direccionado y concentrado a la parte superior, ocasionado que se concentre una mayor temperatura en el interior del banco (Ver **Figura 51b**).



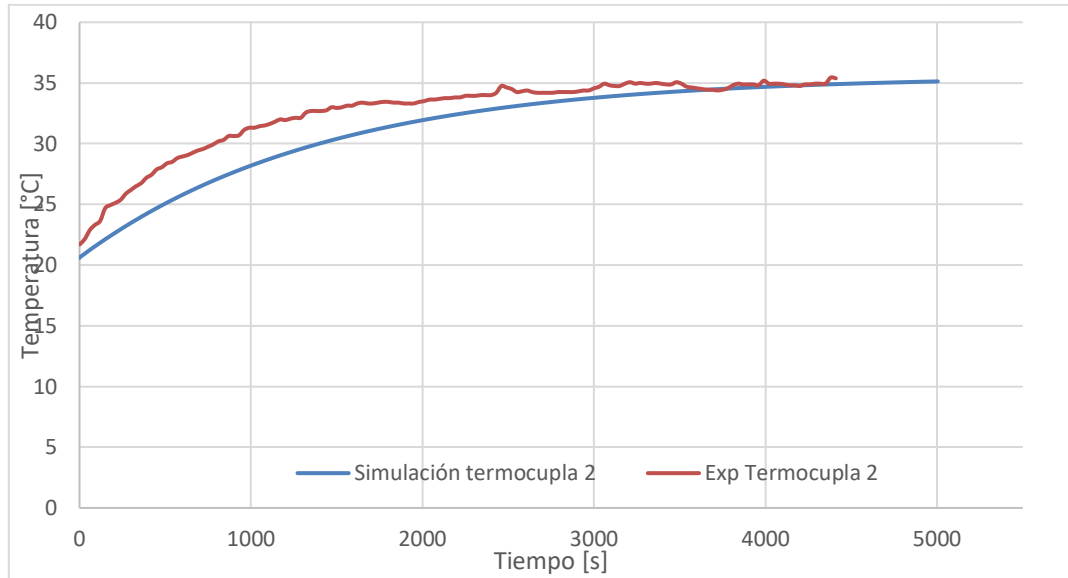
**Figura 51.** Vectorización del aire: a) Velocidad y b) Temperatura.

#### 6.4.7 Validación de los resultados de simulación

Para comparar la temperatura transitoria de la batería simulada con la experimental, se colocó puntos de referencia cercanos a la superficie, ubicándolos en la misma posición que los sensores de temperatura 1 y 2. La comparativa entre ambas curvas de temperatura se observa en la **Figura 52** a-b, la termocupla 1 registra los datos de las celdas internas, mientras que el sensor 2 recolecta la temperatura de la batería del borde exterior.



**a)**



b)

**Figura 52.** Comparativa de resultados de simulación y experimentales: a) Termocupla 1 y b) Termocupla 2.

En la **Tabla 8**, se expone las temperaturas que tienden a ser estacionarias para las baterías internas y externas del banco de baterías. Al evaluar los dos métodos de investigación se obtuvo que el porcentaje de error es menor al 5%, constatando la veracidad de los resultados.

**Tabla 8.** Error porcentual.

Método	Tiempo [s]	Temperatura estable [°C]	
		Termocupla 1	Termocupla 2
Simulación	5500	44,64	35,26
Experimental	4410	46,06	35,38
<b>Error porcentual</b>		3,084	0,328

Según los datos experimentales y la simulación, se constató que la temperatura se concentra en el interior del banco. Esto se debe a que el caudal utilizado para la refrigeración es reducido.

## 7 Discusión.

Este trabajo de titulación se desarrolló con dos enfoques metodológicos de investigación el experimental y por simulación. El método experimental se basó en la implementación de un banco de pruebas que permitió ensayar diferentes configuraciones de enfriamiento de cilindros similares a baterías del tipo 18650, en cuyo interior se alojan níquelinas de calentamiento controlado. Esos cilindros se ubican en distintas disposiciones frente a tubos eyectores de aire refrigerante con diferentes ángulos de dispersión. Mientras que, la simulación se desarrolló con la mejor configuración del banco experimental, con la finalidad de constatar y visualizar de manera general comportamiento térmico del sistema, reduciendo el tiempo computacional de análisis.

La idea de utilizar un banco que emule el calentamiento de las baterías se debe a que no se dispone de las herramientas y equipos necesarios para el control de descarga de baterías reales.

Los equipos de medición y control utilizados para regular la temperatura de los cilindros es mediante una fuente variable DC (modelo P-3010D) y los sensores de temperatura DS18B20, cuya resolución es de 0,0625 °C, mayor que en los sensores de temperatura tipo K modelo TP 01.

De las diferentes variaciones entre el distanciamiento de batería (2,5 - 4,5 - 6,5 - 8,5 - 10,5) mm, ángulos de los agujeros (0°, 30°, 60°) y un caudal variable (5-10-15-20) L/min, se experimentó que la configuración más adecuada para la refrigeración de las baterías corresponde a un caudal de 20 L/min, distanciamiento de 10,5 mm entre baterías y un ángulo de 60° en las toberas de los tubos de refrigeración, controlando la temperatura de las baterías a valores inferiores a los 45 °C.

Simultáneamente, al incrementar el ángulo en las toberas, se registra que la cobertura de impacto del flujo en la superficie de las celdas, reduce la temperatura en las baterías al mejorar la transferencia de calor hacia el ambiente.

En la refrigeración de las BIL una limitación por la instrumentación de medición fue flujómetro disponible que restringió el caudal suministrado. De la variación del caudal se observó que a mayor caudal la temperatura de las baterías y el tiempo de estabilización disminuyen. Sin embargo, existirá un caudal máximo a partir del cual un incremento ya no afectará a la temperatura de las baterías.

Debido al bajo caudal, se produce una acumulación de calor en el fluido de las celdas internas del módulo, lo que implica que se debe identificar una mejor disposición de enfriamiento para las baterías internas en el banco de baterías.

Una limitación presente en el proceso constructivo es el mecanizado de las toberas de los tubos de refrigeración, debido a los métodos convencionales utilizados lo que puede alterar la distribución del flujo hacia la superficie de las celdas.

Para mejorar el banco de ensayo se sugiere reemplazar las baterías construidas por baterías reales de litio con un sistema de control de carga y descarga, verificando los resultados de la alternativa con los de un proceso real de trabajo.

El proceso de simulación se enfocó en demostrar los resultados del proceso físico de la transferencia de calor del banco de BIL. Con base en las investigaciones de Zhou et al., (2019) y Jahanpanah et al., (2023) se retroalimentó a la simulación con el modelo de energía y de turbulencia, las condiciones de frontera y el método de solución.

El banco de baterías estuvo expuesto al ambiente de una habitación, lo que llevó a definir las condiciones de frontera en los laterales del dominio del fluido con una velocidad mínima, cuya magnitud se definió mediante un proceso iterativo, debido a la limitación en la resolución del anemómetro modelo UNI-T UT363.

Debido a las limitaciones de la versión académica del software, la capacidad de análisis en los elementos estuvo restringida. No obstante, se logró obtener una calidad de mallado que puede considerarse adecuada para los fines del estudio, con resultados de simulación que se asemejan a los resultados obtenidos mediante experimentación con un porcentaje de error menor al 5%. Esta investigación demuestra la influencia de los ángulos de cobertura de los tubos de refrigeración y la influencia del distanciamiento en el comportamiento térmico, aportando al conocimiento en el campo tecnológico de los vehículos eléctricos.

Al implementar baterías reales, el proceso de simulación debe ajustarse para replicar con precisión el comportamiento térmico de las celdas. Para ello, se puede utilizar el modelo de Newman, Tiedemann, Gu, y Kim (NTGK), el cual emula el comportamiento térmico de las baterías bajo diversas condiciones operativas. Este modelo permite comparar los resultados simulados con los obtenidos experimentalmente, asegurando una mayor fiabilidad en la validación de los datos.

Esta investigación demuestra la influencia de los ángulos de cobertura de los tubos de refrigeración y la influencia del distanciamiento en el comportamiento térmico, aportando al conocimiento en el campo tecnológico relacionado a operación de baterías.

## 8 Conclusiones


- La revisión de trabajos de investigación sobre sistemas de refrigeración de aire forzado en un paquete de baterías expone que la mejor disposición de los agujeros en los tubos de refrigeración es de 5 filas y 4 columnas equidistantes. Igualmente, en el presente trabajo dicha configuración se presenta como una solución eficaz para mantener la temperatura dentro de rangos seguros, no superando los 45°C.
- Se logró diseñar y construir de forma satisfactoria un banco experimental donde se emula el funcionamiento de las baterías a temperatura de trabajo, con los materiales locales e instrumentación disponible. El sistema de control y distribución del flujo refrigerante se construyó de forma correcta con métodos convencionales. El banco experimental operó dentro del rango de flujo refrigerante de 0 a 20 L/min, mientras que la emulación de la temperatura de operación de las baterías se logró con un voltaje de 13,1 V en corriente continua y una corriente total de 1,3 A.
- Se llevaron a cabo 15 variaciones experimentales que permitieron caracterizar el funcionamiento del sistema de refrigeración. Las variables controladas incluyeron el distanciamiento entre las pseudo baterías, el ángulo de cobertura de las toberas de los tubos de refrigeración y el caudal suministrado. La configuración de mejores prestaciones se alcanzó con un caudal total de 20 L/min, reflejando un caudal promedio de 1.6 L/min en las toberas, un distanciamiento de 10,5 mm entre las celdas y un ángulo de 60° en las toberas de los tubos de refrigeración.
- A partir de la mejor condición operativa del banco, se realizó una simulación cuyos resultados fueron comparados con los obtenidos en la fase experimental. Los resultados mostraron similitud, lo que, valida la simulación, ya que refleja de manera adecuada el comportamiento térmico del banco. Por lo tanto, se concluye que el sistema de refrigeración es efectivo para mantener la temperatura de las baterías.

## 9 Recomendaciones

- Se recomienda continuar perfeccionando el diseño del banco de baterías, con la incorporación de equipos de instrumentación más avanzados que permitan recolectar un mayor número de variables de forma precisa, con el fin de validar los resultados obtenidos mediante la simulación.
- Se sugiere utilizar baterías reales de litio con un sistema de control de carga y descarga para emular las condiciones de trabajo bajo condiciones adversas.
- Se propone utilizar un software libre y gratuito de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) de código abierto, para generar un mallado de mayor calidad sin la limitación en la capacidad de análisis.



## 10 Bibliografía

- A. M. Domingo, *Apuntes de Mecánica de Fluidos, 1997*. - *Buscar con Google*. (s. f.). Recuperado 4 de agosto de 2024, de <https://www.google.com/search?tbm=bks&q=A.+M.+Domingo%2C+Apuntes+de+Mec%C3%A1nica+de+Fluidos%2C+1997>.
- Barrón, A. J. R., & Arellano, A. M. (2022). ESTUDIO BIBLIOGRÁFICO SOBRE BATERÍAS DE ION-LITIO PARA VEHÍCULO ELÉCTRICO (BIBLIOGRAPHICAL STUDY ON LITHIUM-ION BATTERIES FOR ELECTRIC VEHICLES). *Pistas Educativas*, 44(143), Article 143. <https://pistaseducativas.celaya.tecnm.mx/index.php/pistas/article/view/2921>
- Bernad. (2018, abril 5). ¿Qué es la refrigeración con glicol? . *Jose Bernad*. <https://www.josebernad.com/que-es-la-refrigeracion-con-glicol/>
- Bono, J. F. F. (1989). *Apuntes de mecánica de fluidos*. Universidad Politécnica de Valencia, Servicio de Publicaciones.
- BU-205: *Types of Lithium-ion*. (2010, septiembre 18). Battery University. <https://batteryuniversity.com/article/bu-205-types-of-lithium-ion>
- Condiciones de contorno en dinámica de fluidos. (2024). En *Wikipedia, la enciclopedia libre*. [https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Condiciones\\_de\\_contorno\\_en\\_din%C3%A1mica\\_de\\_fluidos&oldid=159198705](https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Condiciones_de_contorno_en_din%C3%A1mica_de_fluidos&oldid=159198705)
- Contreras Gallardo, S. A. (2017). *Análisis fluidodinámico computacional para determinar el efecto térmico de la carcasa en el enfriamiento de baterías ion-litio*. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/146621>
- Cunguán Telpis, D. P., & Ulcuango Novoa, B. R. (2023a). *Ingeniería inversa y optimización del sistema de refrigeración de la batería de un vehículo urbano eléctrico* [bachelorThesis]. <https://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/13946>
- Cunguán Telpis, D. P., & Ulcuango Novoa, B. R. (2023b). *Ingeniería inversa y optimización del sistema de refrigeración de la batería de un vehículo urbano eléctrico* [B.S. thesis].

<http://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/13946>

*Explicación de los términos de la batería de iones de litio.* (s. f.). Recuperado 4 de agosto de 2024, de

[https://es.everexceed.com/blog/explicacion-de-los-terminos-de-la-bateria-de-iones-de-litio\\_b439](https://es.everexceed.com/blog/explicacion-de-los-terminos-de-la-bateria-de-iones-de-litio_b439)

Fan, L., Khodadadi, J. M., & Pesaran, A. A. (2013). A parametric study on thermal management of an air-cooled lithium-ion battery module for plug-in hybrid electric vehicles. *Journal of Power Sources*, 238, 301-312. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2013.03.050>

Hong, S., Zhang, X., Chen, K., & Wang, S. (2018). Design of flow configuration for parallel air-cooled battery thermal management system with secondary vent. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 116, 1204-1212. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.09.092>

Jahanpanah, J., Soleymani, P., Karimi, N., Babaie, M., & Saedodin, S. (2023). Transient cooling of a lithium-ion battery module during high-performance driving cycles using distributed pipes—A numerical investigation. *Journal of Energy Storage*, 74, 109278. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.109278>

Kizilel, R., Sabbah, R., Selman, J. R., & Al-Hallaj, S. (2009). An alternative cooling system to enhance the safety of Li-ion battery packs. *Journal of Power Sources*, 194(2), 1105-1112. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2009.06.074>

Lawrence, K. L. (2012). *ANSYS Tutorial: Release 14*. SDC publications. <https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=42OVolg-DrwC&oi=fnd&pg=PP2&dq=ansys+2012+introduccion+to+ansys+meshing&ots=P6rYmnbGIB&sig=ooGyhiVc0mK2AAt8rUTQtSg7w6A>

Li, X., He, F., & Ma, L. (2013). Thermal management of cylindrical batteries investigated using wind tunnel testing and computational fluid dynamics simulation. *Journal of Power Sources*, 238, 395-402. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2013.04.073>

*Lumieres—Repositorio institucional Universidad de América: Diseño de un sistema de gestión térmica para el sistema de alimentación por baterías de litio en un kart eléctrico.* (s. f.).

Recuperado 14 de abril de 2024, de

<http://repository.uamerica.edu.co/handle/20.500.11839/7897>

MANUEL, G. A. D. S., JOSE, GUILLAUME, R. A., & MANUEL, F. G., JUAN. (2017). *Introducción a la mecánica de fluidos*. Ediciones Paraninfo, S.A.

Moser Kahl, F. T. (2015). *Medición experimental del comportamiento térmico de una batería ión-litio*. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/132045>

Pesaran, A. A. (2002). Battery thermal models for hybrid vehicle simulations. *Journal of Power Sources*, 110(2), 377-382. [https://doi.org/10.1016/S0378-7753\(02\)00200-8](https://doi.org/10.1016/S0378-7753(02)00200-8)

Quintero, V. (2021). Baterías de Ion Litio: Características y aplicaciones. *I+ D Tecnológico*, 17(1), 14-22.

Saw, L. H., Ye, Y., & Tay, A. A. O. (2014). Electro-thermal analysis and integration issues of lithium ion battery for electric vehicles. *Applied Energy*, 131, 97-107. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.06.016>

Sun, H., & Dixon, R. (2014). Development of cooling strategy for an air cooled lithium-ion battery pack. *Journal of Power Sources*, 272, 404-414. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.08.107>

Tacuri, E. F. S. (2018). *UNIVERSIDAD NACIONAL DE LOJA*.

*Universidad Politécnica de Valencia*, «Convección», (s. f.).

[http://personales.upv.es/vsoto/index\\_archivos/FTP/TC/Conveccion.pdf](http://personales.upv.es/vsoto/index_archivos/FTP/TC/Conveccion.pdf).

Valdés Mery, F. M. (2015). *Modelamiento del proceso de enfriamiento de baterías de ion-litio a través de sólidos con cambio de fase*. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/137244>

Wang, T., Tseng, K. J., Zhao, J., & Wei, Z. (2014). Thermal investigation of lithium-ion battery module with different cell arrangement structures and forced air-cooling strategies. *Applied Energy*, 134, 229-238. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.08.013>

Zhang, H., Li, C., Zhang, R., Lin, Y., & Fang, H. (2020). Thermal analysis of a 6s4p Lithium-ion battery pack cooled by cold plates based on a multi-domain modeling framework. *Applied Thermal Engineering*, 173, 115216. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115216>

- Zhou, H., Zhou, F., Xu, L., Kong, J., & QingxinYang. (2019). Thermal performance of cylindrical Lithium-ion battery thermal management system based on air distribution pipe. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 131, 984-998.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.11.116>
- Zhu, C., Li, X., Song, L., & Xiang, L. (2013). Development of a theoretically based thermal model for lithium ion battery pack. *Journal of Power Sources*, 223, 155-164.  
<https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2012.09.035>

## Anexo 1. Certificación de traducción de resumen.



*Certificado No. TECH-16-10-2024-0360-F  
Loja - Ecuador*

*A quien interese*

*Por medio del presente The English Culture House - TECH*

**CERTIFICA:**

*Que, el resumen para el proyecto de titulación de JULIO CESAR CABRERA SARMIENTO, con cédula N° 1104251549, ha sido realizado por la Lic. Ana Abelina Pineda Jaramillo, Academic Manager, profesional que tiene conocimiento del nivel C1 con Certificado Internacional de Cambridge, de acuerdo al Marco Común Europeo de referencia MCER.*

**ESPAÑOL**

*Tema: Análisis de la incidencia del ángulo de dispersión y distancia de aplicación de aire en un sistema de refrigeración de baterías de Ion de Litio.*

**RESUMEN**

*En el presente trabajo se estudia y emula un prototipo de enfriamiento para un paquete de baterías de iones de litio. El sistema consiste en un banco experimental de 16 cilindros de aluminio (pseudo baterías) con geometría similar a la de las baterías 18650 en cuyo interior se alojan niquelinas, las pseudo baterías están dispuestas en una matriz 4 x 4 en cuyos espacios, inter cilindros, existen tubos con varias toberas de inyección de aire con dirección normal a las pseudo baterías. Este prototipo permite ensayar a diferentes temperaturas de las pseudo baterías, distintas distancias de disposición de las mismas, así como la distancia referente a los tubos de inyección de aire, los cuales, a su vez admiten probar o ensayar con diferentes caudales y ángulos de salida de aire en sus toberas, afectando el ángulo de dispersión y distancia de aplicación del flujo de refrigeración y consecuentemente la eficiencia del sistema de enfriamiento. Se realizó un conjunto de 15 experimentos para definir la configuración más eficiente a la hora de extraer calor del paquete de pseudo baterías. De la fase experimental, la configuración con 28.4 mm de separación entre centros de las pseudo baterías, con toberas de inyección de aire de 1 mm de diámetro, con ángulo de salida de 60° y un caudal promedio de 1.62 l/min es la de mejores prestaciones, manteniendo la menor temperatura de estado estacionario en la pseudo batería de mayor criticidad, ubicada aproximadamente en el centro del arreglo. Identificada la mejor configuración del sistema se procedió a contrastar su funcionamiento mediante una simulación de dinámica de fluidos computacional (CFD), la misma que demostró el correcto funcionamiento del prototipo con resultados de temperatura en el elemento crítico que difieren en un 3.1% de lo experimental. Este banco de pruebas servirá como una herramienta de análisis de esta*

*Dirección: Loja – Av. 8 de Diciembre 17-76 y Guayaquil (Zona Militar)  
Email: theenglishculturehouse.info@gmail.com*

*Contacto: +593 967 567 666*



**The English  
Culture House**

*"Master english, master the world"*

*alternativa de refrigeración relativamente novedosa estudiada principalmente en vehículos eléctricos.*

### **ENGLISH**

*Topic: Analysis of the incidence of the dispersion angle and air application distance in a Lithium Ion battery cooling system.*

### **SUMMARY**

*This work is a cooling prototype for a lithium-ion battery pack studied and emulated. The system consists of an experimental bank of 16 aluminium cylinders ("pseudo-batteries") with a geometry like 18650 batteries, inside which nickel strips are housed. The pseudo-batteries are arranged in a 4 x 4 matrix, with tubes containing several air injection nozzles placed in the inter-cylinder spaces and oriented perpendicularly to the pseudo-batteries. This prototype allows testing at different pseudo-battery temperatures, varying distances between them, as well as the distance to the air injection tubes. These tubes, in turn, allow for experimentation with different airflow rates and nozzle outlet angles, influencing the dispersion angle and application distance of the cooling flow, thus affecting the overall efficiency of the cooling system. A total of 15 experiments were conducted to determine the most efficient configuration for heat extraction from the pseudo-battery pack. The experimental phase identified that the optimal configuration includes a 28.4 mm separation between the middle of the pseudo-batteries, air injection nozzles with a diameter of 1 mm, an outlet angle of 60°, and an average flow rate of 1.62 l/min. This configuration maintained the lowest steady-state temperature in the most critical pseudo-battery, located approximately at the middle of the array. After identifying the best configuration, its performance was validated using a computational fluid dynamics (CFD) simulation. The simulation demonstrated the proper operation of the prototype, with temperature results in the critical element differing by only 3.1% from the experimental data. This test benches will serve as an analytical tool for this relatively novel cooling alternative, primarily studied in electric vehicles.*

**Atentamente,**

**TECH**

**Lic. Ana Abelina Pineda Jaramillo  
ACADEMIC MANAGER**

**Dirección: Loja – Av. 8 de Diciembre 17-76 y Guayaquil (Zona Militar)  
Email: theenglishculturehouse.info@gmail.com**

**Contacto: +593 967 567 666**

**Anexo 2. Datos obtenidos en plantilla de 10 mm de separación batería y tubo de refrigeración.**

<b>PLANTILLA 10MM DE DISTANCIA DE SEPARACIÓN ENTRE BATERIA Y TUBO DE REFRIGERACIÓN, TUBO DE REFRIGERACIÓN 1MM ANGULO 0°</b>													
TEMPERATURA AMBIENTE	HUMEDAD AMBIENTE				TEMPERATURA TERMOCUPLA 1	TEMPERATURA TERMOCUPLA 2	TEMPERATURA TERMOCUPLA 3	TEMPERATURA TERMOCUPLA 4	VOLTAJE	AMPERAJE	PRESIÓN	FLUJO DE AIRE	TIEMPO
°C	%RH	WB	DP	KJ/KG	°C	°C	°C	°C	VDC	ADC	PSI	L/MIN	MIN
20,7	64	16,4	13,7	45,89	45,44	35,63	21,31	20,81	13,1	1,3	0	0	0
20,7	64	16,4	13,7	45,89	46,19	36,00	21,44	20,94	13,1	1,3	14	5	1
20,7	64	16,4	13,7	45,89	46,38	36,00	21,44	20,94	13,1	1,3	14	10	1
20,7	64	16,4	13,7	45,89	46,38	35,94	21,50	21,06	13,1	1,3	14	15	2
20,7	64	16,4	13,7	45,89	46,25	36,50	21,50	21,00	13,1	1,3	14	20	3
20,7	64	16,4	13,7	45,89	45,88	36,56	21,62	21,19	13,1	1,3	14	20	5
20,7	64	16,4	13,7	45,89	45,25	36,81	25,56	21,06	13,1	1,3	14	20	10

<b>PLANTILLA 10MM DE DISTANCIA DE SEPARACIÓN ENTRE BATERIA Y TUBO DE REFRIGERACIÓN, TUBO DE REFRIGERACIÓN 1MM ANGULO 30°</b>													
TEMPERATURA AMBIENTE	HUMEDAD AMBIENTE				TEMPERATURA TERMOCUPLA 1	TEMPERATURA TERMOCUPLA 2	TEMPERATURA TERMOCUPLA 3	TEMPERATURA TERMOCUPLA 4	VOLTAJE	AMPERAJE	PRESIÓN	FLUJO DE AIRE	TIEMPO
°C	%RH	WB	DP	KJ/KG	°C	°C	°C	°C	VDC	ADC	PSI	L/MIN	MIN
20,7	64	16,4	13,7	45,89	45,44	35,55	21,72	20,95	13,1	1,3	0	0	0
20,7	64	16,4	13,7	45,89	45,63	35,13	21,44	21,12	13,1	1,3	14	5	1
20,7	64	16,4	13,7	45,89	45,88	35,31	21,50	21,06	13,1	1,3	14	10	1
20,7	64	16,4	13,7	45,89	46,19	35,56	21,50	21,12	13,1	1,3	14	15	2
20,7	64	16,4	13,7	45,89	46,38	35,75	21,62	21,12	13,1	1,3	14	20	3
20,7	64	16,4	13,7	45,89	46,38	36,25	21,69	21,12	13,1	1,3	14	20	5
20,7	64	16,4	13,7	45,89	46,13	36,88	21,62	21,25	13,1	1,3	14	20	10

<b>PLANTILLA 10MM DE DISTANCIA DE SEPARACIÓN ENTRE BATERIA Y TUBO DE REFRIGERACIÓN, TUBO DE REFRIGERACIÓN 1MM ANGULO 60°</b>													
TEMPERATURA AMBIENTE	HUMEDAD AMBIENTE				TEMPERATURA TERMOCUPLA 1	TEMPERATURA TERMOCUPLA 2	TEMPERATURA TERMOCUPLA 3	TEMPERATURA TERMOCUPLA 4	VOLTAJE	AMPERAJE	PRESIÓN	FLUJO DE AIRE	TIEMPO
°C	%RH	WB	DP	KJ/KG	°C	°C	°C	°C	VDC	ADC	PSI	L/MIN	MIN
20,7	64	16,4	13,7	45,89	45,44	35,38	21,94	21,56	13,1	1,3	0	0	0
20,7	64	16,4	13,7	45,89	45,75	35,63	21,94	21,62	13,1	1,3	14	5	1
20,7	64	16,4	13,7	45,89	45,94	35,75	21,87	21,62	13,1	1,3	14	10	1
20,7	64	16,4	13,7	45,89	46,13	36,06	21,87	21,62	13,1	1,3	14	15	2
20,7	64	16,4	13,7	45,89	46,06	36,31	21,87	21,69	13,1	1,3	14	20	3
20,7	64	16,4	13,7	45,89	45,87	36,69	22,06	21,87	13,1	1,3	14	20	5
20,7	64	16,4	13,7	45,89	45,25	37,31	22,00	21,94	13,1	1,3	14	20	10
20,7	64	16,4	13,7	45,89	45,13	37,13	22,12	22,12	13,1	1,3	14	20	10

**Anexo 3. Datos obtenidos en plantilla de 8 mm de separación batería y tubo de refrigeración.**

<b>PLANTILLA 8 mm DE DISTANCIA DE SEPARACIÓN ENTRE BATERIA Y TUBO DE REFRIGERACIÓN, TUBO DE REFRIGERACIÓN 1 mm ANGULO 0°</b>													
TEMPERATURA AMBIENTE	HUMEDAD AMBIENTE				TEMPERATURA TERMOCUPL A 1	TEMPERATURA TERMOCUPL A 2	TEMPERATURA TERMOCUPL A 3	TEMPERATURA TERMOCUPL A 4	VOLTAJE	AMPERAJE	PRESIÓN	FLUJO DE AIRE	TIEMPO
°C	%RH	WB	DP	KJ/KG	°C	°C	°C	°C	VDC	ADC	PSI	L/MIN	MIN
20,4	64,9	16,2	13,7	45,46	45,00	35,25	21,31	20,62	13,1	1,3	0	0	0
20,4	64,9	16,2	13,7	45,46	45,50	35,56	21,37	20,69	13,1	1,3	14	5	1
20,4	64,9	16,2	13,7	45,46	46,13	35,69	21,50	20,75	13,1	1,3	14	10	1
20,4	64,9	16,2	13,7	45,46	46,56	36,19	21,44	20,75	13,1	1,3	14	15	2
20,4	64,9	16,2	13,7	45,46	47,06	36,63	21,87	20,81	13,1	1,3	14	20	3
20,4	64,9	16,2	13,7	45,46	47,13	37,06	21,69	20,81	13,1	1,3	14	20	5
20,4	64,9	16,2	13,7	45,46	47,00	37,81	21,94	20,81	13,1	1,3	14	20	10

<b>PLANTILLA 8 mm DE DISTANCIA DE SEPARACIÓN ENTRE BATERIA Y TUBO DE REFRIGERACIÓN, TUBO DE REFRIGERACIÓN 1 mm ANGULO 30°</b>													
TEMPERATURA AMBIENTE	HUMEDAD AMBIENTE				TEMPERATURA TERMOCUPL A 1	TEMPERATURA TERMOCUPL A 2	TEMPERATURA TERMOCUPL A 3	TEMPERATURA TERMOCUPL A 4	VOLTAJE	AMPERAJE	PRESIÓN	FLUJO DE AIRE	TIEMPO
°C	%RH	WB	DP	KJ/KG	°C	°C	°C	°C	VDC	ADC	PSI	L/MIN	MIN
20,7	64	16,4	13,7	45,89	45,00	35,25	21,31	20,62	13,1	1,3	0	0	0
20,7	64	16,4	13,7	45,89	45,38	36,25	21,56	20,69	13,1	1,3	14	5	1
20,7	64	16,4	13,7	45,89	45,69	36,44	21,62	20,69	13,1	1,3	14	10	1
20,7	64	16,4	13,7	45,89	46,13	36,75	21,62	20,81	13,1	1,3	14	15	2
20,7	64	16,4	13,7	45,89	46,50	37,00	21,62	20,81	13,1	1,3	14	20	3
20,7	64	16,4	13,7	45,89	46,56	37,44	21,87	20,84	13,1	1,3	14	20	5
20,7	64	16,4	13,7	45,89	46,31	37,81	21,81	20,94	13,1	1,3	14	20	10

<b>PLANTILLA 8 mm DE DISTANCIA DE SEPARACIÓN ENTRE BATERIA Y TUBO DE REFRIGERACIÓN, TUBO DE REFRIGERACIÓN 1 mm ANGULO 60°</b>													
TEMPERATURA AMBIENTE	HUMEDAD AMBIENTE				TEMPERATURA TERMOCUPL A 1	TEMPERATURA TERMOCUPL A 2	TEMPERATURA TERMOCUPL A 3	TEMPERATURA TERMOCUPL A 4	VOLTAJE	AMPERAJE	PRESIÓN	FLUJO DE AIRE	TIEMPO
°C	%RH	WB	DP	KJ/KG	°C	°C	°C	°C	VDC	ADC	PSI	L/MIN	MIN
20,1	64	16,4	13,7	45,89	45,01	36,01	21,37	20,56	13,1	1,3	0	0	0
20,1	64	16,4	13,7	45,89	45,44	36,06	21,44	20,56	13,1	1,3	14	5	1
20,1	64	16,4	13,7	45,89	45,75	36,31	21,44	20,62	13,1	1,3	14	10	1
20,1	64	16,4	13,7	45,89	45,94	36,50	21,44	20,56	13,1	1,3	14	15	2
20,1	64	16,4	13,7	45,89	46,13	36,81	21,50	20,50	13,1	1,3	14	20	3
20,1	64	16,4	13,7	45,89	46,06	36,94	21,81	20,56	13,1	1,3	14	20	5
20,1	64	16,4	13,7	45,89	45,63	37,63	21,56	20,50	13,1	1,3	14	20	10
					45,38	37,94	21,50	20,50	13,1	1,3	14	20	10



**Anexo 4. Datos obtenidos en plantilla de 6 mm de separación batería y tubo de refrigeración.**

PLANTILLA 6 mm DE DISTANCIA DE SEPARACIÓN ENTRE BATERIA Y TUBO DE REFRIGERACIÓN, TUBO DE REFRIGERACIÓN 1 mm ANGULO 0°													
TEMPERATURA AMBIENTE	HUMEDAD AMBIENTE				TEMPERATURA TERMOCUPLA 1	TEMPERATURA TERMOCUPLA 2	TEMPERATURA TERMOCUPLA 3	TEMPERATURA TERMOCUPLA 4	VOLTAJE	AMPERAJE	PRESIÓN	FLUJO DE AIRE	TIEMPO
°C	%RH	WB	DP	KJ/KG	°C	°C	°C	°C	VDC	ADC	PSI	L/MIN	MIN
20,3	63,9	15,6	12,9	43,7	45,00	35,25	20,87	20,44	13,1	1,3	0	0	0
20,3	63,9	15,6	12,9	43,7	45,50	35,50	20,87	20,44	13,1	1,3	14	5	1
20,3	63,9	15,6	12,9	43,7	46,19	35,88	21,00	20,44	13,1	1,3	14	10	1
20,3	63,9	15,6	12,9	43,7	46,94	37,00	21,19	20,50	13,1	1,3	14	15	2
20,3	63,9	15,6	12,9	43,7	47,56	37,63	21,56	20,44	13,1	1,3	14	20	3
20,3	63,9	15,6	12,9	43,7	48,13	38,44	21,81	20,50	13,1	1,3	14	20	5
20,3	63,9	15,6	12,9	43,7	48,75	39,63	21,81	20,5	13,1	1,3	14	20	10

PLANTILLA 6 mm DE DISTANCIA DE SEPARACIÓN ENTRE BATERIA Y TUBO DE REFRIGERACIÓN, TUBO DE REFRIGERACIÓN 1 mm ANGULO 30°													
TEMPERATURA AMBIENTE	HUMEDAD AMBIENTE				TEMPERATURA TERMOCUPLA 1	TEMPERATURA TERMOCUPLA 2	TEMPERATURA TERMOCUPLA 3	TEMPERATURA TERMOCUPLA 4	VOLTAJE	AMPERAJE	PRESIÓN	FLUJO DE AIRE	TIEMPO
°C	%RH	WB	DP	KJ/KG	°C	°C	°C	°C	VDC	ADC	PSI	L/MIN	MIN
20,3	63,9	15,6	12,9	43,7	45,02	36,63	21,00	20,50	13,1	1,3	0	0	0
20,3	63,9	15,6	12,9	43,7	45,38	36,81	21,06	20,50	13,1	1,3	14	5	1
20,3	63,9	15,6	12,9	43,7	45,69	37,25	21,19	20,50	13,1	1,3	14	10	1
20,3	63,9	15,6	12,9	43,7	45,88	38,19	21,12	20,44	13,1	1,3	14	15	2
20,3	63,9	15,6	12,9	43,7	46,00	39,13	21,50	20,50	13,1	1,3	14	20	3
20,3	63,9	15,6	12,9	43,7	46,13	39,63	21,44	20,56	13,1	1,3	14	20	5
20,3	63,9	15,6	12,9	43,7	46,00	40,5	21,56	20,50	13,1	1,3	14	20	10

PLANTILLA 6 mm DE DISTANCIA DE SEPARACIÓN ENTRE BATERIA Y TUBO DE REFRIGERACIÓN, TUBO DE REFRIGERACIÓN 1 mm ANGULO 60°													
TEMPERATURA AMBIENTE	HUMEDAD AMBIENTE				TEMPERATURA TERMOCUPLA 1	TEMPERATURA TERMOCUPLA 2	TEMPERATURA TERMOCUPLA 3	TEMPERATURA TERMOCUPLA 4	VOLTAJE	AMPERAJE	PRESIÓN	FLUJO DE AIRE	TIEMPO
°C	%RH	WB	DP	KJ/KG	°C	°C	°C	°C	VDC	ADC	PSI	L/MIN	MIN
20,3	63,9	15,6	12,9	43,7	45,00	36,31	21,75	20,62	13,1	1,3	0	0	0
20,3	63,9	15,6	12,9	43,7	45,00	36,13	21,56	20,62	13,1	1,3	14	5	1
20,3	63,9	15,6	12,9	43,7	45,06	36,38	21,50	20,56	13,1	1,3	14	10	1
20,3	63,9	15,6	12,9	43,7	45,38	37,50	21,44	20,62	13,1	1,3	14	15	2
20,3	63,9	15,6	12,9	43,7	45,75	38,56	21,56	20,50	13,1	1,3	14	20	3
20,3	63,9	15,6	12,9	43,7	46,25	39,38	21,62	20,44	13,1	1,3	14	20	5
20,3	63,9	15,6	12,9	43,7	46,44	40,19	21,69	20,44	13,1	1,3	14	20	10
					46,94	40,56	21,56	20,5	13,1	1,3	14	20	10

**Anexo 5. Datos obtenidos en plantilla de 4 mm de separación batería y tubo de refrigeración.**

PLANTILLA 4 mm DE DISTANCIA DE SEPARACIÓN ENTRE BATERIA Y TUBO DE REFRIGERACIÓN, TUBO DE REFRIGERACIÓN 1 mm ANGULO 0°													
TEMPERATURA AMBIENTE	HUMEDAD AMBIENTE				TEMPERATURA TERMOCUPLA 1	TEMPERATURA TERMOCUPLA 2	TEMPERATURA TERMOCUPLA 3	TEMPERATURA TERMOCUPLA 4	VOLTAJE	AMPERAJE	PRESIÓN	FLUJO DE AIRE	TIEMPO
°C	%RH	WB	DP	KJ/KG	°C	°C	°C	°C	VDC	ADC	PSI	L/MIN	MIN
20,1	64,2	15,7	12,9	43,55	45,00	33,44	20,75	20,31	13,1	1,3	0	0	0
20,1	64,2	15,7	12,9	43,55	45,75	34,06	20,69	20,25	13,1	1,3	14	5	1
20,1	64,2	15,7	12,9	43,55	46,25	34,69	20,75	20,31	13,1	1,3	14	10	1
20,1	64,2	15,7	12,9	43,55	46,94	35,81	20,69	20,31	13,1	1,3	14	15	2
20,1	64,2	15,7	12,9	43,55	47,44	37,21	21,12	20,50	13,1	1,3	14	20	3
20,1	64,2	15,7	12,9	43,55	48,13	38,44	20,94	20,87	13,1	1,3	14	20	5
20,1	64,2	15,7	12,9	43,55	49,63	41	21,31	20,87	13,1	1,3	14	20	10

47,44

PLANTILLA 4 mm DE DISTANCIA DE SEPARACIÓN ENTRE BATERIA Y TUBO DE REFRIGERACIÓN, TUBO DE REFRIGERACIÓN 1 mm ANGULO 30°													
TEMPERATURA AMBIENTE	HUMEDAD AMBIENTE				TEMPERATURA TERMOCUPLA 1	TEMPERATURA TERMOCUPLA 2	TEMPERATURA TERMOCUPLA 3	TEMPERATURA TERMOCUPLA 4	VOLTAJE	AMPERAJE	PRESIÓN	FLUJO DE AIRE	TIEMPO
°C	%RH	WB	DP	KJ/KG	°C	°C	°C	°C	VDC	ADC	PSI	L/MIN	MIN
20,1	64,2	15,7	12,9	43,55	45,00	35,69	21,19	20,94	13,1	1,3	0	0	0
20,1	64,2	15,7	12,9	43,55	45,81	36,25	21,19	20,94	13,1	1,3	14	5	1
20,1	64,2	15,7	12,9	43,55	26,31	36,69	21,19	21,00	13,1	1,3	14	10	1
20,1	64,2	15,7	12,9	43,55	47,13	37,19	21,19	21,19	13,1	1,3	14	15	2
20,1	64,2	15,7	12,9	43,55	47,69	39,06	21,19	21,50	13,1	1,3	14	20	3
20,1	64,2	15,7	12,9	43,55	48,80	39,50	21,37	21,44	13,1	1,3	14	20	5
20,1	64,2	15,7	12,9	43,55	50,56	41	21,44	21,81	13,1	1,3	14	20	10

PLANTILLA 4 mm DE DISTANCIA DE SEPARACIÓN ENTRE BATERIA Y TUBO DE REFRIGERACIÓN, TUBO DE REFRIGERACIÓN 1 mm ANGULO 60°													
TEMPERATURA AMBIENTE	HUMEDAD AMBIENTE				TEMPERATURA TERMOCUPLA 1	TEMPERATURA TERMOCUPLA 2	TEMPERATURA TERMOCUPLA 3	TEMPERATURA TERMOCUPLA 4	VOLTAJE	AMPERAJE	PRESIÓN	FLUJO DE AIRE	TIEMPO
°C	%RH	WB	DP	KJ/KG	°C	°C	°C	°C	VDC	ADC	PSI	L/MIN	MIN
20,1	64,2	15,7	12,9	43,55	45,05	34,94	21,50	21,60	13,1	1,3	0	0	0
20,1	64,2	15,7	12,9	43,55	46,00	35,50	21,62	21,75	13,1	1,3	14	5	1
20,1	64,2	15,7	12,9	43,55	46,53	35,81	21,61	21,87	13,1	1,3	14	10	1
20,1	64,2	15,7	12,9	43,55	47,50	36,81	21,81	21,81	13,1	1,3	14	15	2
20,1	64,2	15,7	12,9	43,55	48,31	38,00	21,75	21,94	13,1	1,3	14	20	3
20,1	64,2	15,7	12,9	43,55	49,25	39,75	22,12	22,06	13,1	1,3	14	20	5
20,1	64,2	15,7	12,9	43,55	50,69	41,44	22,00	22,25	13,1	1,3	14	20	10
					51,06	42,19	22,00	22,37	13,1	1,3	14	20	10

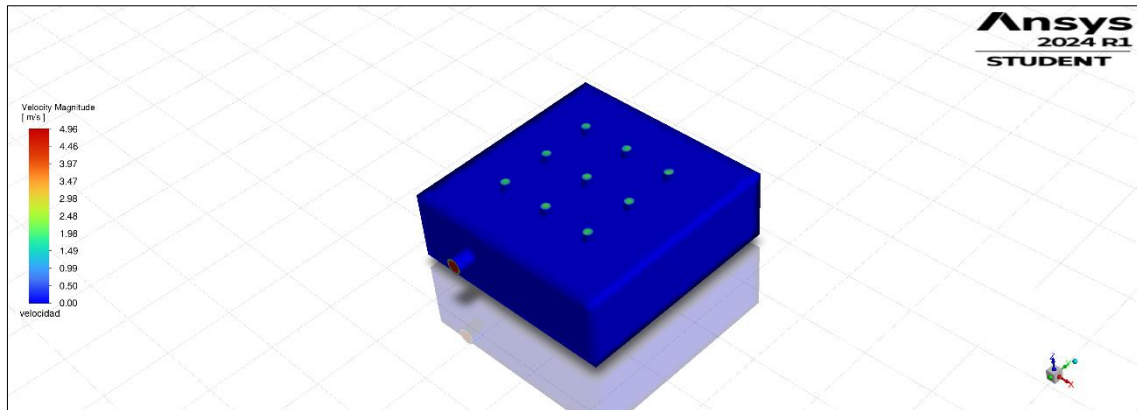
**Anexo 6. Datos obtenidos en plantilla de 2 mm de separación batería y tubo de refrigeración.**

<b>PLANTILLA 2 mm DE DISTANCIA DE SEPARACIÓN ENTRE BATERIA Y TUBO DE REFRIGERACIÓN, TUBO DE REFRIGERACIÓN 1 mm ANGULO 0°</b>													
TEMPERATURA AMBIENTE	HUMEDAD AMBIENTE				TEMPERATURA TERMOCUPLA 1	TEMPERATURA TERMOCUPLA 2	TEMPERATURA TERMOCUPLA 3	TEMPERATURA TERMOCUPLA 4	VOLTAJE	AMPERAJE	PRESIÓN	FLUJO DE AIRE	TIEMPO
°C	%RH	WB	DP	KJ/KG	°C	°C	°C	°C	VDC	ADC	PSI	L/MIN	MIN
19,2	65,8	15,3	12,6	42,52	45,00	34,94	20,00	19,50	13,1	1,3	0	0	0
19,2	65,8	15,3	12,6	42,52	45,88	35,75	20,00	19,50	13,1	1,3	14	5	1
19,2	65,8	15,3	12,6	42,52	46,56	36,25	20,06	19,50	13,1	1,3	14	10	1
19,2	65,8	15,3	12,6	42,52	47,56	37,56	20,37	19,50	13,1	1,3	14	15	2
19,2	65,8	15,3	12,6	42,52	49,13	39,63	20,56	19,62	13,1	1,3	14	20	3
19,2	65,8	15,3	12,6	42,52	50,13	41,00	20,50	19,62	13,1	1,3	14	20	5
19,2	65,8	15,3	12,6	42,52	52,63	43,63	20,62	19,69	13,1	1,3	14	20	10

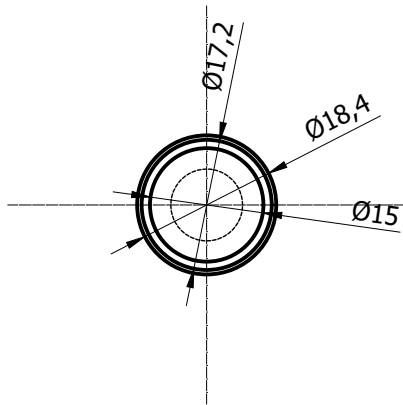
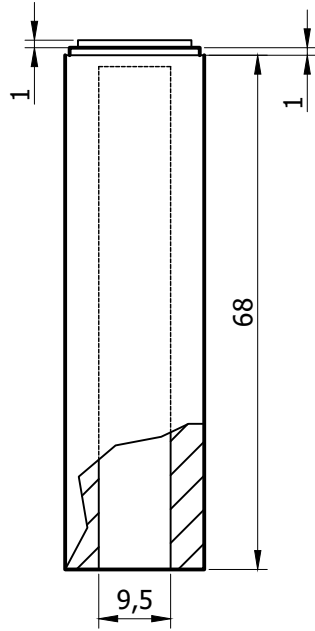
<b>PLANTILLA 2 mm DE DISTANCIA DE SEPARACIÓN ENTRE BATERIA Y TUBO DE REFRIGERACIÓN, TUBO DE REFRIGERACIÓN 1 mm ANGULO 30°</b>													
TEMPERATURA AMBIENTE	HUMEDAD AMBIENTE				TEMPERATURA TERMOCUPLA 1	TEMPERATURA TERMOCUPLA 2	TEMPERATURA TERMOCUPLA 3	TEMPERATURA TERMOCUPLA 4	VOLTAJE	AMPERAJE	PRESIÓN	FLUJO DE AIRE	TIEMPO
°C	%RH	WB	DP	KJ/KG	°C	°C	°C	°C	VDC	ADC	PSI	L/MIN	MIN
20,00	63,00	15,5	12,7	43,75	45,06	38,19	21,12	20,12	13,1	1,3	0	0	0
20,00	63,00	15,5	12,7	43,75	46,42	38,38	20,87	20,12	13,1	1,3	14	5	1
20,00	63,00	15,5	12,7	43,75	47,40	38,63	20,75	20,19	13,1	1,3	14	10	1
20,00	63,00	15,5	12,7	43,75	48,50	39,94	20,81	20,12	13,1	1,3	14	15	2
20,00	63,00	15,5	12,7	43,75	49,69	41,25	21,00	20,06	13,1	1,3	14	20	3
20,00	63,00	15,5	12,7	43,75	51,06	42,63	20,69	20,19	13,1	1,3	14	20	5
20,00	63,00	15,5	12,7	43,75	52,60	44,38	20,69	20,12	13,1	1,3	14	20	10

<b>PLANTILLA 2 mm DE DISTANCIA DE SEPARACIÓN ENTRE BATERIA Y TUBO DE REFRIGERACIÓN, TUBO DE REFRIGERACIÓN 1 mm ANGULO 60°</b>													
TEMPERATURA AMBIENTE	HUMEDAD AMBIENTE				TEMPERATURA TERMOCUPLA 1	TEMPERATURA TERMOCUPLA 2	TEMPERATURA TERMOCUPLA 3	TEMPERATURA TERMOCUPLA 4	VOLTAJE	AMPERAJE	PRESIÓN	FLUJO DE AIRE	TIEMPO
°C	%RH	WB	DP	KJ/KG	°C	°C	°C	°C	VDC	ADC	PSI	L/MIN	MIN
19,4	65,2	15,6	12,9	43,39	45,06	36,75	20,50	20,37	13,1	1,3	0	0	0
19,4	65,2	15,6	12,9	43,39	45,69	37,19	20,50	20,44	13,1	1,3	14	5	1
19,4	65,2	15,6	12,9	43,39	46,38	37,94	20,50	20,37	13,1	1,3	14	10	1
19,4	65,2	15,6	12,9	43,39	47,31	39,25	20,56	20,25	13,1	1,3	14	15	2
19,4	65,2	15,6	12,9	43,39	48,31	40,75	20,69	20,31	13,1	1,3	14	20	3
19,4	65,2	15,6	12,9	43,39	49,56	42,38	20,94	20,31	13,1	1,3	14	20	5
19,4	65,2	15,6	12,9	43,39	51,69	44,63	21,06	20,44	13,1	1,3	14	20	10
					53,38	46,19	21,00	20,69	13,1	1,3	14	20	10

## Anexo 7. Contorno de la velocidad en el depósito inferior del banco.

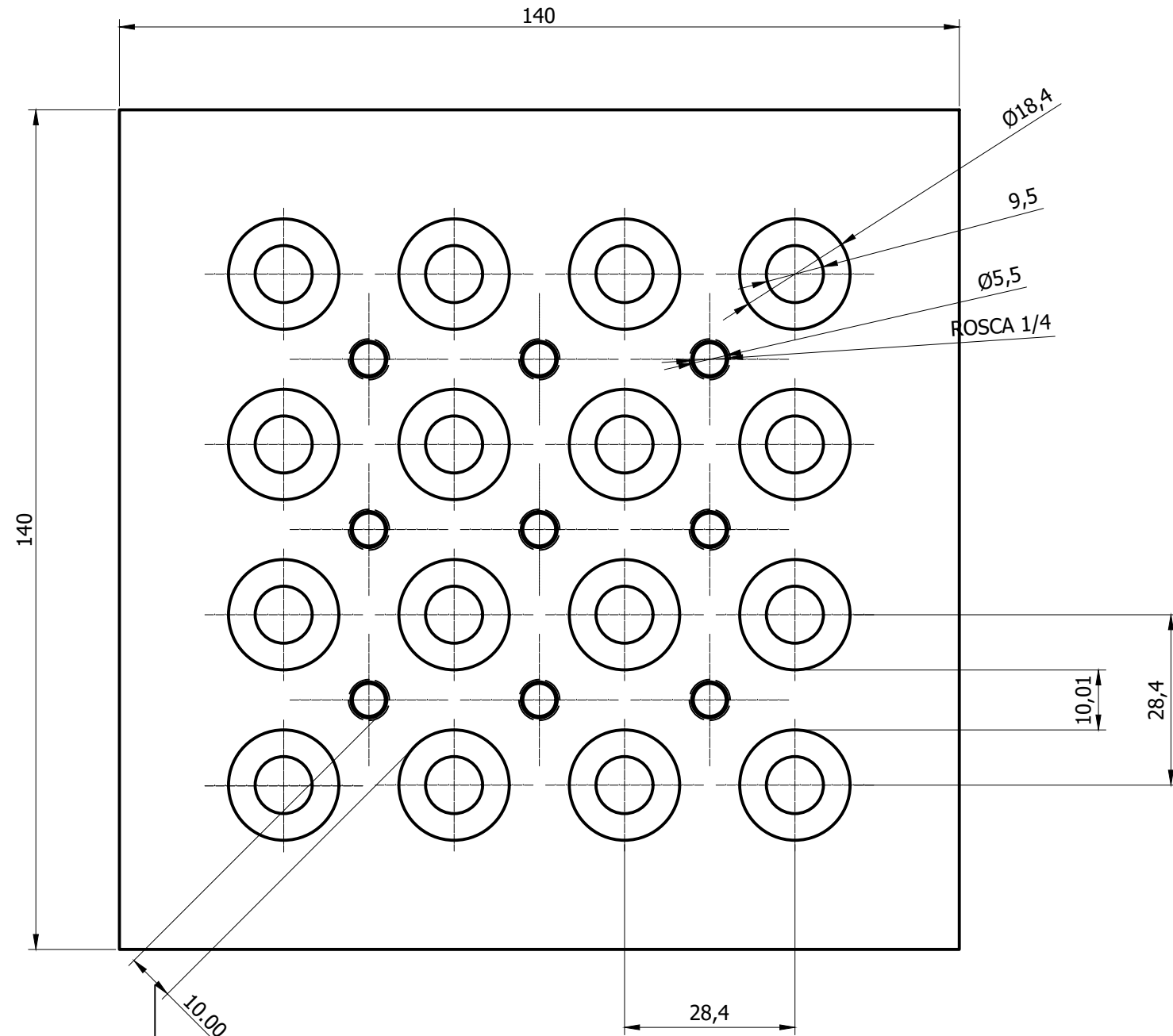
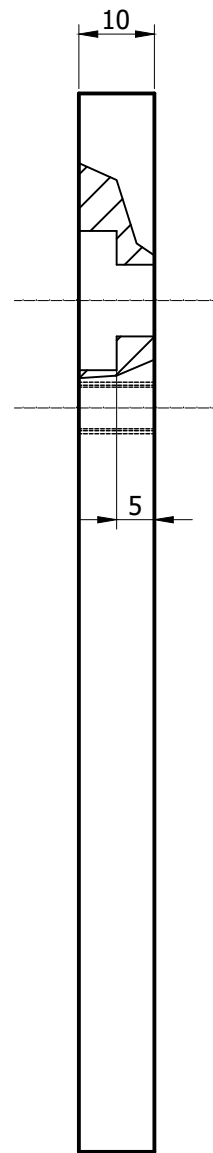


**Anexo 8. Planos y ensamblaje Banco de Pruebas BIL.**



(Pulido)  
 M (Todas las superficies)

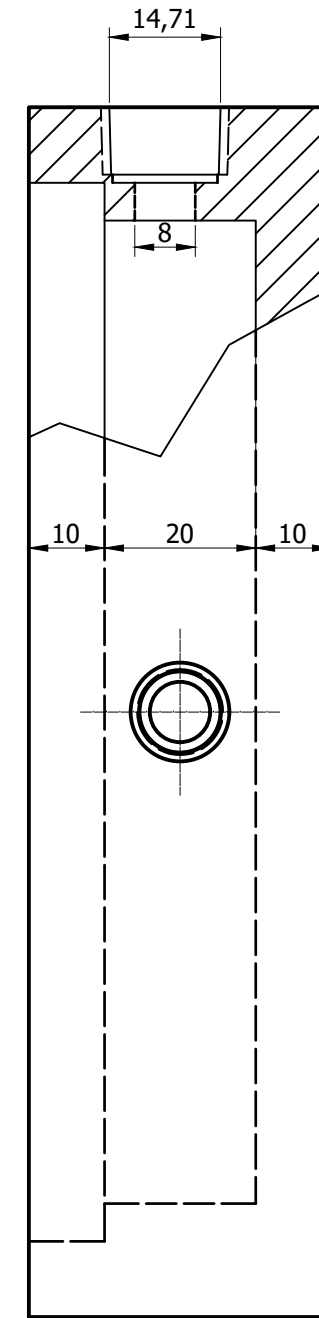
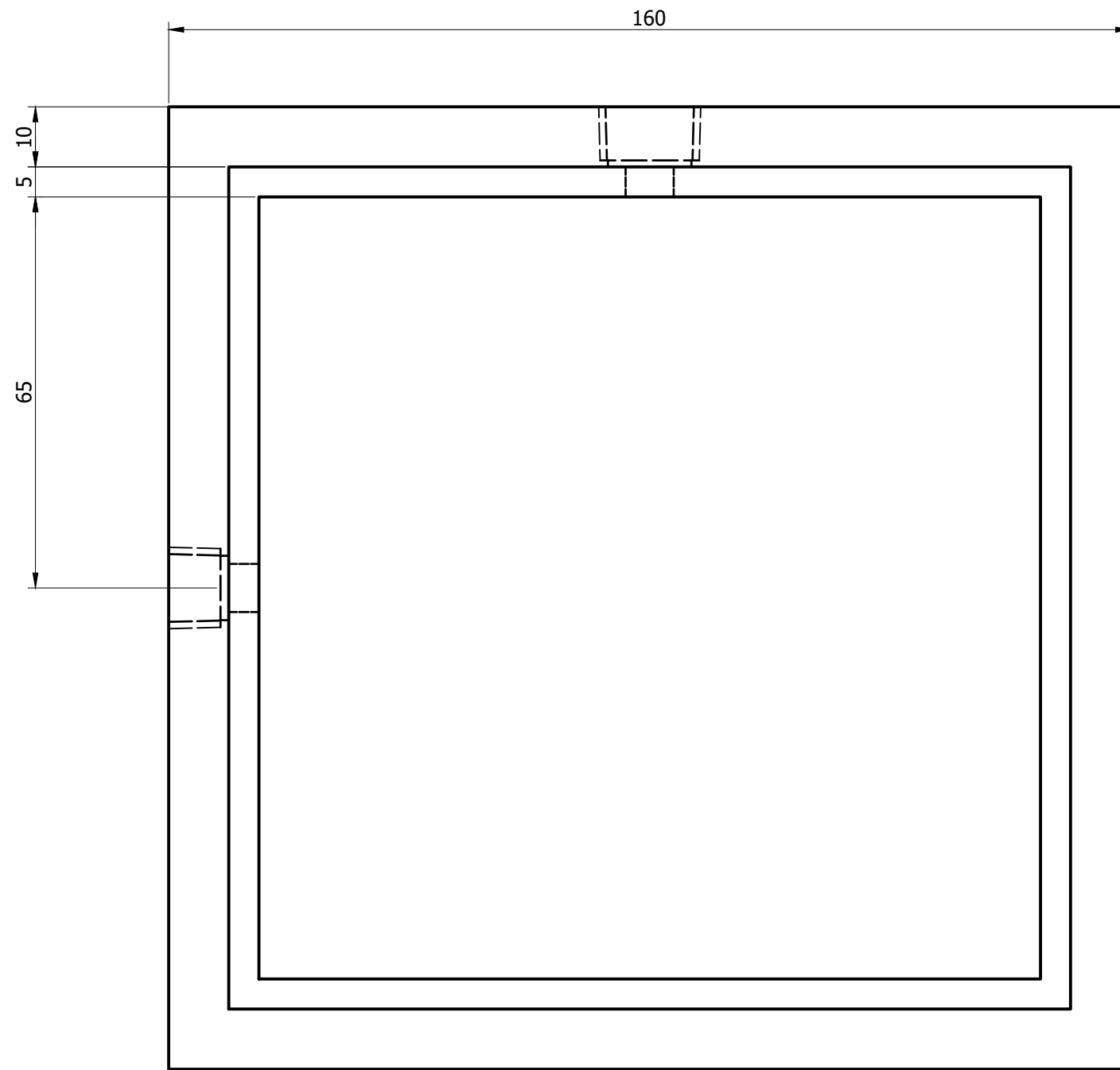
				Tolerancias +0.05 -0.05 En todas las dimensiones	Peso	Material: Aluminio (2830 kg/m <sup>3</sup> )	
					Fecha	Nombre	Denominación. Batería 18650
				Dib.	16/10/2024	Julio Cabrera	
				Rev.	16/10/2024	Byron. Solórzano	
				Aprob.	16/10/2024	Byron Solórzano	Escala 1:1
							Número de dibujo 001.00.01
EDI:	MOD:	FECHA:	NOM:				



Distancia de pruebas variable

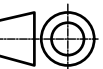
N7 (Pulido)  
M (Todas las superficies)

				Tolerancias +0.05 -0.05 En todas las dimensiones	Peso	Material: <b>GRILON</b>		
					Fecha	Nombre	Denominación. <b>Base paramétrica.</b>	Escala 1:1
				Dib.	16/10/2024	Julio Cabrera		
				Rev.	16/10/2024	Byron Solórzano		
				Aprob.	16/10/2024	Byron Solórzano	Número de dibujo 001.00.02	
EDI:	MOD:	FECHA:	NOM:					

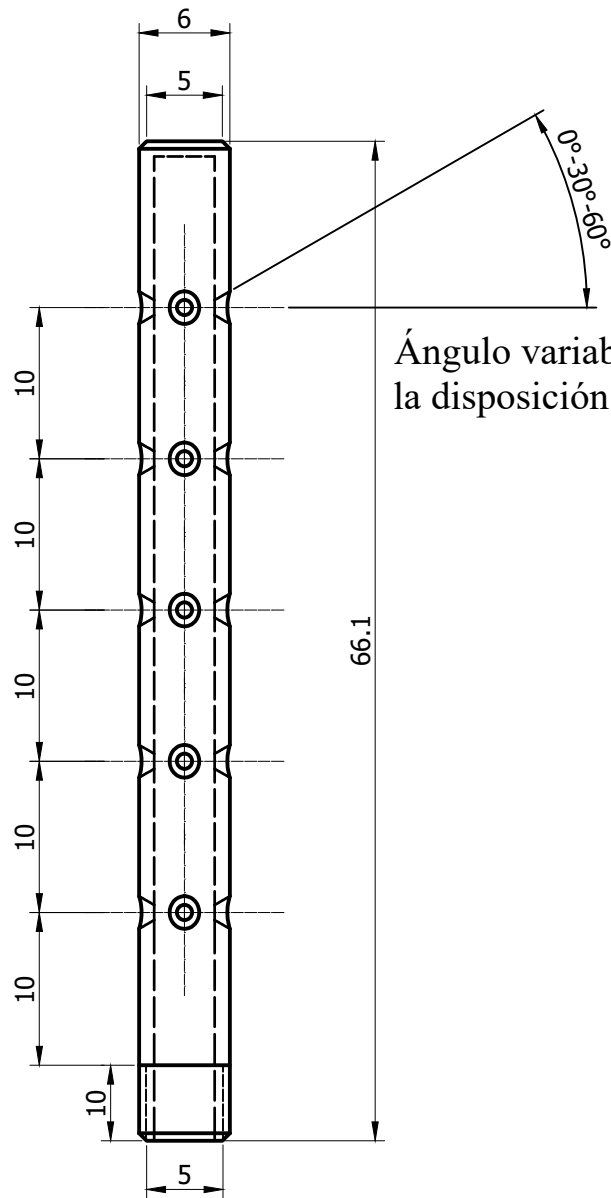


N7 (Pulido)  
M (Todas las superficies)

				Tolerancias +0.05 -0.05 En todas las dimensiones	Peso	Material: <b>GRILON</b>	
					Fecha	Nombre	Denominación.
				Dib.	16/10/2024	Julio Cabrera	Caja conexiones eléctricas.
				Rev.	16/10/2024	Byron. Solórzano	
				Aprob.	16/10/2024	Byron Solórzano	
							Número de dibujo
							001.00.03
EDI:	MOD:	FECHA:	NOM:				


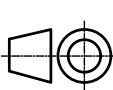


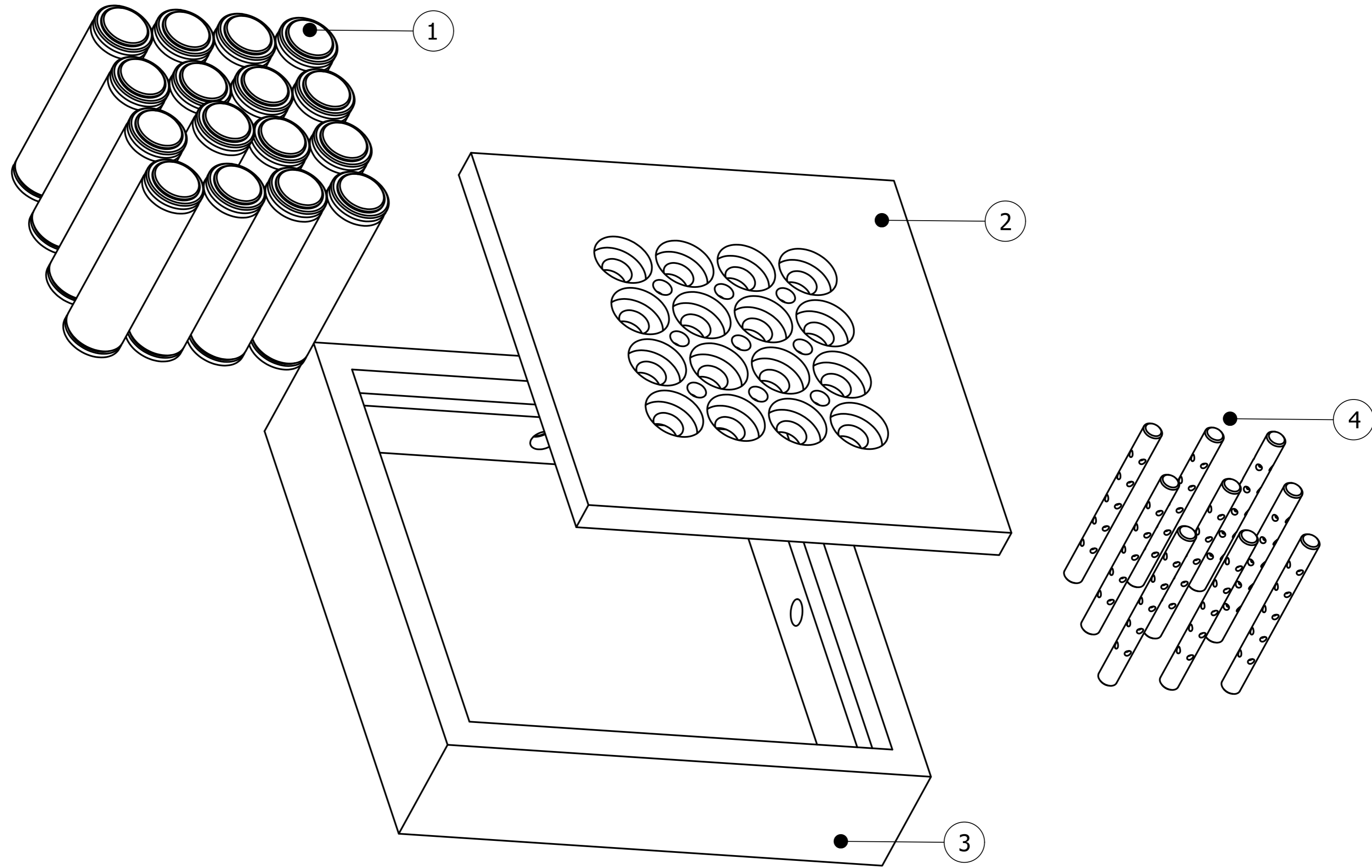




Ángulo variable de acuerdo a la disposición de prácticas.

N7 (Pulido)  
M (Todas las superficies)

				Tolerancias +0.05 -0.05 En todas las dimensiones	Peso	Material: Acero galvanizado	
				Fecha	Nombre	Denominación. Tubos de refrigeración	Escala 2:1
			Dib.	16/10/2024	Julio Cabrera		
			Rev.	16/10/2024	Byron. Solórzano		
				Aprob.	16/10/2024	Byron Solórzano	
						Número de dibujo 001.00.04	
EDI:	MOD:	FECHA:	NOM:				



E60:11 5  
 Todas las uniones soldadas

N7 (Pulido)  
 M (Todas las superficies)

16	Batería Ion Litio 18650.	INEN 003	ASTM A36	001.04.01	Aluminio		
5	Base paramétrica.	INEN 003	ASTM A36	001.04.02	Grilón		
1	Caja conexiones eléctricas.	INEN 003	ASTM A36	001.04.03	Grilón		
27	Tubo refrigeración.	INEN 003	ASTM A36	001.04.04	Acero		
No. de piezas	Denominación.	N. de norma o dibujo	Material	No. de orden	Numero del modelo	Peso	observaciones
			Tolerancias +0.05 -0.05 En todas las dimensiones	Peso	Material: Varios		
			Fecha	Nombre	Denominación.		Escala
			Dib.	Julio Cabrera	Ensamble de banco de pruebas BIL		1:1
			Rev.	16/10/2024	B. Solórzano		
			Aprob.	16/10/2024	B. Solórzano		
					Número de dibujo		
					01.00.00		
EDI:	MOD:	FECHA:	NOM:	