



unl

Universidad
Nacional
de Loja

Universidad Nacional de Loja

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

Carrera de Electromecánica

Modelamiento numérico de un banco de baterías con
enfriamiento por aire bajo diversas configuraciones geométricas

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

AUTOR:

Alexis Javier Medina Sisalima

DIRECTOR:

Ing. Edwin Bladimir Paccha Herrera PhD.

Loja-Ecuador

2024

Certificación

Loja, 13 de septiembre de 2024

Ing. Edwin Bladimir Paccha Herrera PhD.

DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

CERTIFICO:

Que he revisado y orientado todo el proceso de elaboración del Trabajo de Integración Curricular denominado: **“Modelamiento numérico de un banco de baterías con enfriamiento por aire bajo diversas configuraciones geométricas”**, previo a la obtención del título de **Ingeniero Electromecánico**, de la autoría del estudiante **Alexis Javier Medina Sisalima**, con **cédula de identidad Nro. 1150062915**, 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. Edwin Bladimir Paccha Herrera PhD.

DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

Autoría

Yo, **Alexis Javier Medina Sisalima**, declaro ser autor del presente Trabajo de integración Curricular y eximo expresamente a la Universidad Nacional de Loja y a sus representantes jurídicos, de posibles reclamos y acciones legales, por el contenido del mismo. Adicionalmente, acepto y autorizo a la Universidad Nacional de Loja, la publicación de mi Trabajo de Integración Curricular en el Repositorio Institucional - Biblioteca Virtual.

Firma:



Cédula de identidad: 1150062915

Fecha: 13 de septiembre de 2024

Correo electrónico: alexis.medina@unl.edu.ec

Teléfono: 0988408309

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

Yo, **Alexis Javier Medina Sisalima**, declaro ser autor del Trabajo de Integración Curricular denominado: “**Modelamiento numérico de un banco de baterías con enfriamiento por aire bajo diversas configuraciones geométricas**”, como requisito para optar el título de **Ingeniero Electromecánico**, autorizo al Sistema Bibliotecario de la Universidad Nacional de Loja para que, con fines académicos, muestre la producción intelectual de la Universidad, a través de la visibilidad de su contenido en el Repositorio Institucional.

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

La Universidad Nacional de Loja, no se responsabiliza por el plagio o copia del Trabajo de Integración Curricular que realice un tercero.

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

Firma:



Autor: Alexis Javier Medina Sisalima

Cédula de identidad: 1150062915

Dirección: Loja, La Argelia

Correo electrónico: alexis.medina@unl.edu.ec

Teléfono: 0988408309

DATOS COMPLEMENTARIOS

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

Dedicatoria

A mis queridos padres y hermano por su continuo apoyo a lo largo de mi vida. A mi querida Doctora Paulina Jiménez por su apoyo emocional constante. A mis tías, primos, especialmente a la Licenciada Katty Paucar y demás familiares. Gracias por estar ahí para mí en los buenos y malos momentos y darme las herramientas que necesito para enfrentar los desafíos de la vida.

A mi asesor de tesis, el Ingeniero Edwin Paccha, por su guía experta y su incansable dedicación al ayudarme a completar mi tesis. Sus conocimientos y experiencia han sido invaluable para mi formación académica y profesional.

A mis amigos y colegas por los momentos inolvidables que hemos pasado juntos a lo largo de los años. Su risa, apoyo y amistad son la base de mi vida.

Gracias por creer en mí y brindarme siempre apoyo y motivación.

Alexis Javier Medina Sisalima

Agradecimiento

Amigos y familiares, me gustaría expresar mi más sincero agradecimiento a todos aquellos que me apoyaron en la realización de mi trabajo de grado. Sin ustedes, no habría podido lograr este importante hito en mi carrera académica.

Quiero agradecer a la Universidad Nacional de Loja (UNL) por brindarme la oportunidad de estudiar en una institución de excelencia académica y brindarme las herramientas necesarias para lograr mis objetivos. Me gustaría agradecer a mis profesores y a todo el personal administrativo por su apoyo y orientación a lo largo de mi carrera.

También quisiera agradecer a mi asesor de tesis, el Ingeniero Edwin Paccha, quien brindó valiosa orientación, paciencia y dedicación a mi proyecto de grado. Gracias por compartir conmigo su conocimiento, experiencia y sabiduría e inspirarme a hacer lo mejor en este trabajo.

A mis queridos padres y hermano, quienes han sido mi gran apoyo durante toda mi vida. Gracias por su amor incondicional, brindándome un hogar seguro y feliz, y dándome la fuerza y motivación para enfrentar los desafíos de la vida.

Finalmente, quiero agradecer a Dios por todas las bendiciones que me ha dado al traerme hasta aquí y guiarme en cada paso del camino.

Alexis Javier Medina Sisalima

Índice de Contenidos

Portada	i
Certificación	ii
Autoría	iii
Carta de Autorización	iv
Dedicatoria	v
Agradecimiento	vi
Índice de Contenidos	vii
Índice de Tablas:	xi
Índice de Figuras:	xii
Índice de Anexos:	xvi
Simbología	xviii
1 Título	1
2 Resumen	2
Abstract	3
3 Introducción	4
4 Marco Teórico	6
4.1 Baterías de litio	6
4.1.1 Principio de operación y componentes de las baterías de litio	6
4.1.1.1 Ánodo.	6
4.1.1.2 Cátodo.	7
4.1.1.3 Electrolito.	7
4.1.1.4 Separador.	7
4.1.2 Tipos de baterías de litio	7
4.1.2.1 Clasificación de baterías de iones de litio.	8
4.1.3 Parámetros típicos de las baterías de iones de litio	8
4.1.4 Banco de baterías	9
4.1.4.1 Diseño modular y de bloques.	9
4.1.4.2 Circuitos en serie y paralelo.	10
4.1.4.3 Estado del arte de configuraciones geométricas usadas en varios estudios.	11
4.1.5 Temperatura de operación de baterías	25
4.1.6 Generación de calor en baterías de litio	26
4.1.6.1 Generación de calor por calentamiento Joule.	26
4.1.6.2 Generación de calor por reacciones de electrodo.	27

4.1.6.3	Generación de calor entrópico.	27
4.2	Sistemas de enfriamiento de baterías de litio	28
4.2.1	Enfriamiento por aire	28
4.2.2	Enfriamiento por líquido	29
4.2.3	Enfriamiento mediante materiales de cambio de fase (PCM)	31
4.3	Transferencia de calor	31
4.3.1	Mecanismos o modos de transferencia de calor	31
4.3.1.1	Conducción.	32
4.3.1.2	Convección.	33
4.3.1.3	Radiación.	34
4.3.2	Transferencia de calor en un cilindro	35
4.3.2.1	Conducción de calor en cilindro.	35
4.3.2.2	Convección externa forzada en cilindro.	36
4.3.2.3	Convección natural en cilindro.	38
4.3.3	Transferencia de calor en banco de tubos	39
4.3.3.1	Flujo cruzado en banco de tubos.	39
4.4	Dinámica computacional de fluidos (CFD)	41
4.4.1	Concepto, aplicaciones y programas comerciales CFD	41
4.4.2	Método de volúmenes finitos	42
4.4.3	Método de elementos finitos	43
4.4.4	Ecuaciones gobernantes CFD	44
4.4.4.1	Continuidad.	44
4.4.4.2	Momento.	45
4.4.4.3	Energía.	47
4.4.5	Modelos de turbulencia	49
4.4.5.1	Modelo de turbulencia de dos ecuaciones $k - \epsilon$	50
4.5	ANSYS Fluent	54
4.5.1	Características de Fluent	54
4.5.2	Simulación numérica mediante Fluent	54
4.5.3	Independencia de mallas	55
5	Metodología	56
5.1	Equipos y materiales	56
5.2	Procedimiento	56
5.2.1	Configuración geométrica y disposición de las celdas de un banco de LIB	57
5.2.1.1	Configuraciones geométricas utilizadas en investigaciones anteriores.	57
5.2.1.2	Estructura básica de un banco de baterías.	58
5.2.1.3	Configuración geométrica y disposición de las celdas.	59
5.2.2	Modelo numérico basado en CFD	59
5.2.2.1	Dinámica de fluidos computacional.	59
5.2.2.2	Modelado térmico.	60
5.2.2.3	ANSYS Fluent 2022 R1.	60
5.2.3	Evaluación el comportamiento térmico del banco de baterías	61
5.2.3.1	Tablas y Figuras.	61
5.2.3.2	Validación de resultados.	61
5.3	Procesamiento y análisis de datos	62

5.3.1	Configuraciones geométricas utilizadas en investigaciones anteriores	62
5.3.2	Estructura básica de un banco de baterías	63
5.3.2.1	Batería de litio.	63
5.3.2.2	Sistema de refrigeración.	64
5.3.2.3	Canal de flujo de aire.	65
5.3.3	Configuración geométrica y disposición de las celdas	67
5.3.4	Dinámica de fluidos computacional	68
5.3.4.1	Método de solución CFD.	68
5.3.5	Modelo térmico.	68
5.3.5.1	Modelo 3-D CFD.	68
5.3.5.2	Generación de calor.	68
5.3.6	Modelado numérico del flujo de aire usando CFD	70
5.3.6.1	Ecuaciones gobernantes CFD.	71
5.3.6.2	Modelo turbulento.	72
5.3.7	ANSYS Fluent 2022 R1	73
5.3.7.1	Configuración del modelo (Setup).	73
5.3.7.2	Configuración de la solución (Solution).	78
5.3.7.3	Estudio de mallas.	81
5.3.8	Figuras y Tablas	83
5.3.9	Validación de resultados	84
6	Resultados	85
6.1	Perfil de Temperatura a 1C con velocidad de 1 m/s	85
6.2	Perfil de Temperatura a 1C con velocidad de 1.5 m/s	85
6.3	Perfil de Temperatura a 1C con velocidad de 2 m/s	86
6.4	Perfil de Temperatura a 2C con velocidad de 1 m/s	87
6.5	Perfil de Temperatura a 2C con velocidad de 1.5 m/s	87
6.6	Perfil de Temperatura a 2C con velocidad de 2 m/s	88
6.7	Perfil de Temperatura a 3C con velocidad de 1 m/s	89
6.8	Perfil de Temperatura a 3C con velocidad de 1.5 m/s	89
6.9	Perfil de Temperatura a 3C con velocidad de 2 m/s	90
6.10	Perfil de Temperatura a 4.6C con velocidad de 1 m/s	91
6.11	Perfil de Temperatura a 4.6C con velocidad de 1.5 m/s	91
6.12	Perfil de Temperatura a 4.6C con velocidad de 2 m/s	92
6.13	ΔT entre la celda más caliente y la más fría	93
6.14	Distribución de temperatura y flujo de aire	94
6.14.1	Diseño 1	94
6.14.2	Diseño 2	96
6.14.3	Diseño 3	98
6.15	Temperatura de las celdas a una corriente variable	100
7	Discusión	103
8	Conclusiones	105
9	Recomendaciones	106
10	Bibliografía	107

11 Anexos 112

Índice de Tablas:

Tabla 1.	Materiales de construcción de cátodos de baterías de ion de litio. . . .	8
Tabla 2.	Materiales de construcción de ánodos de baterías de ion de litio. . . .	8
Tabla 3.	Correlaciones del número de Nusselt para flujo cruzado sobre bancos de tubos, para $N_L > 16$ y $0,7 < Pr < 500$ (tomado de Zukauskas, 1987).	40
Tabla 4.	Factor de corrección F que debe usarse en $Nu_{D,N_L < 16} = F Nu_D$ para $N_L > 16$ y $Re_D > 1000$ (tomado de Zukauskas, 1987).	41
Tabla 5.	Equipos y materiales utilizados en la investigación.	56
Tabla 6.	Comparación de estudios realizados acerca del tema.	62
Tabla 7.	Parámetros de interés en investigaciones previas.	63
Tabla 8.	Especificaciones nominales de la celda ICR18650-22P.	64
Tabla 9.	Especificaciones térmicas de la celda de litio 18650.	64
Tabla 10.	Especificaciones térmicas del aire.	64
Tabla 11.	Especificaciones térmicas del acrílico.	67
Tabla 12.	Independencia de malla para el primer diseño.	81
Tabla 13.	Independencia de malla para el segundo diseño.	82
Tabla 14.	Independencia de malla para el tercer diseño.	82
Tabla 15.	Especificaciones nominales de la celda LIR18650R-20.	112

Índice de Figuras:

Figura 1.	Proceso de descarga de una batería de iones de litio.	6
Figura 2.	Tipos de carcasas y empaques de celdas de litio con capacidad eléctrica.	9
Figura 3.	Sistema de batería de iones de litio con diseño modular (Ford E-Transit-Connect).	10
Figura 4.	Sistema de batería de iones de litio con diseño de bloque, Daimler S400 híbrido (cortesía de Daimler AG).	10
Figura 5.	Esquemas de flujo.	11
Figura 6.	Esquema del sistema de enfriamiento de aire activo de un paquete de baterías EV.	12
Figura 7.	Esquema de la definición del problema.	12
Figura 8.	Vista esquemática del paquete de baterías de iones de litio.	12
Figura 9.	Explicación del ventilador y lugares de apertura.	13
Figura 10.	Configuración geométrica y disposición de las celdas cilíndricas de litio.	14
Figura 11.	Esquema de optimización superior de BTMS tipo T.	15
Figura 12.	Esquema del BTMS para el módulo de batería.	15
Figura 13.	Modelos utilizados en la investigación.	16
Figura 14.	Disposición geométrica de la simulación.	17
Figura 15.	Modelado geométrico del módulo de baterías a) Modelo base y b) Nuevo modelo.	18
Figura 16.	Diseño 3D de la refrigeración por aire.	18
Figura 17.	Geometrías y disposición de las celdas.	19
Figura 18.	Esquema del paquete de iones de litio con diferentes configuraciones: b) Elíptico. c) Circular. d) Rombo. e) Cuadrado. f) Rectangular.	20
Figura 19.	Ilustración del módulo con 12 celdas desde (a) vista superior y (b) vista 3D. (c–d) Imágenes del distanciamiento y cómo se ubican las celdas en la simulación y experimento.	21
Figura 20.	(a) Representación esquemática del flujo a través del módulo de batería 3D; y dominio computacional para (b) disposición en línea y (c) disposición escalonada de celdas.	22
Figura 21.	Ejemplo de modelo LBM (a) configuración de celdas de batería (b) paquete de batería para 4 entradas.	23
Figura 22.	Geometría de baterías Ni-MH en canal en forma de U.	24
Figura 23.	Rangos de temperatura de la celda de iones de litio.	25
Figura 24.	Diagrama de flujo de los diferentes parámetros estudiados en sistemas BTMS refrigerados por aire.	28
Figura 25.	Esquema de enfriamiento de aire activo.	29
Figura 26.	Esquema de enfriamiento de aire pasivo.	29
Figura 27.	Placas de refrigeración líquida.	30
Figura 28.	Aletas del disipador de calor.	30
Figura 29.	Enfriamiento por PCM.	31
Figura 30.	Mecanismos de transferencia de calor en una batería de iones de litio.	32
Figura 31.	Distribución de temperatura en conducción a través de una pared plana con conductividad térmica constante y variable.	33

Figura 32.	Procesos de transferencia de calor por convección. (a) Convección forzada. (b) Convección Natural. (c) Ebullición. (d) Condensación. . . .	34
Figura 33.	Tubo cilíndrico largo (o capa esférica) con temperaturas de las superficies interior y exterior, T_1 y T_2 , especificadas.	35
Figura 34.	Red de resistencias térmicas para la transferencia de calor a través de un cilindro compuesto de tres capas sujeto a convección en ambos lados.	36
Figura 35.	Líneas de corriente para flujo potencial sobre un cilindro circular. . . .	36
Figura 36.	Efecto de la aspereza superficial sobre el coeficiente de resistencia de una esfera.	37
Figura 37.	Variación del coeficiente de transferencia de calor local a lo largo de la circunferencia de un cilindro circular en flujo cruzado de aire. . . .	38
Figura 38.	Configuración de los tubos en los bancos alineados o escalonados. . . .	39
Figura 39.	Una representación de malla estructurada y no estructurada para el método de volumen finito (los símbolos completos denotan vértices de elementos y los símbolos abiertos en el centro de los volúmenes de control denotan nodos computacionales)	42
Figura 40.	Volumen de control finito fijo en el espacio.	44
Figura 41.	Fuerzas superficiales que actúan sobre el volumen de control infinitesimal para la componente de velocidad u . Elemento fluido deformado por la acción de las fuerzas superficiales.	45
Figura 42.	Trabajo realizado por fuerzas superficiales sobre el fluido y calor agregado al fluido dentro del volumen de control infinitesimal. Solo se muestran los flujos en la dirección x	47
Figura 43.	Velocidad que fluctúa con el tiempo en algún punto de un flujo turbulento.	49
Figura 44.	Metodología general de la investigación.	56
Figura 45.	Procedimiento del primer objetivo.	57
Figura 46.	Procedimiento del segundo objetivo.	59
Figura 47.	Procedimiento del tercer objetivo.	61
Figura 48.	Canal de flujo de aire de forma rombo.	65
Figura 49.	Canal de flujo de aire de forma triangular.	66
Figura 50.	Canal de flujo de aire de forma circular.	66
Figura 51.	Dimensiones de la celda ICR18650-22P.	67
Figura 52.	Configuraciones geométricas: (a) Rombo con arreglo escalonado. (b) Triángulo con arreglo alineado. (c) Cuadrado con arreglo alineado. . .	68
Figura 53.	Perfil actual escalado de un ciclo de conducción HWFET.	70
Figura 54.	Condiciones de contorno para las simulaciones.	71
Figura 55.	Configuración de los parámetros generales.	73
Figura 56.	Activación de Energía.	74
Figura 57.	Ventana de opciones del modelo $k - \epsilon$	74
Figura 58.	Propiedades térmicas de la celda 18650.	75
Figura 59.	Propiedades térmicas del acrílico.	75
Figura 60.	Propiedades térmicas dl aire.	76
Figura 61.	Configuración del término fuente.	76
Figura 62.	Configuración de la velocidad de entrada.	77
Figura 63.	Configuración de la presión de salida.	77
Figura 64.	Configuración de pared del canal.	78

Figura 65.	Configuración de Solution Methods.	78
Figura 66.	Configuración de Solution Controls.	79
Figura 67.	Report Definitions para cada una de las celdas del módulo.	79
Figura 68.	Parámetros de inicialización.	80
Figura 69.	Configuración de Run Calculation.	80
Figura 70.	Malla detallada alrededor de las celdas.	81
Figura 71.	Residuales primer diseño.	82
Figura 72.	Residuales segundo diseño.	83
Figura 73.	Residuales tercer diseño.	83
Figura 74.	Árbol de opciones de Results.	84
Figura 75.	Temperaturas de las celdas a una velocidad de 1 m/s	85
Figura 76.	Temperaturas de las celdas a una velocidad de 1.5 m/s	86
Figura 77.	Temperaturas de las celdas a una velocidad de 2 m/s	86
Figura 78.	Temperaturas de las celdas a una velocidad de 1 m/s	87
Figura 79.	Temperaturas de las celdas a una velocidad de 1.5 m/s	88
Figura 80.	Temperaturas de las celdas a una velocidad de 2 m/s	88
Figura 81.	Temperaturas de las celdas a una velocidad de 1 m/s	89
Figura 82.	Temperaturas de las celdas a una velocidad de 1.5 m/s	90
Figura 83.	Temperaturas de las celdas a una velocidad de 2 m/s	90
Figura 84.	Temperaturas de las celdas a una velocidad de 1 m/s	91
Figura 85.	Temperaturas de las celdas a una velocidad de 1.5 m/s	92
Figura 86.	Temperaturas de las celdas a una velocidad de 2 m/s	92
Figura 87.	ΔT a 1C y 2C a velocidades de 1 m/s y 2 m/s.	93
Figura 88.	ΔT a 3C y 4.6C a velocidades de 1 m/s y 2 m/s.	93
Figura 89.	Distribución de temperatura a 4.6C a velocidad de 1 m/s.	94
Figura 90.	Distribución de temperatura a 4.6C a velocidad de 2 m/s.	95
Figura 91.	Campo de velocidades a 4.6C a velocidad de 1 m/s.	95
Figura 92.	Campo de velocidades a 4.6C a velocidad de 2 m/s.	96
Figura 93.	Distribución de temperatura a 4.6C a velocidad de 1 m/s.	97
Figura 94.	Distribución de temperatura a 4.6C a velocidad de 2 m/s.	97
Figura 95.	Campo de velocidades a 4.6C a velocidad de 1 m/s.	98
Figura 96.	Campo de velocidades a 4.6C a velocidad de 2 m/s.	98
Figura 97.	Distribución de temperatura a 4.6C a velocidad de 1 m/s.	99
Figura 98.	Distribución de temperatura a 4.6C a velocidad de 2 m/s.	99
Figura 99.	Campo de velocidades a 4.6C a velocidad de 1 m/s.	100
Figura 100.	Campo de velocidades a 4.6C a velocidad de 2 m/s.	100
Figura 101.	Campo de velocidades a 4.6C a velocidad de 2 m/s.	101
Figura 102.	Campo de velocidades a 4.6C a velocidad de 2 m/s.	101
Figura 103.	Campo de velocidades a 4.6C a velocidad de 2 m/s.	102
Figura 104.	Dimensiones de la celda LIR18650R-20.	112
Figura 105.	Distribución de temperatura y campo de velocidad del módulo de baterías. (a) Tasa 1C a 1 m/s - 1.5 m/s - 2 m/s. (b) Tasa 2C a 1 m/s - 1.5 m/s - 2 m/s. (c) Tasa 3C a 1 m/s - 1.5 m/s - 2 m/s.	113
Figura 106.	Distribución de temperatura y campo de velocidad del módulo de baterías. (a) Tasa 1C a 1 m/s - 1.5 m/s - 2 m/s. (b) Tasa 2C a 1 m/s - 1.5 m/s - 2 m/s. (c) Tasa 3C a 1 m/s - 1.5 m/s - 2 m/s.	114

Figura 107. Distribución de temperatura y campo de velocidad del módulo de baterías. (a) Tasa 1C a 1 m/s - 1.5 m/s - 2 m/s. (b) Tasa 2C a 1 m/s - 1.5 m/s - 2 m/s. (c) Tasa 3C a 1 m/s - 1.5 m/s - 2 m/s. 115

Figura 108. Distribución de temperatura y campo de velocidad del módulo de baterías. (a) Diseño 1 a 1 m/s - 1.5 m/s - 2 m/s. (b) Diseño 2 a 1 m/s - 1.5 m/s - 2 m/s. (c) Diseño 3 a 1 m/s - 1.5 m/s - 2 m/s. 116

Índice de Anexos:

Anexo 1. Especificaciones nominales de la celda LIR18650R-20	112
Anexo 2. Distribución de temperatura del diseño 1	113
Anexo 3. Distribución de temperatura del diseño 2	114
Anexo 4. Distribución de temperatura del diseño 3	115
Anexo 5. Distribución de temperatura a tasa de corriente variable	116
Anexo 6. Certificación de traducción del resumen	117

Simbología

Acrónimos		a	Aceleración
BTMS	Sistema de gestión térmica de baterías, del inglés <i>Battery Thermal Management System</i>	$a_{s,j}$	Velocidades de reacción escaladas por área
CFD	Dinámica de fluidos computacional, del inglés <i>Computational Fluid Dynamics</i>	C_D	Coefficiente de resistencia
		C_p	Capacidad calorífica específica
		D	Diámetro
DOE	Diseño de experimentos	F	Fuerza
EV	Vehículo eléctrico, del inglés <i>Electric Vehicle</i>	g	Aceleración gravitacional
FEM	Método de elementos finitos, del inglés <i>Finite Element Method</i>	h	Coefficiente de transferencia de calor ($Wm^{-2}K^{-1}$)
LIB	Batería de iones de litio, del inglés <i>Lithium-ion Battery</i>	I	Intensidad de corriente (A)
OEM	Fabricante de equipos originales, del inglés <i>Original Equipment Manufacturer</i>	k	Coefficiente de conductividad térmica
PCM	Material de cambio de fase, del inglés <i>Phase Change Material</i>	L	Longitud
		N	Número total de tubos en el banco
		n	Número de incógnitas nodales discretas
SOC	Estado de carga, del inglés <i>State of charge</i>	P_{fan}	Consumo de energía de ventilador
		q	Cantidad de calor generado
		R	Resistencia (Ω)
Constantes y variables		r_1	Radio interior
ΔP	Caída de presión	r_2	Radio exterior
Δ	Incremental de una variable	S_D	Paso diagonal
\dot{m}	Gasto de masa del fluido	S_L	Paso longitudinal
η_j	Sobrepontencial	S_T	Paso transversal
κ	Conductividad iónica del electrolito	T	Temperatura (K)
κ_D	Conductividad relacionada con la difusión	t	Tiempo (s)
$\nabla\phi_S$	Gradiente de voltaje para una densidad de corriente dada	U	Valor de equilibrio del potencial
		V	Velocidad uniforme del fluido
∂	Derivada parcial	C	Tasa de descarga actual
ϕ_i	Valores variables en las superficies elementales	Gr	Número de Grashof
		Nu	Número de Nusselt
ε	Emisividad	Pr	Número de Prandtl
ε^t	Porosidad de los electrodos y/o el separador	Re	Número de Reynolds
A	Área	Símbolos griegos	
		β	Coefficiente de expansión volumé-

	trica	<i>c</i>	Convección
η	Potencial	<i>comb</i>	Combinado
ν	Viscosidad cinemática	<i>gen</i>	Generado
ρ	Densidad ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	<i>int</i>	Interna
σ	Constante de Steffan-Boltzmann $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$	<i>k</i>	Conducción
		<i>out</i>	Externa
		<i>r</i>	Radiación
		<i>ref</i>	Referencia
		<i>s</i>	Superficial
		<i>surf, c</i>	Superficie del cilindro
Superíndices			
<i>j</i>	Discretización temporal		
Subíndices			
<i>amb</i>	Ambiente		

1. Título

Modelamiento numérico de un banco de baterías con enfriamiento por aire
bajo diversas configuraciones geométricas

2. Resumen

Las baterías de iones de litio (LIBs) de alta densidad de potencia tienen innumerables aplicaciones en la industria. Se debe considerar cuidadosamente el comportamiento térmico al diseñar módulos de baterías de iones de litio para garantizar temperaturas de funcionamiento óptimas. En este trabajo, se utilizó el método de dinámica de fluidos computacional (CFD) para estudiar las características térmicas del módulo de batería 18650, que consta de 16 celdas. Las celdas están dispuestas en varias formas, como cuadrados, rombos y triángulos, y todos los patrones ocupan el mismo espacio longitudinal y diagonal. Las LIBs cilíndricas se descargaron a tasas de descarga de 1C, 2C, 3C y 4.6C a un flujo de aire de 1 m/s, 1.5 m/s y 2 m/s. Las simulaciones numéricas se implementaron utilizando el software ANSYS Fluent.

Los resultados evidencian que existe un comportamiento térmico diferente en el módulo de batería asociado con el diseño del canal de flujo, la disposición de las celdas, la ubicación y velocidad del flujo de aire de entrada y salida. Además, se demostró que el rendimiento térmico de las baterías de iones de litio se ve afectado por la intensidad de la corriente de descarga, la tasa de generación de calor y el proceso de enfriamiento. Finalmente, el diseño 2, de disposición triangular, presentó mejores resultados de refrigeración, alcanzando una diferencia de temperatura entre la celda más fría y la más caliente de 1.9 °C a una tasa de un 1C con velocidad de 1 m/s, dejando al diseño 3 en un punto intermedio con 2 °C y como último al diseño 1 con 2.7 °C.

Palabras claves: Batería de iones de litio, módulo de batería, ANSYS, corriente de descarga, resistencia interna, generación de calor.

Abstract

High power density lithium ion batteries (LIBs) have countless applications in industry. Thermal behavior must be carefully considered when designing lithium-ion battery modules to ensure optimal performance temperatures. In this work, the computational fluid dynamics (CFD) method was used to study the thermal characteristics of the 18650 battery module, which consists of 16 cells. The cells are arranged in various shapes, such as squares, rhombuses, and triangles, and all patterns take the same longitudinal and diagonal space. The cylindrical LIBs were discharged at discharge rates of 1C, 2C, 3C, and 4.6C at air flows of 1 m/s, 1.5 m/s, and 2 m/s. Numerical simulations were implemented using ANSYS Fluent software.

The results show that there is a different thermal behavior in the battery module associated with the design of the flow channel, the arrangement of the cells, the location and speed of the input and output air flow. Furthermore, the thermal performance of lithium-ion batteries was shown to be affected by the intensity of the discharge current, the heat generation rate, and the cooling process. Finally, design 2, with a triangular arrangement, presented better cooling results, reaching a temperature difference between the coldest and the hottest cell of 1.9 °C at a rate of 1C with a 1 m/s speed, the design 3 took an intermediate point with 2 °C and finally design 1 was the last one with 2.7 °C.

Keywords: Lithium ion battery, battery module, ANSYS, discharge current, internal resistance, heat generation.

3. Introducción

Las LIB son dispositivos capaces de convertir energía química en energía eléctrica y viceversa mediante reacciones químicas que ocurren dentro de su estructura. Han encontrado una amplia aplicación como sistema de almacenamiento de energía en diversos campos, como los vehículos eléctricos (EV), los vehículos eléctricos híbridos (HEV) y muchos dispositivos eléctricos y electrónicos. Un inconveniente de los LIB es su sensibilidad a la temperatura, con el rango de funcionamiento recomendado entre 15 °C y 35 °C (Bryden et al., 2018). Un aumento excesivo de la temperatura de la celda puede provocar una fuga térmica y provocar explosiones y accidentes (Y. Sun et al., 2023).

X. Zhang et al. (2022) en su estudio brindan una revisión integral de los problemas de seguridad térmica de las LIB, centrándose en la caracterización térmica, el modelado de la inestabilidad térmica y las pruebas de celdas de batería, así como en las estrategias de gestión de la seguridad de la batería. Para mitigar el aumento de temperatura y mejorar la estabilidad de las LIB durante los procesos de carga y descarga, numerosos estudios han explorado los sistemas de gestión térmica de baterías (BTMS). Estos sistemas abarcan varias estrategias como refrigeración por aire, refrigeración líquida, uso de materiales de cambio de fase (PCM) y tubos de calor, etc.

La disposición del sistema de refrigeración influye significativamente en cómo se distribuye la temperatura en un módulo de batería y la región donde se produce la temperatura más alta (H. Wang et al., 2020). Estudios recientes han explorado la influencia de las configuraciones geométricas de las LIB en el rendimiento térmico del módulo de batería. Por ejemplo, Jiaqiang et al. (2018) estudiaron numéricamente varios enfoques para la refrigeración por aire en un módulo de batería, alterando las posiciones de la entrada y salida del flujo de aire para determinar el método de refrigeración más eficaz. Además, para mejorar el rendimiento de la refrigeración del aire de entrada y salida lateral, se implementa un deflector para optimizar la distribución del flujo de aire.

La investigación realizada por F. Zhang, Yi et al. (2021) utilizando un enfoque de dinámica de fluidos computacional (CFD) demostró que un módulo de batería basada en ventilación múltiple es más eficiente para mejorar el rendimiento de refrigeración respecto a estudios previos sobre la disposición de una entrada de aire y una salida de aire. Pordanjani et al. (2023) realizaron un estudio sobre paquetes de baterías cilíndricas compactas de iones de litio. Las baterías se organizaron en diferentes configuraciones, como cuadrada, rombo, elíptica y circular, y todas cubrían la misma área general. Los resultados revelaron que al utilizar una configuración circular, la caída de presión y la transferencia de calor aumentan cuando aumenta la velocidad. La investigación desarrollada por Kirad y Chaudhari (2021) examina cómo la alteración del espaciado longitudinal y transversal

entre baterías afecta a los diferentes criterios de evaluación. Los hallazgos revelan que el factor de eficiencia de enfriamiento se ve notablemente influenciado por el espacio transversal, mientras que la uniformidad de la temperatura se ve afectada principalmente por el espacio longitudinal entre las baterías. Además, un método novedoso para lograr una distribución uniforme de la temperatura dentro del módulo de batería y reducir la temperatura máxima en las baterías de iones de litio (LIB) implica emplear soportes de celdas a diferentes alturas. Estos soportes actúan como aletas (Kummitha, 2023). También se estudia un generador de vórtice como mecanismo para mejorar el rendimiento térmico en un módulo de batería en vehículos eléctricos híbridos en función del ángulo de ataque (Bisht et al., 2023).

Asimismo, el estudio de Ariwibawa et al. (2019) también indica que el rendimiento y los ciclos de vida de LIB son sensibles a la temperatura, por lo que se debe mantener en un rango de $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Por lo tanto, se debe investigar la distribución de temperatura dentro del paquete LIB para mantener una temperatura óptima. La configuración de paquetes de baterías en serie o en paralelo también se ve afectada por la temperatura, como indican Al Rasyid Ar et al. (2021). En conexión en serie, la variación del SOC alcanza el 6,8% mientras que en paralelo se mantiene. El estudio de la topología del paquete de baterías de iones de litio es de gran importancia como lo indican Fill y Birke (2022). Los autores indican la correlación entre los gradientes de temperatura y las diferencias actuales.

Como se describió anteriormente, se han propuesto estudios importantes para analizar la influencia de las configuraciones geométricas de las celdas en una batería de iones de litio, pero existen muchas más oportunidades para explorar el comportamiento térmico de las LIB en distintas configuraciones. Por tal razón, la siguiente investigación presenta un estudio basado en CFD sobre la influencia de las configuraciones geométricas en el rendimiento térmico de un módulo de batería de iones de litio con refrigeración por aire, donde se han establecido los siguientes objetivos específicos:

- Establecer las configuraciones geométricas y disposición de las celdas de un banco de baterías de iones de litio para modelar su enfriamiento por aire.
- Implementar un modelo numérico basado en CFD para modelar el enfriamiento por aire del banco de baterías de litio.
- Evaluar el comportamiento térmico del banco de baterías.

4. Marco Teórico

4.1. Baterías de litio

Las baterías de litio son dispositivos que almacenan energía química para su posterior uso como electricidad mediante reacciones químicas. Los bancos de baterías de litio se crean agrupando módulos, lo cuales se crean empaquetando un conjunto de celdas. Las partes principales de una batería de litio son: ánodo, cátodo, electrolito y separador.

4.1.1. Principio de operación y componentes de las baterías de litio

Korthauer (2018) describe el principio de funcionamiento de las baterías de iones de litio. Durante la descarga, los iones de litio se mueven desde el electrodo negativo a través del electrolito y el separador hasta el electrodo positivo, como se muestra en **Figura 1**. Los electrones liberados al desentrelazar el electrodo negativo se transmiten a través del cable hasta el electrodo positivo. Al cargar la batería, el proceso se invierte: los iones de litio pasan del electrodo positivo a través del electrolito y el separador hasta el electrodo negativo.

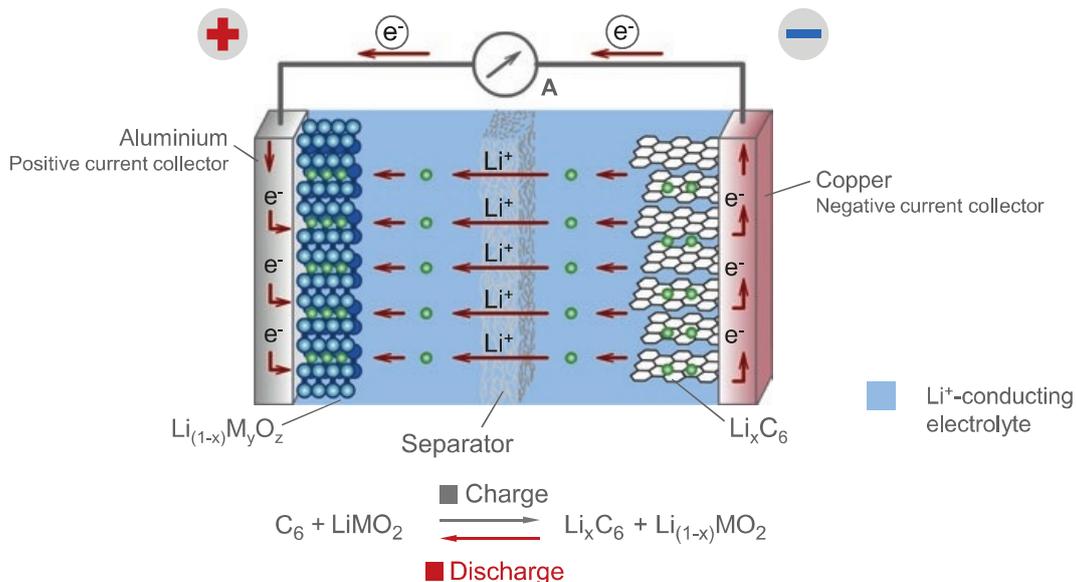


Figura 1. Proceso de descarga de una batería de iones de litio.

Fuente: Tomado de Korthauer, 2018.

4.1.1.1 Ánodo. Rodríguez et al. (2020) informaron que los ánodos se pueden fabricar a partir de tres grupos de materiales con diferentes mecanismos de almacenamiento de litio: materiales basados en intercalaciones, reacciones de conversión y reacciones en aleaciones.

Inicialmente, las baterías de litio incluían una placa de litio como ánodo porque el litio puro tiene una capacidad específica alta y un potencial muy negativo. Sin embargo, a medida que disminuye el voltaje del ánodo, los iones de litio se depositan como litio metálico

en la superficie del ánodo en lugar de intercalarse, lo que provoca que se formen dendritas en el separador. Las dendritas provocan una pérdida permanente de energía y pueden provocar cortocircuitos. Por lo tanto, "para crear celdas seguras con buen rendimiento cíclico, el litio metálico se reemplaza por material de intercalación de litio" (Korthauer, 2018).

4.1.1.2 Cátodo. Korthauer (2018) describe el comportamiento del cátodo: Estos compuestos son capaces de formar cristales mixtos de diversas composiciones y son capaces de separar los iones de litio de la estructura durante el proceso de carga. Los iones de metales de transición se oxidan debido a la neutralidad de la carga, lo que hace que aumente el estado de oxidación del catión del metal de transición. Cuando la batería se agota, se libera litio, lo que a su vez reduce la cantidad de iones de metales de transición y reduce su estado de oxidación.

Normalmente, los ánodos se desarrollan a base de carbono debido a su bajo costo, estabilidad y alta capacidad específica. Por tanto, el desarrollo de baterías de iones de litio se centra principalmente en nuevas tecnologías de cátodos. Los principales materiales utilizados para la producción de cátodos, según su estructura cristalina, son: óxido estratificado, espinela y fosfato.

4.1.1.3 Electrolito. "El electrolito debe tener una alta conductividad en un amplio intervalo de temperatura (-40°C a 80°C), estabilidad cíclica durante varios miles de ciclos y compatibilidad química y electroquímica con el electrodo e inactivo" (Korthauer, 2018). Consta de tres elementos: sales conductoras, disolventes orgánicos, próticos y aditivos, que en conjunto determinan las propiedades fisicoquímicas y electroquímicas.

4.1.1.4 Separador. El separador es un material plano poroso colocado entre el ánodo y el cátodo de una celda de iones de litio. Debido al método de producción, se dividen en dos tipos: membranas de micropolioléfina y húmedas. Su función principal es evitar el contacto físico y permitir que los iones del electrolito se muevan libremente entre los electrodos.

4.1.2. Tipos de baterías de litio

Los distintos tipos de baterías de litio se agrupan en tres grupos:

- **Baterías de litio metálico:** su principal característica es el uso de litio metálico en la estructura del ánodo.
- **Baterías de iones de litio:** se caracteriza por sustituir el litio metálico por materiales que contienen átomos de litio. Se dividen según la composición de cátodo y

ánodo.

- **Baterías de litio-polímero:** se caracterizan por la presencia de un electrolito sólido o en gel mezclado con componentes poliméricos.

4.1.2.1 Clasificación de baterías de iones de litio. Como se mencionó anteriormente, las baterías de ion de litio se clasifican según la composición del cátodo y ánodo, como se observa en la **Tabla 1** y **Tabla 2** respectivamente.

Tabla 1. Materiales de construcción de cátodos de baterías de ion de litio.

Material	Nomenclatura	Abreviatura
Óxido de aluminio- cobalto-níquel-litio	$LiNi_{0.8}Co_{0.15}Al_{0.05}O_2$	NCA
Óxido de litio y cobalto	$LiCoO_2$	LCO
Óxido de cobalto- manganeso-níquel-litio	$LiNi_{0.33}Mn_{0.33}Co_{0.33}O_2$	NCM
Óxido de manganeso de litio	$LiMn_2O_4$	LMO
Fosfato ferroso de litio	$LiFePO_4$	LFP
Fosfato mixto de hierro y manganeso con >60 % de manganeso	$LiFe_{0.15}Mn_{0.85}PO_4$	LFMP

Fuente: Rodríguez et al., 2020.

Tabla 2. Materiales de construcción de ánodos de baterías de ion de litio.

Material	Nomenclatura	Abreviatura
Grafito (Natural-Sintético)	C	C
Titanato de litio	$Li_4Ti_5O_{12}$	LTO

Fuente: Rodríguez et al., 2020.

4.1.3. *Parámetros típicos de las baterías de iones de litio*

Capacidad: se refiere a la cantidad de carga que una fuente de energía puede proporcionar en condiciones de descarga específicas. Esta capacidad depende de factores como la corriente de descarga, la tensión de corte, la temperatura, así como el tipo y la cantidad de material activo utilizado. La unidad de capacidad es el amperio hora (Ah).

Estado de carga: representa un porcentaje de la capacidad total disponible. Algunos fabricantes y OEM establecen valores de voltaje específicos para determinar el 100 % y el 0 % de SOC. La tasa de descarga a la que una celda se puede descargar completamente del 100 % al 0 % de SOC en una hora se llama tasa de 1C. Los fabricantes de baterías establecen velocidades máximas de carga y descarga a determinadas temperaturas.

Cantidad de energía almacenada: la cantidad de energía almacenada en una batería o celda se calcula multiplicando la capacidad por el voltaje de descarga promedio. Esta medida se expresa en vatios-hora (Wh).

Energía específica: se refiere a la cantidad de energía almacenada por unidad de masa de la batería recargable, y se mide en vatios-hora por kilogramo (Wh/kg).

Densidad de energía: se refiere a la cantidad de energía almacenada por unidad de volumen de la batería recargable, y se mide en vatios-hora por litro (Wh/l).

Potencia: se obtiene al multiplicar la corriente por el voltaje, especialmente durante la fase de descarga. La unidad de medida de la potencia es el vatio (W).

Eficiencia: se define como la energía liberada durante la descarga dividida entre la energía almacenada durante la carga. Las baterías de iones de litio tienen una eficiencia muy elevada, generalmente superior al 95 %.

4.1.4. Banco de baterías

El sistema de batería debe estar diseñado para funcionar de manera confiable, segura y eficiente. La configuración del sistema de batería tiene en cuenta las características técnicas específicas de la celda de iones de litio. La batería es el componente principal del sistema de batería y viene en varias formas geométricas, como se muestra en **Figura 2**. Además, el sistema de batería consta de componentes mecánicos, eléctricos y electrónicos que funcionan juntos.

	Cylindrical (hardcase)	Pouch cell (softpack)	Prismatic (hardcase)
Consumer 	 2 Ah	 1 Ah	 1 Ah
Automotive 	 6 Ah	 45 Ah	 60 Ah

Figura 2. Tipos de carcasas y empaques de celdas de litio con capacidad eléctrica.

Fuente: Tomado de Korthauer, 2018.

4.1.4.1 Diseño modular y de bloques. El diseño modular utiliza una cierta cantidad de baterías de iones de litio combinadas en un módulo (**Figura 3**). La combinación de módulos crea baterías más grandes con mayor capacidad eléctrica. La principal ventaja de este tipo de estructuras es la facilidad de manipulación de sus elementos durante el

montaje y mantenimiento.



Figura 3. Sistema de batería de iones de litio con diseño modular (Ford E-Transit-Connect).

Fuente: Tomado de Korthauer, 2018.

Un diseño de bloque es la combinación de todos los elementos de almacenamiento en un solo bloque, equipado con las conexiones y componentes periféricos necesarios, como en la **Figura 4** .



Figura 4. Sistema de batería de iones de litio con diseño de bloque, Daimler S400 híbrido (cortesía de Daimler AG).

Fuente: Tomado de Korthauer, 2018.

4.1.4.2 Circuitos en serie y paralelo. Las celdas de ion de litio se pueden conectar, dependiendo de los requerimientos del diseño, en:

Conexión en paralelo de celdas conectadas en serie: en primera instancia se conecta un número de celdas en serie para luego ser conectadas en paralelo.

Conexión en serie de celdas conectadas en paralelo: se conectan las celdas en paralelo y luego en serie.

La conexión en serie permite determinar la potencia máxima disponible en función de la capacidad de una celda y el SOC. Cuando se conectan en paralelo, el SOC y la capacidad de la celda pueden provocar un desequilibrio de corriente debido a la diferencia en su resistencia interna.

4.1.4.3 Estado del arte de configuraciones geométricas usadas en varios estudios. Dado que los problemas térmicos afectan el rendimiento y la vida útil de las baterías, se han realizado investigaciones sobre la regulación de la temperatura de los paquetes de baterías de litio que utilizan aire como refrigerante mediante modelos computacionales CFD.

- H. Sun y Dixon (2014) realizaron un análisis DOE detallado para investigar los efectos de diferentes técnicas de enfriamiento en el rendimiento térmico de la batería. Estos estudios cubren aspectos como la configuración de la línea de enfriamiento, el diseño del canal de enfriamiento, los disipadores de calor y las propiedades de corrugación. Vale la pena mencionar que cubrieron diseños en forma de U y en forma de Z, como se muestra en la **Figura 5**, donde el diseño en forma de Z dio los mejores resultados.

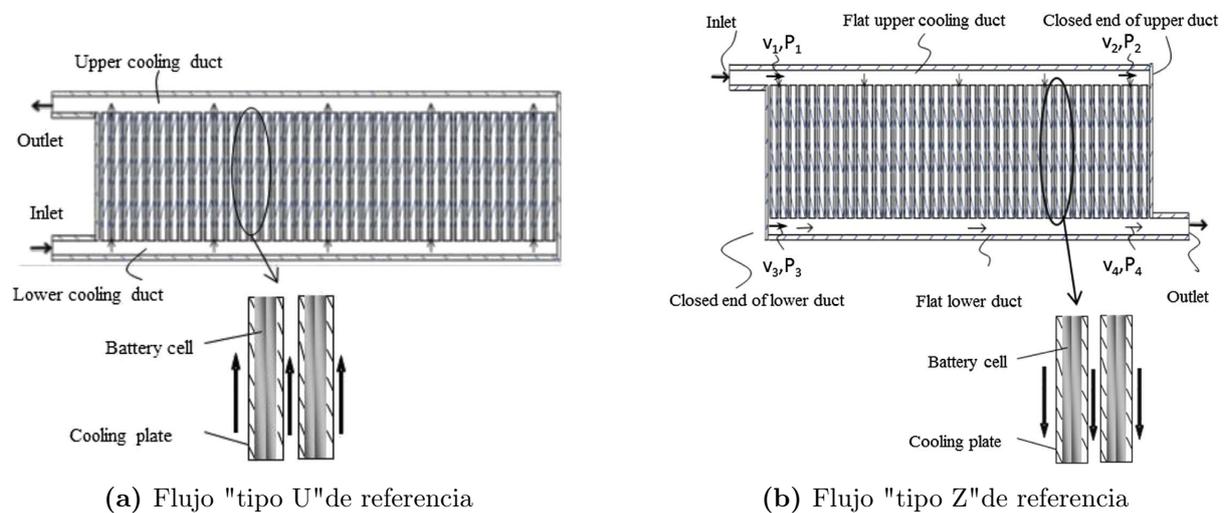


Figura 5. Esquemas de flujo.

Fuente: H. Sun y Dixon, 2014.

- L. Saw et al. (2014) estudiaron el comportamiento eléctrico y térmico de celdas cilíndricas de $LiFePO_4$ de diferentes tamaños (ver **Figura 6**) en diferentes condiciones operativas. Para integrar los elementos en un paquete de baterías se deben considerar aspectos mecánicos, eléctricos, térmicos, de control y monitoreo, fabricación y mantenimiento. El estudio concluyó que la alta potencia del ventilador puede

afectar el rendimiento de la batería si esta se introduce en el ventilador.

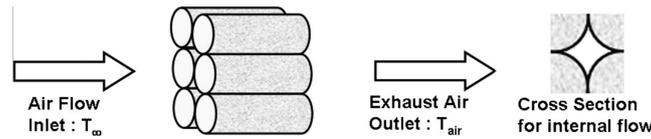


Figura 6. Esquema del sistema de enfriamiento de aire activo de un paquete de baterías EV.

Fuente: L. Saw et al., 2014.

- Li et al. (2013) investigaron numérica y experimentalmente la gestión térmica de una batería de iones de litio de 24 celdas (ver **Figura 7**). Se desarrolló un modelo CFD bidimensional para simular problemas térmicos en una batería enfriada por aire. En este caso, el modelo mostró errores de predicción de hasta 3 °C en algunos casos, por lo que la validación de las simulaciones con una única configuración experimental simplificada se consideró insuficiente cuando se realizó en simulaciones 2D.

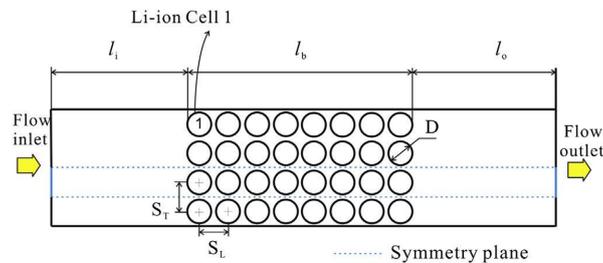


Figura 7. Esquema de la definición del problema.

Fuente: Li et al., 2013.

- Zhu et al. (2013) desarrollaron un modelo que simula las tasas de generación y disipación de calor para 20 paquetes de baterías prismáticas en diferentes condiciones (ver **Figura 8**). Los resultados del modelo muestran que los cambios en el SOC tienen un efecto significativo sobre la tasa de producción de calor reversible; con el mismo SOC y corriente, la tasa de generación de calor reversible e irreversible durante la carga es casi la misma que durante la descarga, pero el calentamiento reversible tiene el efecto opuesto sobre la temperatura de la batería; el coeficiente de resistencia de la batería tiene un valor óptimo.

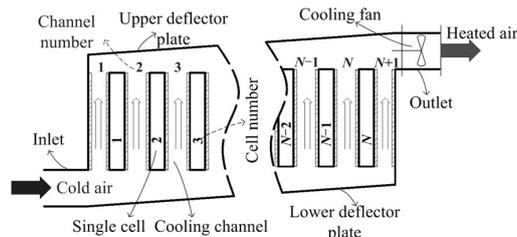


Figura 8. Vista esquemática del paquete de baterías de iones de litio.

Fuente: Zhu et al., 2013.

- T. Wang et al. (2014) analizaron el rendimiento térmico de módulos de batería con una disposición rectangular de 1×24 , 3×8 y 5×5 hilos, una disposición hexagonal de 19 celdas y una disposición circular de 28 celdas (ver **Figura 9**). La simulación utilizó el método computacional tridimensional (CFD) y el modelo unicelular agrupado, y se extrajeron las siguientes conclusiones: cuando el ventilador está ubicado en la parte superior del módulo, se mejora el rendimiento de enfriamiento. La mejor estructura es una disposición cúbica y, centrándose en el uso del espacio del módulo de batería, la mejor opción es una disposición hexagonal. Finalmente, se recomienda la distancia óptima entre elementos en la estructura del módulo de batería.

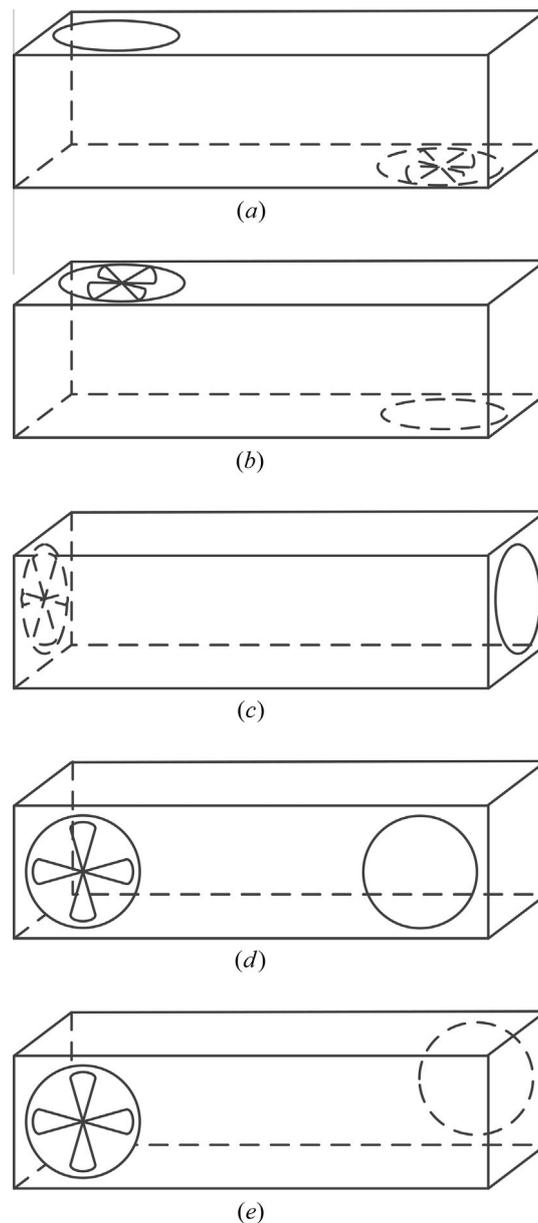


Figura 9. Explicación del ventilador y lugares de apertura.

Fuente: T. Wang et al., 2014.

- Fan et al. (2019) llevaron a cabo el diseño de 32 paquetes de LIB de alta densidad

de energía, como se muestra en la **Figura 10**. Compararon experimentalmente el rendimiento de refrigeración por aire de conjuntos de celdas alineadas, escalonadas y dispuestas en cruz bajo diferentes velocidades de entrada de aire. Además, estudiaron el efecto de enfriamiento y la capacidad del sistema de enfriamiento de aire, variando el volumen de escape y la temperatura del aire de admisión. Finalmente, analizaron la eficiencia energética del sistema de refrigeración por aire en diferentes condiciones de funcionamiento del paquete de baterías.

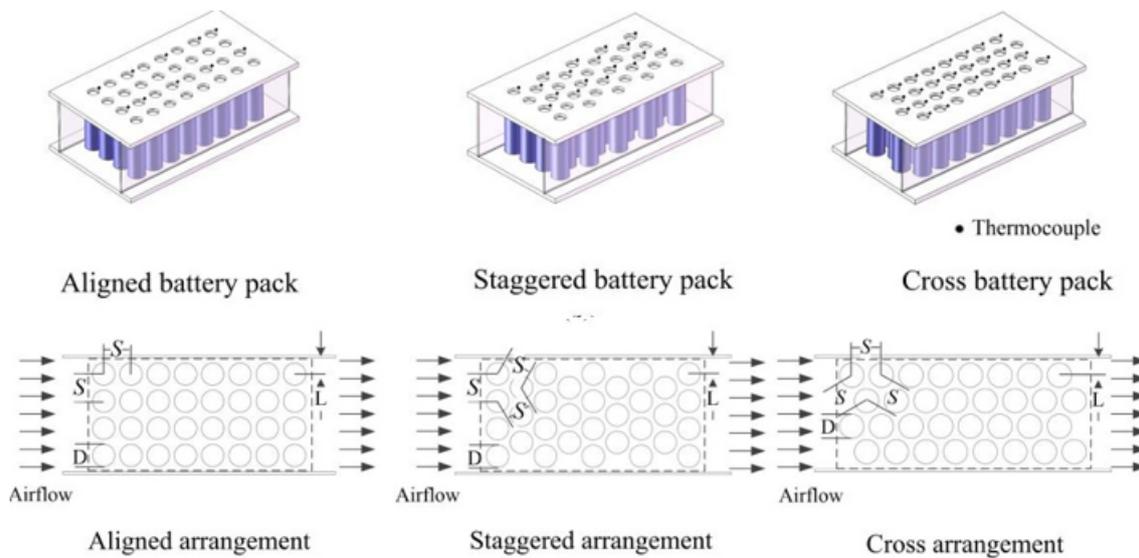


Figura 10. Configuración geométrica y disposición de las celdas cilíndricas de litio.

Fuente: Fan et al., 2019.

Los resultados muestran que la disposición alineada tiene el mejor rendimiento de enfriamiento y la mayor uniformidad de temperatura, seguida de la disposición escalonada y finalmente la disposición cruzada. Además, observamos que la eficiencia energética de los sistemas de enfriamiento de aire disminuye al aumentar la velocidad del aire, y la capacidad de enfriamiento tiene un límite superior proporcional a las emisiones.

- F. Zhang, Yi et al. (2021) propusieron un sistema de gestión térmica de baterías de tipo T refrigeradas por aire (T-BTMS), como se muestra en la Figura 11. Utilizaron estructuras en forma de U y Z para realizar pruebas de carga y descarga en baterías de iones de litio para obtener parámetros claves, la confiabilidad del método CFD se probó mediante experimentos de disipación de calor enfriados por aire en un paquete de baterías. Los resultados muestran que el diseño estructural en el que la batería se coloca verticalmente (tipo T-I) y la parte superior de la caja de la batería está inclinada a 41.5° (Diseño 4) proporciona un mejor rendimiento térmico. Al considerar la posibilidad de agregar deflectores a los canales de enfriamiento y ajustar la distancia entre las unidades, el rendimiento de enfriamiento del BTMS mejora enormemente.

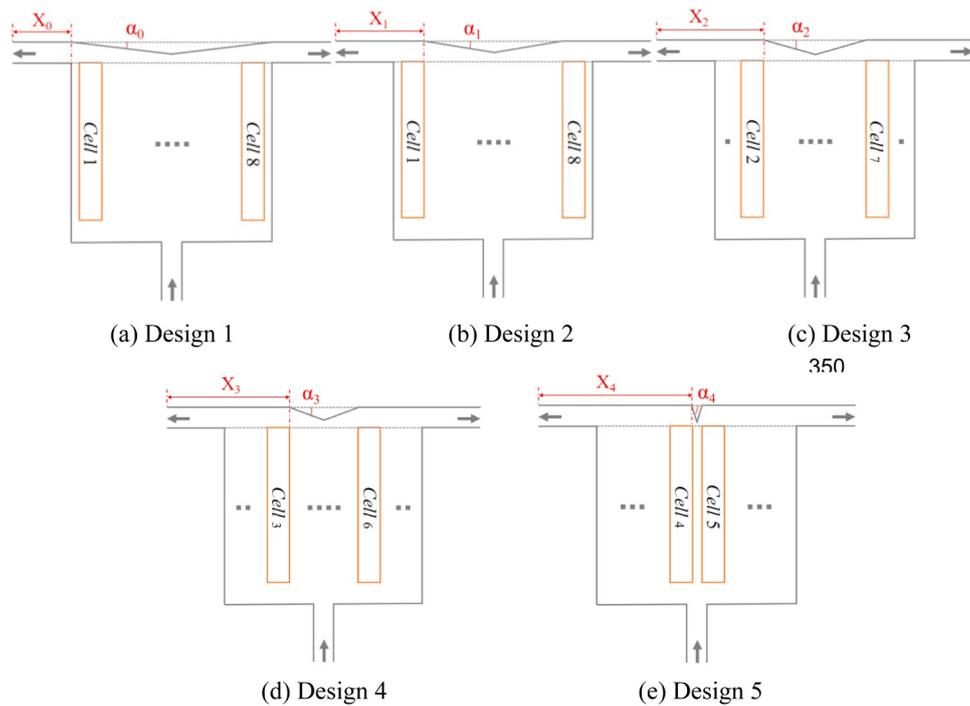


Figura 11. Esquema de optimización superior de BTMS tipo T.

Fuente: F. Zhang, Yi et al., 2021.

- F. Zhang, Wang y Yi (2021) diseñaron un módulo de baterías basado en ventilación múltiple para baterías de litio 18650, como se muestra en la **Figura 12**. Optimizaron la estructura del módulo utilizando técnicas de dinámica de fluidos computacional. Demostraron que los sistemas de gestión térmica con más ventilaciones mejoran el rendimiento de refrigeración de forma más eficaz.

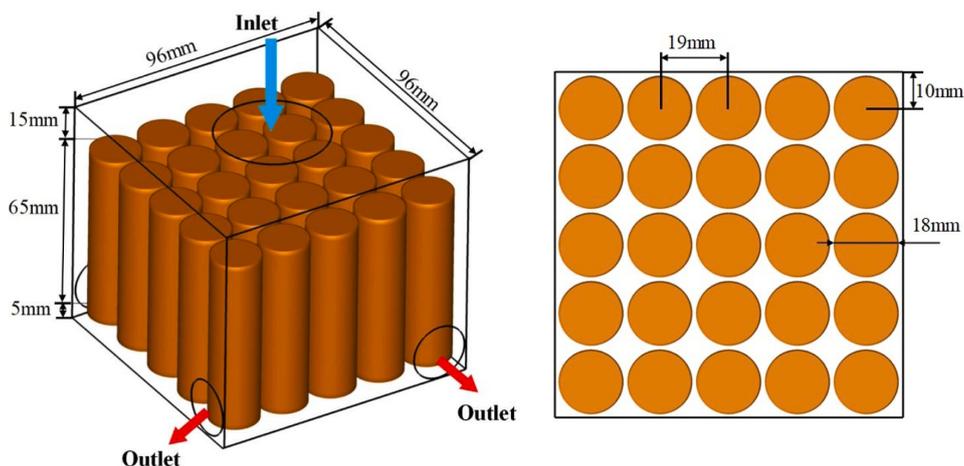


Figura 12. Esquema del BTMS para el módulo de batería.

Fuente: F. Zhang, Wang y Yi, 2021.

Los resultados mostraron que el diseño con una entrada en la parte superior central y cuatro salidas en la esquina inferior derecha en los cuatro lados mostró un mejor rendimiento en comparación con los otros diseños. Cuando la distancia entre las

celdas se varió uniformemente, observaron un efecto de enfriamiento más significativo a 1 mm de distancia. Si el volumen del módulo de batería es fijo, cuando el espaciado de las celdas varía de manera desigual, el mejor efecto de enfriamiento lo proporciona la disposición de las celdas que están cerca por dentro y rara vez por fuera. Al descargar la batería a una velocidad de 3C, la velocidad de entrada de aire también se mantiene al menos a 2 m/s para garantizar el funcionamiento estable del módulo óptimo.

- Kirad y Chaudhari (2021) se centraron en el uso de refrigeración por aire forzado para un módulo de batería que consta de 30 celdas de iones de litio, como se muestra en la **Figura 13**. Se establece un modelo numérico del diseño del módulo de batería para una sola celda de iones de litio y un sistema de enfriamiento para analizar el sistema, y se valida utilizando datos de investigaciones previas. Se investigaron los efectos de los cambios en la distancia longitudinal y lateral entre las celdas en varios parámetros de evaluación.

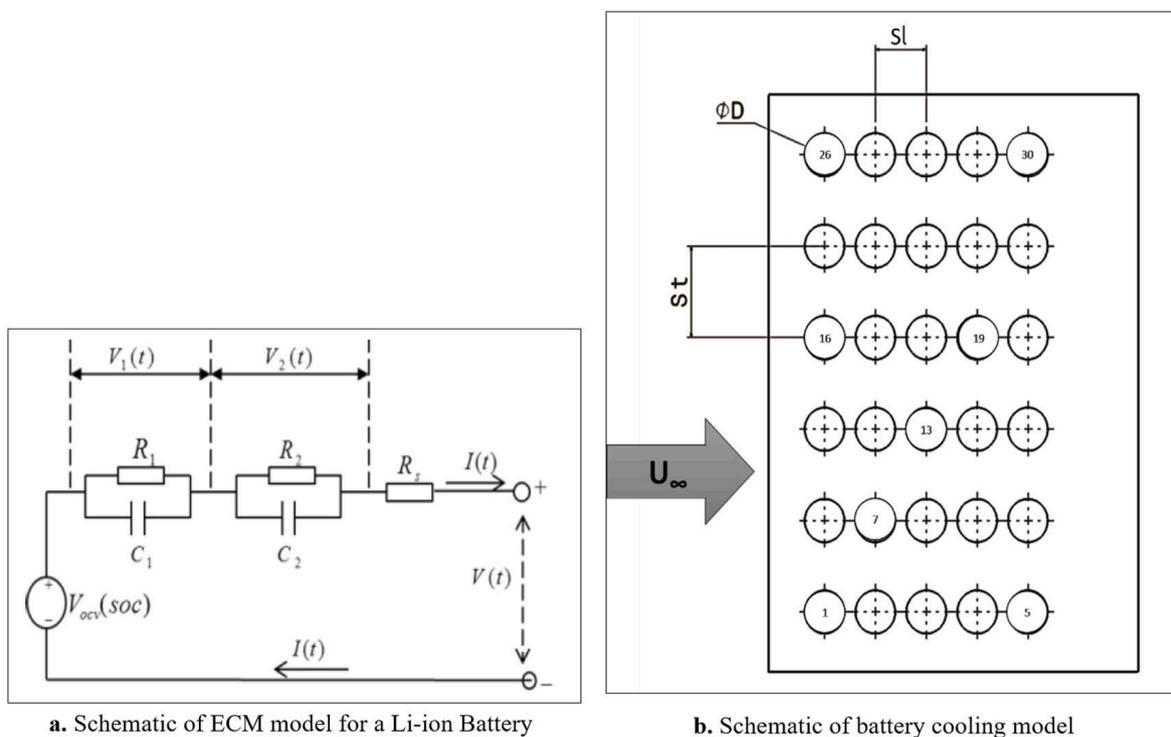


Figura 13. Modelos utilizados en la investigación.

Fuente: Kirad y Chaudhari, 2021.

Los resultados muestran que la distancia lateral entre las celdas tiene un efecto significativo sobre el factor de eficiencia de enfriamiento, mientras que la distancia longitudinal tiene un efecto significativo sobre la uniformidad de la temperatura. El presente estudio ayuda a seleccionar la ranura del módulo de batería para obtener los valores óptimos de los parámetros de evaluación.

- Jiaqiang et al. (2018) utilizaron técnicas de dinámica de fluidos computacional y un

modelo de batería de grupo único para estudiar el rendimiento de la transferencia de calor de un módulo de batería 18650 que consta de 60 celdas y soportes de batería estándar. Además, analizaron el enfriamiento por convección de aire del módulo de batería, teniendo en cuenta el efecto de la resistencia del soporte de la batería. Investigaron diferentes estrategias de enfriamiento variando las posiciones relativas de las entradas y salidas de aire para determinar la configuración de enfriamiento más eficiente, como se muestra en la **Figura 14**. También utilizan deflectores para mejorar la distribución del flujo de aire y así mejorar el rendimiento de refrigeración mediante la convección de aire en los lados de entrada y salida.

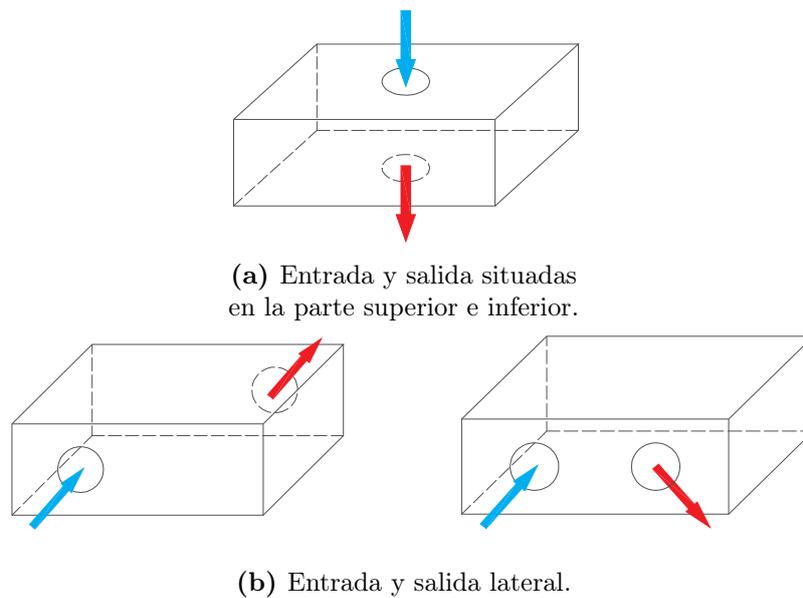


Figura 14. Disposición geométrica de la simulación.

Fuente: Jiaqiang et al., 2018.

Los resultados muestran que las configuraciones con entrada y salida en lados opuestos proporcionan un mejor rendimiento de refrigeración que las configuraciones en el mismo lado. Además, se observó que el uso de deflectores puede mejorar significativamente el rendimiento térmico de las estrategias de enfriamiento de entrada y salida laterales. En resumen, el mejor rendimiento de refrigeración se logra cuando las entradas y salidas de aire están en lados opuestos de la carcasa y se utilizan deflectores.

- Kummitha (2023) introdujo un innovador módulo de batería que consideraba un soporte de batería de altura variable. Estos soportes actúan como disipadores de calor para mejorar la distribución uniforme de la temperatura en el módulo, como se muestra en la **Figura 15**. Para mantener las mismas condiciones de límite y parámetros físicos, se compararon módulos de batería nuevos y tradicionales en diferentes condiciones de descarga. Evaluaron la importancia de los soportes de la batería, que actúan como aletas, analizando los contornos y la distribución de

temperatura de cada celda del módulo de batería.

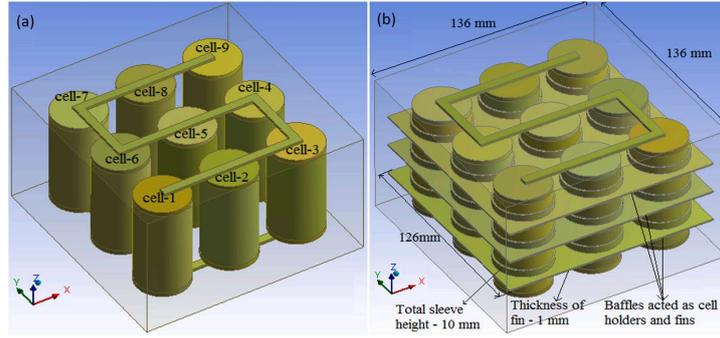


Figura 15. Modelado geométrico del módulo de baterías a) Modelo base y b) Nuevo modelo.

Fuente: Kummitha, 2023.

Los resultados numéricos muestran que a tasas de descarga de 1C, 2C y 3C, las temperaturas máximas del modelo tradicional son 301.5 K, 303.9 K y 308.8 K, respectivamente, mientras que las temperaturas máximas del nuevo modelo son 300.6 K, 302.1 K y 304 K, respectivamente. A una velocidad de descarga de 1C, el gradiente de temperatura entre las celdas ($T_{\text{cell 4}} - T_{\text{cell 6}}$) en la dirección del flujo es de $0.26\text{ }^{\circ}\text{C}$ para el modelo de batería convencional y de $0.04\text{ }^{\circ}\text{C}$ para el nuevo modelo.

- Nazar et al. (2023) realizaron una serie de experimentos de carga y descarga de baterías para investigar el efecto de la gestión térmica en el rendimiento de la batería. La distribución de temperatura entre las celdas se analizó cambiando las condiciones ambientales y utilizando materiales de cambio de fase para mejorar la gestión térmica, como se muestra en la **Figura 16**.

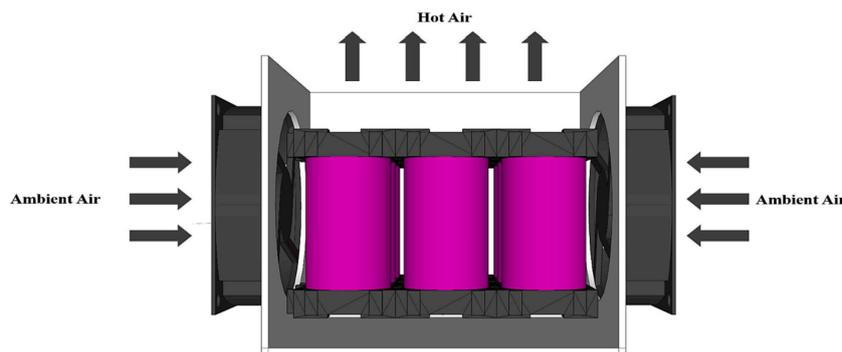


Figura 16. Diseño 3D de la refrigeración por aire.

Fuente: Nazar et al., 2023.

Los resultados muestran que, sin gestión térmica, el esquema general de carga y descarga muestra una diferencia de temperatura de hasta $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ en comparación con la temperatura ambiente. Esta diferencia de temperatura puede afectar negativamente el rendimiento a largo plazo de la batería. Sin embargo, la introducción de la

refrigeración activa (refrigeración por aire) mejora significativamente la gestión del calor en la batería, reduciendo la diferencia de temperatura a aproximadamente $6\text{ }^{\circ}\text{C}$ respecto a la temperatura ambiente. Por otro lado, la refrigeración pasiva mediante materiales de cambio de fase (PCM) también ha mostrado mejoras significativas en la gestión térmica de la batería. Esta tecnología proporciona una diferencia de temperatura de aproximadamente $3.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ en comparación con la temperatura ambiente.

- Öztop y Şahinaslan (2022) propusieron un innovador sistema de gestión térmica con baterías enfriadas por aire para aplicaciones de bajo consumo. Modificaron la batería cilíndrica de iones de litio de uso común y agregaron aletas rectangulares colocadas a lo largo de los lados. Se consideran diferentes configuraciones de módulos de batería 4S6P (Número de modelo) utilizando moldes alineados y escalonados, así como tres opciones de aletas diferentes para dos espaciamientos de celdas, direcciones de flujo de aire y números de Reynolds diferentes. Además, se han variado las temperaturas de entrada de aire como parámetros de estudio.

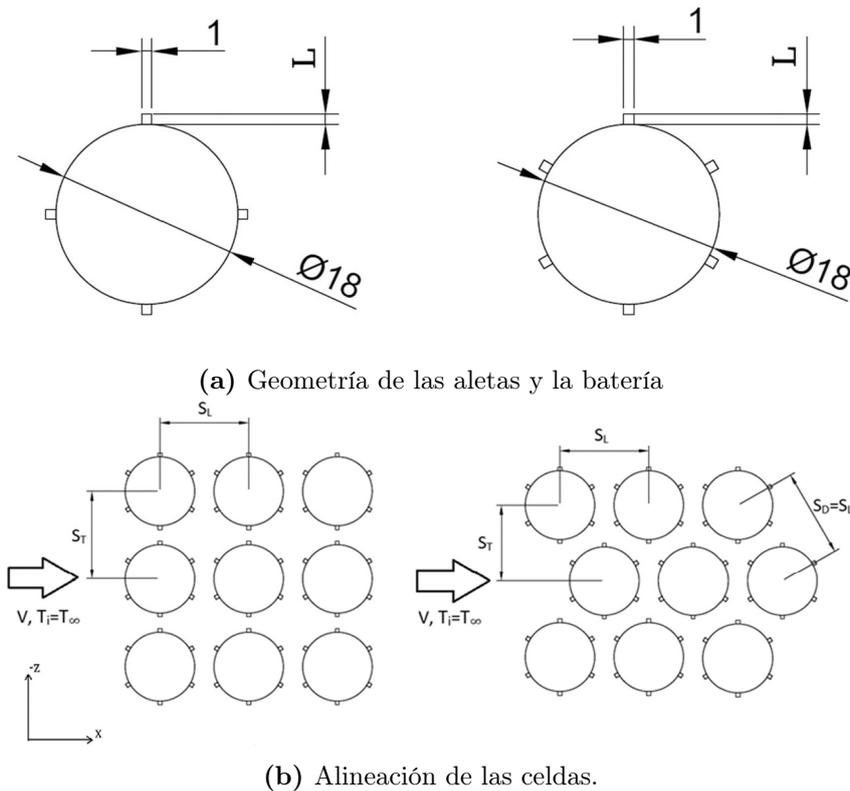


Figura 17. Geometrías y disposición de las celdas.

Fuente: Öztop y Şahinaslan, 2022.

Los resultados obtenidos muestran que las aletas influyen significativamente en el rendimiento de refrigeración y proporcionan condiciones de temperatura óptimas para la batería con una temperatura máxima en el rango de $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $35\text{ }^{\circ}\text{C}$. Sin embargo, se observó que el disipador de calor no era suficiente para mantener la uniformidad de temperatura en todo el volumen del módulo, lo que resultó en una

diferencia de temperatura de 5 °C. Además, se determinó que la distancia entre las celdas y la dirección del flujo de aire son factores cruciales para lograr un diseño térmico exitoso y eficiente en términos de gestión térmica.

- Pordanjani et al. (2023) realizaron un estudio sobre baterías de litio cilíndricas compactas. Analizaron la disposición de estas celdas en diferentes patrones, como cuadrados, rombos, óvalos y círculos, como se muestra en la **Figura 18**. Para analizar el comportamiento térmico y electroquímico de la batería, utilizaron ecuaciones térmicas y electroquímicas y las resolvieron mediante FEM. También se introduce un flujo de aire alrededor de la batería para reducir la temperatura de la batería y, combinado con la ecuación de la LIB, se utiliza el mismo método para resolver todo el sistema.

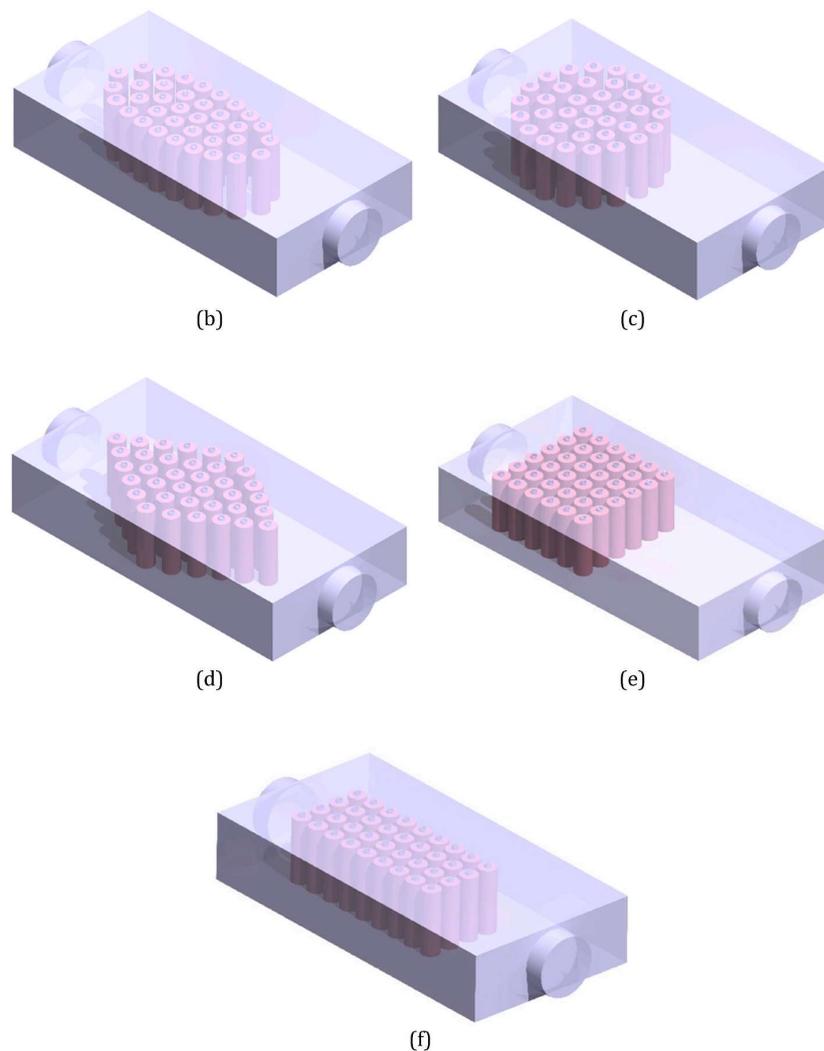


Figura 18. Esquema del paquete de iones de litio con diferentes configuraciones: b) Elíptico. c) Circular. d) Rombo. e) Cuadrado. f) Rectangular.

Fuente: Pordanjani et al., 2023.

Los resultados muestran que la refrigeración de las baterías de iones de litio mejora

significativamente y el gradiente de temperatura se reduce al aumentar la distribución de la batería en el medio. Además, teorizaron que aumentar el área de la sección transversal y la velocidad del flujo de aire mejoraba la transferencia de calor a la batería, lo que resultaba en temperaturas más bajas. Finalmente, se ha demostrado que una mejor refrigeración tiene un efecto positivo en el rendimiento de la batería a largo plazo. Para la estructura circular, la caída de presión aumenta en un 48.01 % a medida que aumenta el área de la sección transversal de entrada y la transferencia de calor aumenta en un 85.14 %. Además, a medida que aumenta la velocidad, la caída de presión y la transferencia de calor de esta estructura aumentan en un 89.09 % y 66.90 %, respectivamente.

- Sahin et al. (2022) propusieron un enfoque innovador para el diseño de baterías cilíndricas investigando el efecto de diferentes tipos de deflectores (cilíndricos, triangulares, de diamante y de aletas) sobre el rendimiento de enfriamiento y la caída de presión de los módulos de baterías enfriados por aire. El módulo consta de 12 cilindros tipo 21700, como se muestra en la **Figura 19**. Las propiedades térmicas se analizaron utilizando el modelo térmico electroquímico de las baterías y el modelo multiescala P3D (Modelo pseudo 3D) en COMSOL Multiphysics 5.5. Se registraron los parámetros de modelado de una batería comercial 21700 y se probó la precisión del modelo en experimentos.

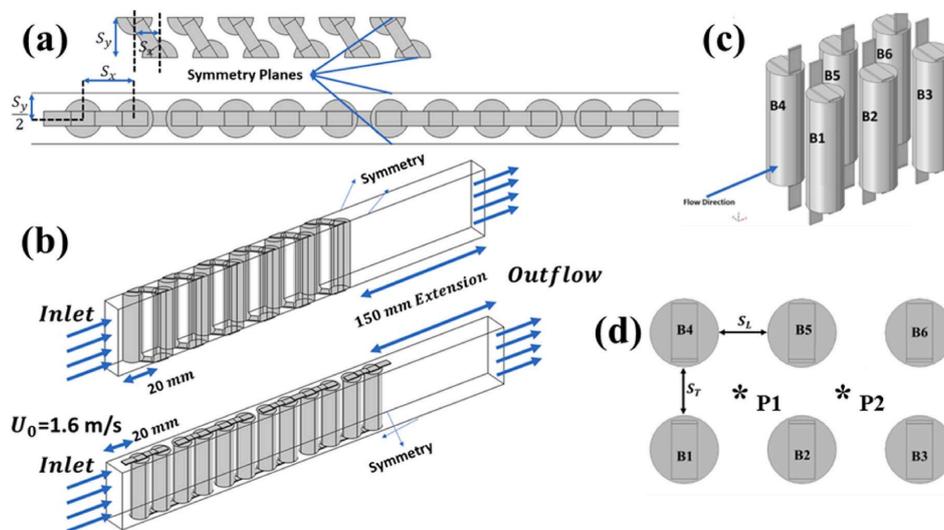


Figura 19. Ilustración del módulo con 12 celdas desde (a) vista superior y (b) vista 3D. (c–d) Imágenes del distanciamiento y cómo se ubican las celdas en la simulación y experimento.

Fuente: Sahin et al., 2022.

Los resultados mostraron que los deflectores ayudaron a reducir la temperatura máxima y la diferencia de temperatura en un 5 % (1.8 °C) y un 40 % (1.7 °C), respectivamente. Sin embargo, se observó que estos deflectores también consumen 3.5 veces más energía en comparación con el diseño básico. De los deflectores evaluados, encontraron que las paletas Delta ofrecían la mejor solución. Estas aletas reducen

la temperatura máxima y la diferencia de temperatura en un 2% (0.6 °C) y un 15% (0.7 °C) respectivamente, a expensas de un aumento del 44% en el consumo de energía parásita (0.12 W).

- Singh et al. (2021) realizaron un estudio numérico sobre el rendimiento de módulos de baterías refrigerados por aire con el objetivo de lograr una disipación de calor eficiente durante la descarga. Se analizan diferentes valores de caudal de aire, configuración de la batería y número de baterías en el módulo de batería, como se muestra en la **Figura 20**.

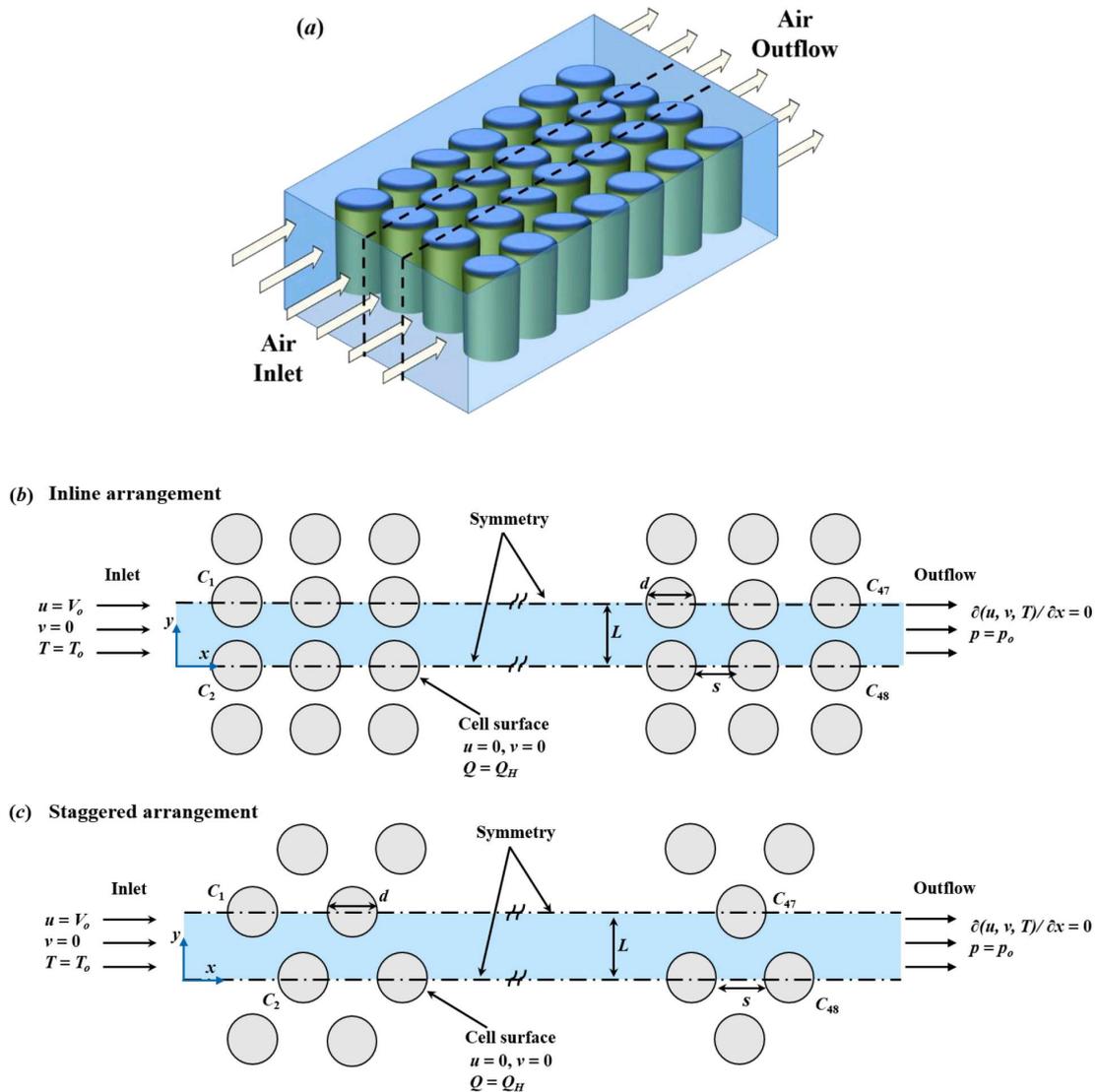


Figura 20. (a) Representación esquemática del flujo a través del módulo de batería 3D; y dominio computacional para (b) disposición en línea y (c) disposición escalonada de celdas.

Fuente: Singh et al., 2021.

Los autores utilizaron un modelo térmico electroquímico acoplado para modelar el comportamiento de descarga de la batería. Además, se utilizaron modelos bidimensionales de flujo y transferencia de calor para monitorear la temperatura dentro

y fuera de cada celda. Durante su investigación, desarrollaron una correlación que podría determinar la temperatura máxima en un módulo en función del número de celdas del sistema. Observaron que las configuraciones de flujo, ya sean lineales o escalonadas, no afectaron significativamente la velocidad y los campos térmicos por encima del valor crítico del número de celdas del módulo.

- Widyantara et al. (2021) optimizaron el diseño del paquete de batería de litio con el sistema de enfriamiento de aire. Modificaron el número de ventiladores de enfriamiento y la temperatura del aire de entrada para alcanzar una temperatura de funcionamiento óptima, como se muestra en la **Figura 21**. Utilizaron un modelo numérico basado en el método reticular de Boltzmann para simular una batería de 74 V y 2.31 kWh.

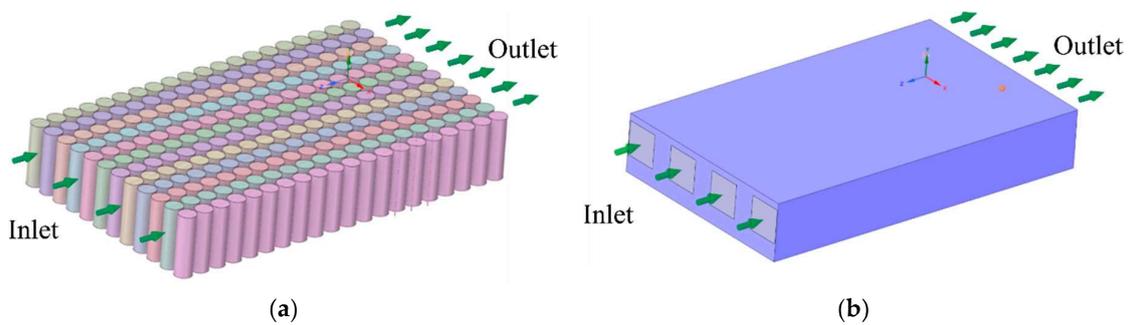


Figura 21. Ejemplo de modelo LBM (a) configuración de celdas de batería (b) paquete de batería para 4 entradas.

Fuente: Singh et al., 2021.

Los resultados obtenidos muestran que aumentar el número de ventiladores de refrigeración reduce la diferencia de temperatura entre las celdas de la batería. Al reducir la temperatura del aire de admisión, también se observó una disminución en la temperatura promedio en el paquete de baterías. Durante la optimización, se determinó que la configuración más eficiente es utilizar tres ventiladores de refrigeración con una temperatura del aire de entrada de 25 °C para obtener el mejor rendimiento con un bajo consumo de energía. Esta configuración mantiene todas las celdas de la batería dentro del rango de temperatura óptimo, aunque la diferencia de temperatura máxima sigue siendo de 15 °C.

- Xu et al. (2022) realizaron simulaciones numéricas de un canal en forma de U con diferentes posiciones de entrada para investigar la aplicación del enfriamiento por aire en la disipación de calor de paquetes de baterías de vehículos eléctricos, como se muestra en la **Figura 22**. Se analizó el efecto de la posición de entrada y la velocidad del viento de entrada sobre el rendimiento de enfriamiento del paquete de baterías. Los resultados obtenidos revelan que el mecanismo por el cual la posición de entrada y la velocidad del viento de entrada afectan el rendimiento de enfriamiento del paquete de baterías. Observaron que establecer la posición de entrada en 30 mm en

lugar de 20 mm reducía la temperatura máxima de la batería en 4.17 K. Esto se debe al efecto de circulación, que provoca un aumento en la velocidad del flujo de aire en la parte trasera del paquete de baterías. Además, descubrieron que aumentar la velocidad del viento de entrada de 2 m/s a 5 m/s reducía la temperatura máxima del paquete de baterías entre 8.5 y 18.5 K. Esto se atribuye al rendimiento de enfriamiento mejorado proporcionado por el flujo ambiental. Efecto y alta transferencia de calor por convección. En resumen, determinaron que una coincidencia razonable entre la ubicación de la entrada (10 a 30 mm) y la velocidad de entrada (3 a 6 m/s) puede mejorar significativamente el rendimiento de refrigeración del paquete de baterías. Estos hallazgos son importantes para optimizar el diseño de los sistemas de refrigeración por aire de los vehículos eléctricos y garantizar un control adecuado de la temperatura de la batería, lo que puede ayudar a mejorar el rendimiento y la vida útil de la batería.

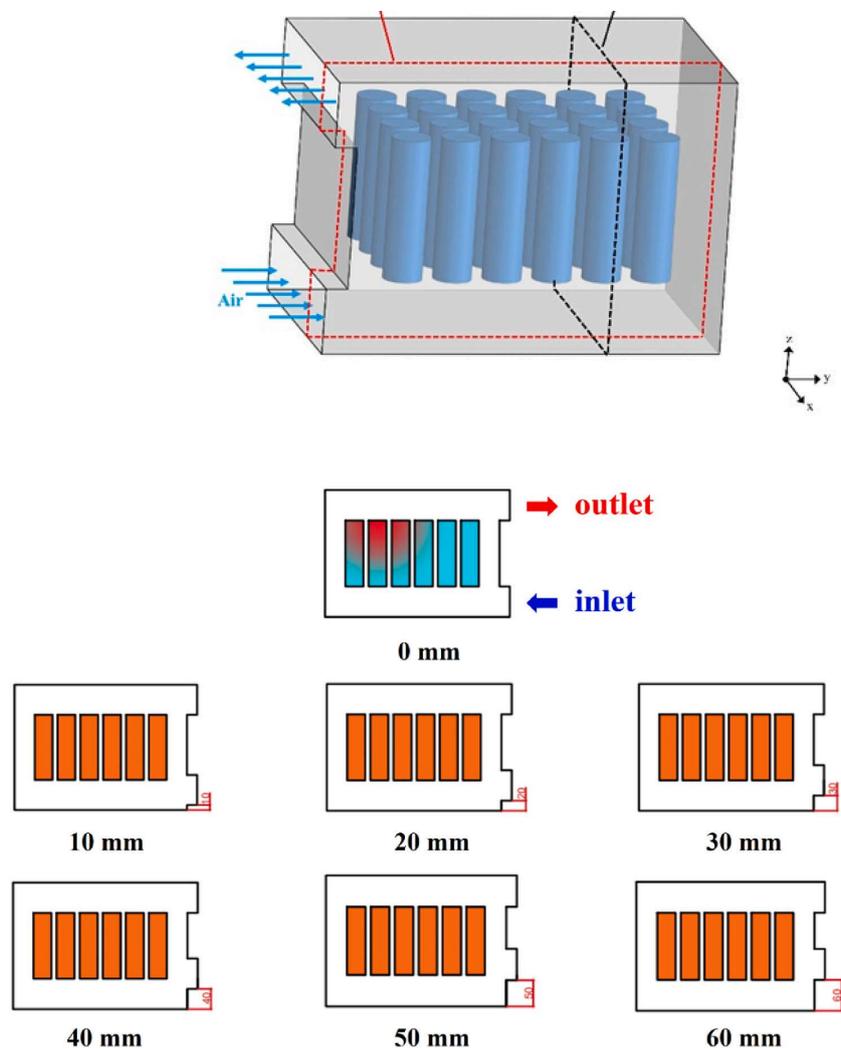


Figura 22. Geometría de baterías Ni-MH en canal en forma de U.

Fuente: Xu et al., 2022.

4.1.5. Temperatura de operación de baterías

La química de la batería de litio puede funcionar en tres rangos de temperatura, como se muestra en la **Figura 23**. El primer rango es de $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ y se denomina rango de temperatura de supervivencia, mientras que el segundo rango incluye $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ se denomina rango de temperatura de funcionamiento, y finalmente el rango de temperatura óptimo es de $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $35\text{ }^{\circ}\text{C}$, siendo este último el rango de temperatura en el que la batería debe operar la mayor parte del tiempo.

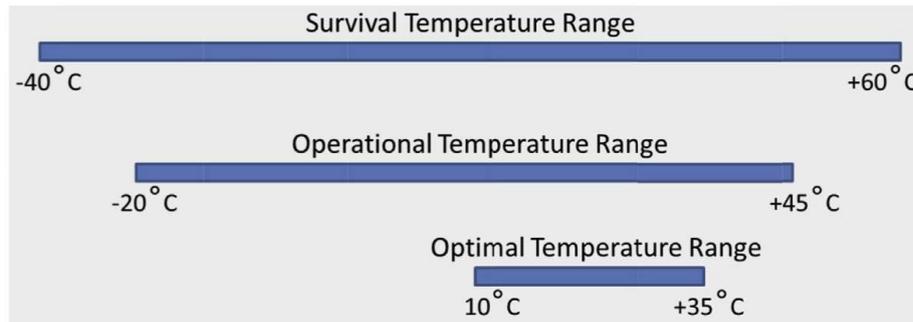


Figura 23. Rangos de temperatura de la celda de iones de litio.

Fuente: Warner, 2015.

No se espera que la vida útil de la batería se degrade durante el funcionamiento normal por encima del rango de temperatura de funcionamiento. Entre $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ el electrolito se congela y aumenta la resistencia de la batería, reduciendo el flujo de iones de litio, mientras que por encima de $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ muchas baterías tienden a debilitarse y volverse más inestables, de ahí el nombre de zona de supervivencia. Por encima de los $90\text{ }^{\circ}\text{C}$, el separador a base de polímero se ve afectado, provocando fusión y degradación con el tiempo hasta que se desarrolla una serie de cortocircuitos internos entre el ánodo y el cátodo, después de lo cual la batería entra en el llamado estado de descarga térmica.

En términos prácticos, el agotamiento térmico significa que la batería se ha calentado lo suficiente como para generar calor autosuficiente y pronto comenzará a fallar en forma de ventilación y/o explosión de la batería (a menudo denominada "desconexión rápida") (Warner, 2015). Dependiendo de la química de la batería, la temperatura a la que se alcanza el umbral de fuga térmica varía, en algunos casos puede alcanzar los $120\text{ }^{\circ}\text{C}$, mientras que en otros casos puede superar los $140\text{ }^{\circ}\text{C}$ antes de que se alcance el evento.

Es relevante mencionar que las baterías de iones de litio deben mantenerse a una temperatura de funcionamiento de $23\text{ }^{\circ}\text{C}$ para funcionar de manera eficiente, y un aumento de 10 K en la temperatura de funcionamiento da como resultado una reducción del 50% en la vida útil de la batería. Por lo tanto, la batería debe contar con un sistema de enfriamiento para mantener una temperatura óptima y no exceder la temperatura máxima

permitida bajo ninguna condición ambiental u operativa.

4.1.6. Generación de calor en baterías de litio

Como en cualquier sistema energético, las baterías experimentan inevitablemente pérdidas de energía en el proceso de conversión de energía química en energía eléctrica (y viceversa), que se manifiesta en forma de calor debido a la eficiencia de los componentes del sistema. Para aplicar estrategias de mitigación, es importante identificar y analizar cada fuente de generación de calor en las LIB.

4.1.6.1 Generación de calor por calentamiento Joule. El calentamiento Joule se debe a que los electrones no pueden moverse tan rápido como necesitan (debido a la presencia de un campo externo o un gradiente de potencial). El calor generado en esta categoría depende del campo externo y de las conductividades eléctricas de los distintos componentes, como se muestra en la **Ecuación 1** (Santhanagopalan et al., 2014):

$$q = i^2 \times R = \sigma(\nabla\phi_S)^2, \quad (1)$$

donde σ es la conductividad eléctrica, $\nabla\phi_S$ es el gradiente de voltaje para una densidad de corriente dada.

Como se muestra en la **Ecuación 1**, la producción de calor aumenta cuando los gradientes de voltaje son grandes y, por lo tanto, el efecto Joule domina durante altas velocidades de carga y descarga de la batería. Para reducir el gradiente de potencial en las diferentes partes de la celda por las que pasan los electrones se deben seleccionar componentes con buena conductividad eléctrica. Por otro lado, los movimientos de los iones producen el mismo efecto de generación de calor, pero a mayor escala, ya que los iones son más grandes que los electrones, lo que significa que se mueven con menor eficiencia. Este movimiento lento hace que los iones se acumulen en áreas selectivas de la celda, lo que significa que algunas partes del electrolito tienen una mayor concentración de iones, mientras que otras partes tienen una concentración menor. Para ello se introducen fuerzas adicionales que son capaces de mover iones de regiones más ocupadas a regiones menos ocupadas.

Existe una conductancia dependiente de la difusión correspondiente (κ_D) y la fuerza impulsora es el gradiente de concentración de iones. La **Ecuación 2** (Santhanagopalan et al., 2014) resume la contribución de estos dos fenómenos al calentamiento Joule que ocurre en el electrolito:

$$q = i^2 \times R = \varepsilon^t \cdot \kappa \left(\varepsilon^t \cdot \kappa \cdot \nabla\phi_e + \kappa_D \cdot \nabla \ln C_e \right)^2, \quad (2)$$

donde ε^t es la porosidad de los electrodos y/o el separador, κ es la conductividad iónica

del electrolito, κ_D es la conductividad relacionada con la difusión.

4.1.6.2 Generación de calor por reacciones de electrodo. La corriente que fluye a través de la batería tiene dos interfaces: una es el transporte de electrones en los electrodos y la otra es el movimiento de iones en el electrolito. En cada interfaz entre un electrodo y un electrolito, se produce una transferencia de carga entre dos portadores cuando ocurre una reacción electroquímica. Debido a la ineficiencia del proceso de transferencia de carga, parte de la energía cinética asociada con estas reacciones se pierde en forma de calor. En cada transferencia de carga, se genera un potencial en la interfaz electrodo-electrolito debido a la diferencia de energía libre en el electrodo (y electrolito) antes y después de la transferencia de carga.

Este potencial es una medida del trabajo realizado para transportar una unidad de carga a través de una interfaz: sus unidades son voltios (que a su vez son julios por coulombio). La diferencia de energía en ambos lados de la interfaz explica la ineficiencia del proceso de transferencia de carga. Por lo tanto, la tasa de producción de calor de la reacción viene dada por la **Ecuación 3** (Santhanagopalan et al., 2014):

$$q = \sum_j a_s i_j \eta_j, \quad (3)$$

donde $a_s i_j$ son las velocidades de reacción escaladas por área, η_j es el sobrepotencia, q es una medida de la cantidad total de energía liberada (o consumida) por segundo por unidad de volumen.

4.1.6.3 Generación de calor entrópico. Durante la intercalación y desintercalación de iones de litio, habrá cambios en la disposición de los átomos en la estructura cristalina dentro y fuera del electrodo. Estos cambios dan como resultado una pérdida llamada calor entrópico, que comúnmente se introduce en los cálculos de producción de calor utilizando el factor de corrección de onda que se muestra en la **Ecuación 4** (Santhanagopalan et al., 2014).

$$\eta = \eta_{ref} - \left(\frac{\partial U}{\partial T} \right)_{ref} (T - T_{ref}), \quad (4)$$

donde U es el valor de equilibrio del potencial, T_{ref} es la temperatura de referencia.

El concepto de entropía supone que el potencial de equilibrio en cada interfaz de electrodo varía linealmente con la temperatura. El calor entrópico es una propiedad característica de los materiales, por lo que lo principal para controlarlo está en la elección del material del electrodo (Santhanagopalan et al., 2014).

4.2. Sistemas de enfriamiento de baterías de litio

El objetivo del sistema de gestión térmica es garantizar que la batería sea capaz de cumplir los requisitos de carga especificados a una temperatura media óptima (definida por el equilibrio entre vida útil y rendimiento) y con una distribución uniforme de la temperatura (es decir, solo pequeñas fluctuaciones de temperatura entre celdas, módulos y conjuntos) según lo determinado por el fabricante de la batería (Santhanagopalan et al., 2014).

El sistema de gestión térmica debe garantizar que la diferencia de temperatura entre la batería más fría y la batería más caliente sea de aproximadamente 2 °C a 3 °C, y para sistemas de baterías más grandes, la diferencia de temperatura sea de 6 °C a 8 °C debido a la mayor diferencia de temperatura entre celdas. El gradiente hace que envejecen a diferentes ritmos, lo que significa una vida útil más corta de la batería.

4.2.1. Enfriamiento por aire

Sharma y Prabhakar (2021) investigaron los parámetros de diseño del sistema de gestión térmica para baterías refrigeradas por aire, como se muestra en el diagrama de flujo de la **Figura 24**.

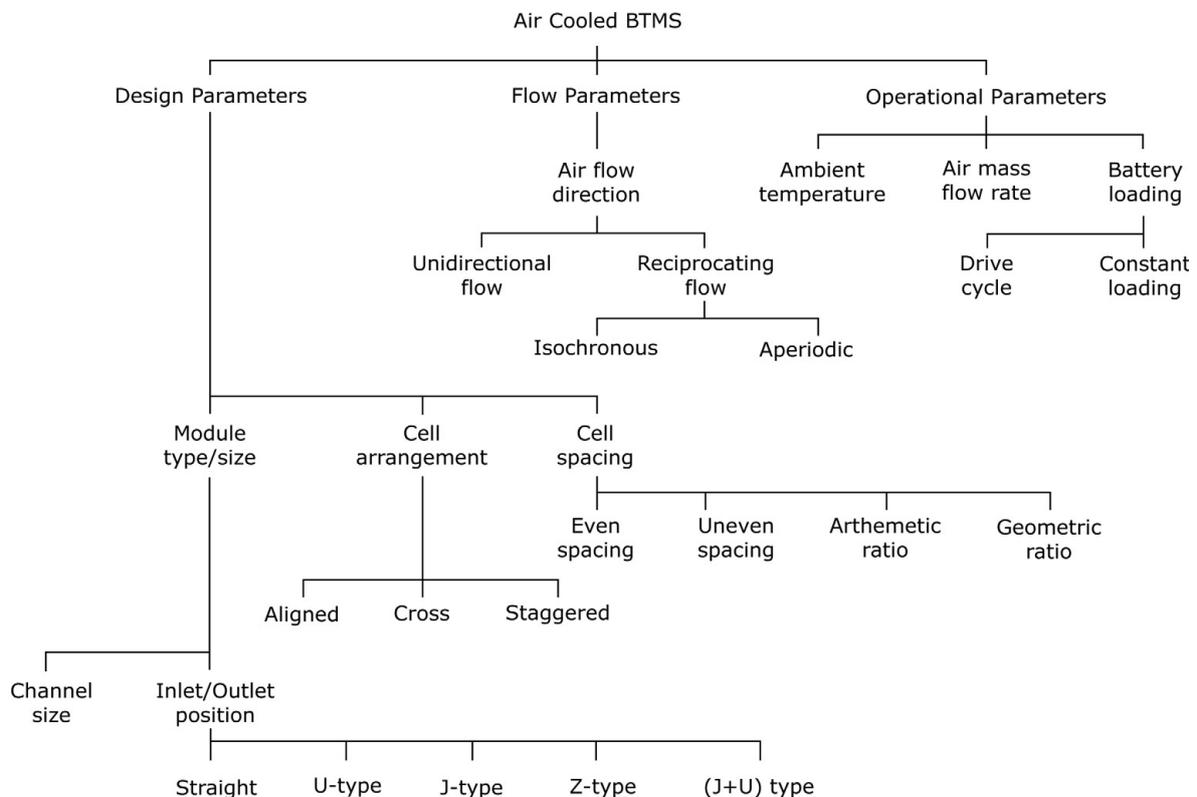


Figura 24. Diagrama de flujo de los diferentes parámetros estudiados en sistemas BTMS refrigerados por aire.

Fuente: Sharma y Prabhakar, 2021.

El enfriamiento por aire es relativamente eficaz para hacer frente a cambios rápidos de temperatura y es más ligera, pero menos eficiente que la refrigeración líquida. Por diseño, el aire en movimiento tiene un mayor efecto sobre las celdas al principio que al final, porque a medida que el aire se mueve sobre las celdas, acumula calor, provocando una disminución en la eficiencia de la transferencia de calor.

Estos sistemas utilizan grandes conductos, ventiladores y filtros de aire. El aire debe estar libre de impurezas para evitar contaminar el interior de la batería, provocando fugas de corriente o inhibiendo la transferencia de calor.

Hay dos métodos para enfriar el sistema de batería, a saber, aire activo y aire pasivo. El primer método es el enfriamiento por aire a través de un evaporador, como se muestra en la **Figura 25**.

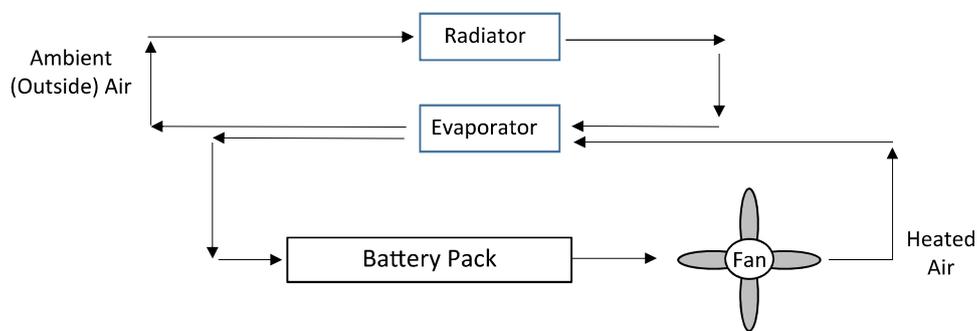


Figura 25. Esquema de enfriamiento de aire activo.

Fuente: Warner, 2015.

El segundo método consiste en utilizar el aire ambiente a través de la cabina para conducir el aire a la batería. Luego se descarga al medio ambiente como se muestra en la **Figura 26**.

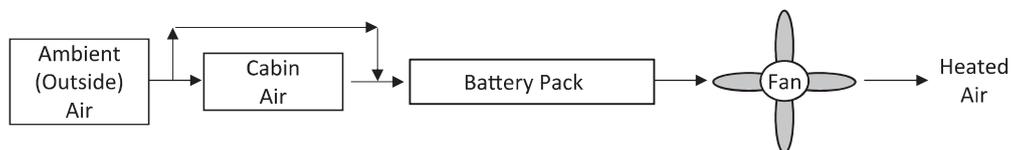


Figura 26. Esquema de enfriamiento de aire pasivo.

Fuente: Warner, 2015.

4.2.2. *Enfriamiento por líquido*

Otro método común para enfriar una batería consiste en hacer pasar líquido (normalmente una mezcla de agua y glicol) a través de una serie de mangueras e intercambiadores de calor integrados en la batería. La principal ventaja de este sistema es la eficiencia de la rápida transferencia de calor desde la batería, pero su estructura es más pesada y la

batería corre el riesgo de sufrir fugas. Un enfoque para dicho sistema es unir la placa directamente a la batería y hacer fluir fluido de enfriamiento o calentamiento a través de la placa, como se muestra en la **Figura 27**.

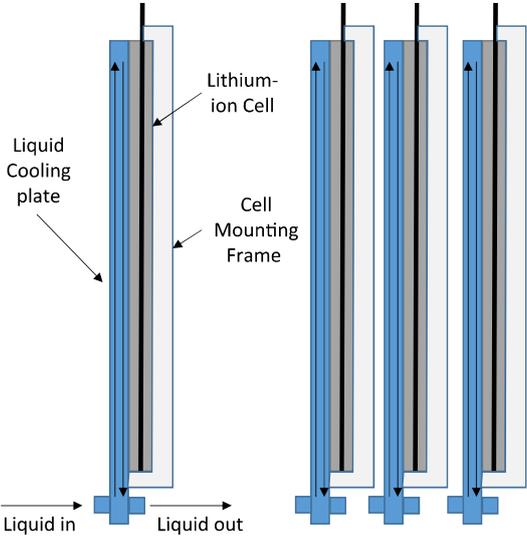


Figura 27. Placas de refrigeración líquida.

Fuente: Warner, 2015.

Otro enfoque es crear una única placa a través de la cual fluye el fluido, pero en lugar de conectar las celdas directamente a esta placa, se unen una serie de aletas a la placa térmicamente sincronizada. Luego, las baterías de iones de litio se conectan directamente a estos disipadores de calor (ver **Figura 28**).

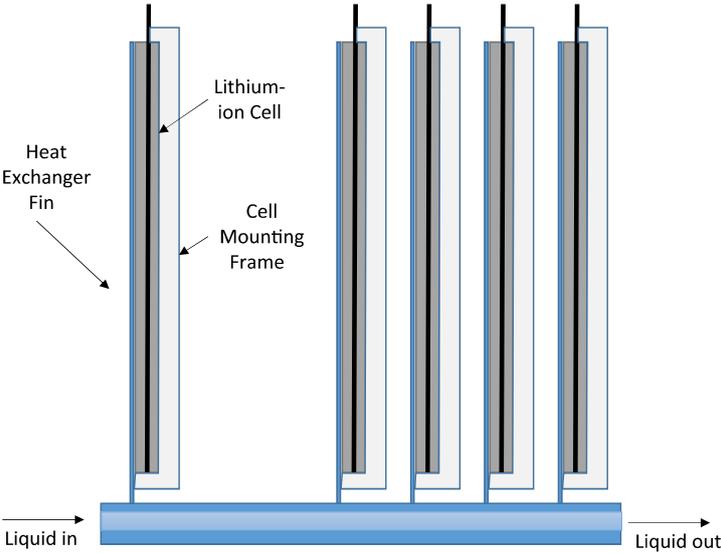


Figura 28. Aletas del disipador de calor.

Fuente: Warner, 2015.

4.2.3. Enfriamiento mediante materiales de cambio de fase (PCM)

Un PCM es un material sólido a base de cera y grafito con espacios para insertar celdas. Absorbe el calor y lo esparce por toda la estructura, provocando que el material se ablande o se derrita. Este es un método de enfriamiento eficaz porque requiere una gran cantidad de energía para lograr un cambio de fase en el material (ver **Figura 29**). Este sistema de enfriamiento es más barato de implementar que los sistemas enfriados por aire o por líquido, pero tiene capacidades de enfriamiento limitadas cuando se enfría a la temperatura del aire ambiente.



Figura 29. Enfriamiento por PCM.

Fuente: Warner, 2015.

4.3. Transferencia de calor

El calor se transporta o mueve básicamente a través de gradientes de temperatura; fluye o se transfiere de áreas de alta temperatura a áreas de baja temperatura. Comprender este proceso y sus diversos mecanismos requiere vincular la termodinámica y los principios de flujo de fluidos con los principios de transferencia de calor (Kreith et al., 2010).

4.3.1. Mecanismos o modos de transferencia de calor

Al diseñar un sistema de baterías, se deben considerar tres tipos de transferencia de calor: conducción, convección y radiación (ver **Figura 30**).

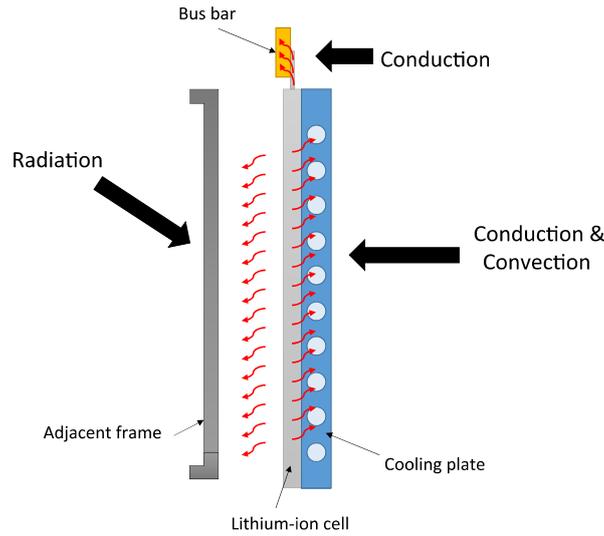


Figura 30. Mecanismos de transferencia de calor en una batería de iones de litio.

Fuente: Warner, 2015.

4.3.1.1 Conducción. “Se considera conducción a la transferencia de energía desde partículas de mayor energía a partículas de menor energía debido a la interacción de la materia” (Incropera, 1999).

En el caso simple de un flujo de calor unidimensional en estado estacionario a través de una pared plana, el gradiente de temperatura y el flujo de calor no cambian con el tiempo, y el área de la sección transversal a lo largo de la trayectoria del flujo de calor es la misma. Por lo tanto, la conducción de calor se da por la **Ecuación 5** (Kreith et al., 2010):

$$q_k = \frac{kA}{L} (T_{hot} - T_{cold}) = \frac{\Delta T}{\frac{L}{kA}}, \quad (5)$$

donde ΔT es la diferencia entre la temperatura más alta y la temperatura más baja, k es el coeficiente de conductividad térmica del material, A es el área de transferencia de calor, L es la longitud del sistema físico.

La relación entre el producto de longitud por área y el coeficiente de conductividad superficial se entiende como la resistencia térmica del material, como se muestra en la **Figura 31**, y se establece la **Ecuación 6** (Kreith et al., 2010).

$$R_k = \frac{\Delta T}{\frac{L}{kA}}. \quad (6)$$

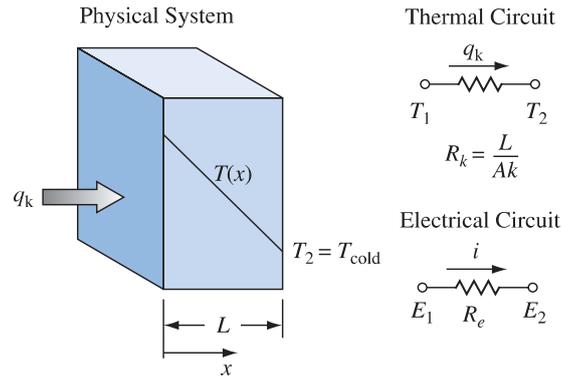


Figura 31. Distribución de temperatura en conducción a través de una pared plana con conductividad térmica constante y variable.

Fuente: Kreith et al., 2010.

4.3.1.2 Convección. La transferencia de calor por convección consta de dos mecanismos: transferencia de energía debido al movimiento molecular aleatorio (difusión) y transferencia de energía a través del movimiento de fluido macroscópico o en masa, que, en presencia de gradientes de temperatura inherentes, ayuda a la transferencia de calor. Dependiendo de la naturaleza del flujo, la transferencia de calor por convección se puede dividir en: convección forzada, donde el flujo es causado por un dispositivo externo como un ventilador, una bomba o el viento atmosférico; convección natural, donde el flujo es causado por una fuerza de presión causada por diferencias de densidad debido a cambios en la temperatura del fluido (ver **Figura 32**).

Independientemente de los detalles del proceso de transferencia de calor por convección, la **Ecuación 7** (Kreith et al., 2010) tiene la forma:

$$q_c = \bar{h}_c A \Delta T, \quad (7)$$

donde ΔT es la diferencia entre la temperatura superficial T_s y una temperatura del fluido T_∞ , \bar{h}_c es el coeficiente medio de transferencia de calor por convección, A es el área de transferencia de calor.

La resistencia térmica convectiva es la inversa del producto de área de los coeficientes de transferencia de calor por convección, **Ecuación 8** (Kreith et al., 2010).

$$R_c = \frac{1}{\bar{h}_c A} \quad (8)$$

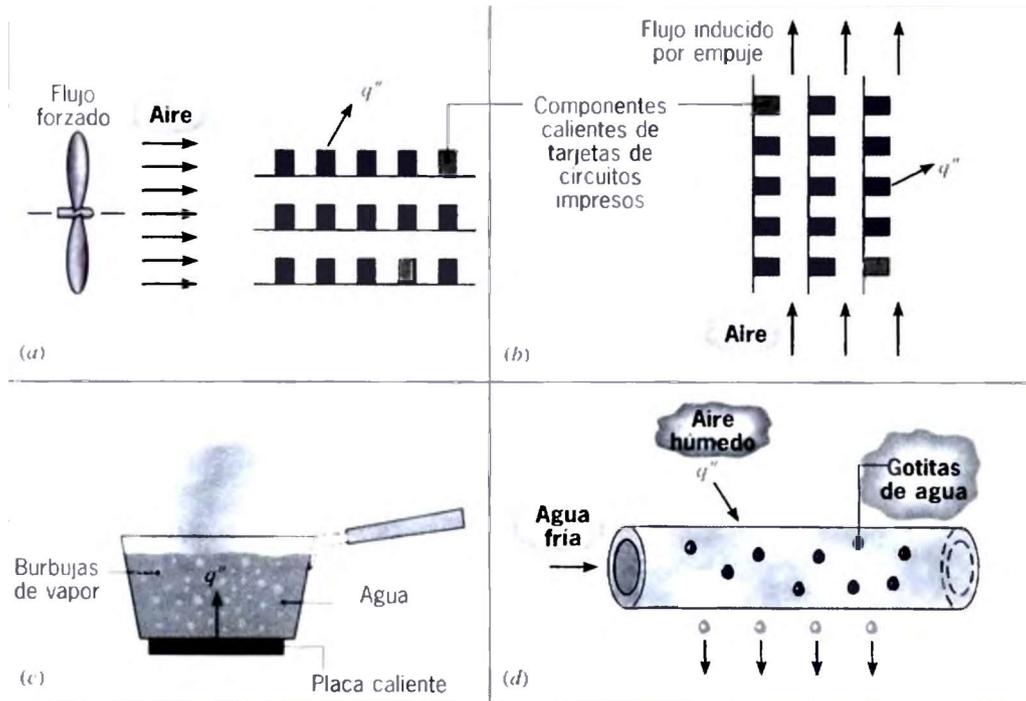


Figura 32. Procesos de transferencia de calor por convección. (a) Convección forzada. (b) Convección Natural. (c) Ebullición. (d) Condensación.

Fuente: Incropera, 1999.

4.3.1.3 Radiación. La radiación térmica es energía emitida por la materia a una temperatura limitada. Aunque nos hemos centrado en la radiación procedente de superficies sólidas, esta radiación también puede proceder de líquidos y gases. Independientemente de la forma de la materia, la radiación se puede atribuir a cambios en la configuración de los electrones que forman los átomos o las moléculas. La energía en el campo de radiación es transportada por ondas electromagnéticas (o fotones)(Incropera, 1999).

La energía que sale de la superficie en forma de calor radiante depende de la temperatura absoluta y de las propiedades de la superficie. Un radiador ideal (llamado cuerpo negro) emite energía radiativa desde su superficie a una velocidad dada por la **Ecuación 9** (Kreith et al., 2010):

$$q_r = \sigma A_1 T_1^4, \quad (9)$$

donde σ es una constante dimensional, A_1 es el área superficial, T_1 es la temperatura absoluta de la superficie.

El flujo de calor irradiado de una superficie real es menor que el flujo de calor de un cuerpo negro a la misma temperatura, como se indica en la **Ecuación 10** (Kreith et al., 2010):

$$q_r = \sigma \varepsilon A_1 T_1^4, \quad (10)$$

donde ε es una propiedad radiativa de la superficie denominada emisividad que toma

valores en el intervalo de $0 \leq \varepsilon \leq 1$.

La transferencia neta de calor radiativo requiere la diferencia de temperatura de la superficie entre los dos objetos, dada en la **Ecuación 11** (Kreith et al., 2010):

$$q_r = \sigma \varepsilon A_1 (T_1^4 - T_2^4) \quad (11)$$

4.3.2. Transferencia de calor en un cilindro

4.3.2.1 Conducción de calor en cilindro. La tasa de transferencia de calor hacia el interior de la tubería debe ser igual a la tasa de transferencia de calor hacia afuera de la tubería. En otras palabras, la transferencia de calor a través del tubo debe ser constante, $Q_{cond,cil} = constante$. Por lo tanto, la transferencia de calor conductivo en el cilindro está determinada por la **Ecuación 12** (Çengel & Ghajar, 2011):

$$Q_{cond,cil} = \frac{T_1 - T_2}{R_{cil}}, \quad (12)$$

siendo R_{cil} la resistencia térmica del material a la conducción del cilindro que se expresa:

$$R_{cil} = \frac{\ln \left(\frac{r_2}{r_1} \right)}{2\pi Lk}, \quad (13)$$

donde r_2 es el radio exterior del cilindro, r_1 es el radio interior del cilindro, L es la longitud radial, k es el coeficiente de conductividad del material (ver **Figura 33**).

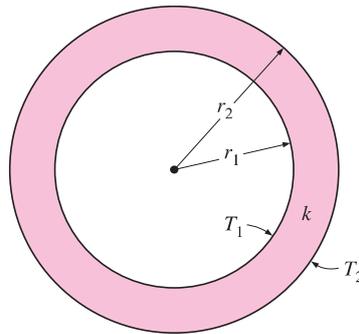


Figura 33. Tubo cilíndrico largo (o capa esférica) con temperaturas de las superficies interior y exterior, T_1 y T_2 , especificadas.

Fuente: Çengel y Ghajar, 2011.

Para un cilindro formado por varias capas se utiliza la **Ecuación 12** de acuerdo al número de capas (ver **Figura 34**).

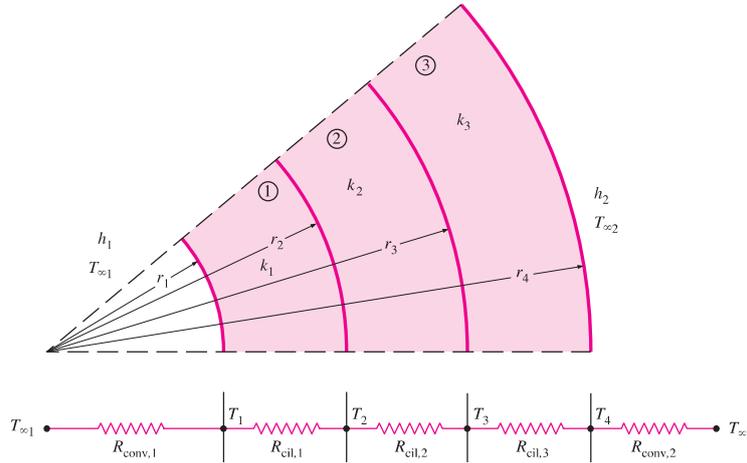


Figura 34. Red de resistencias térmicas para la transferencia de calor a través de un cilindro compuesto de tres capas sujeto a convección en ambos lados.

Fuente: Çengel y Ghajar, 2011.

4.3.2.2 Convección externa forzada en cilindro. El flujo cruzado en el cilindro se propaga alrededor del cilindro y forma una capa límite alrededor del cilindro (ver **Figura 35**). Cuando las partículas de fluido chocan con la superficie del cilindro en el punto de estancamiento, la presión aumenta y el flujo se detiene. La presión disminuye y la velocidad aumenta en la dirección del flujo.

La naturaleza del flujo alrededor del cilindro afecta el coeficiente de resistencia total C_D . La alta presión cerca del punto de estancamiento y la baja presión en el otro lado, a continuación, crean una fuerza neta sobre el cuerpo en la dirección del flujo.

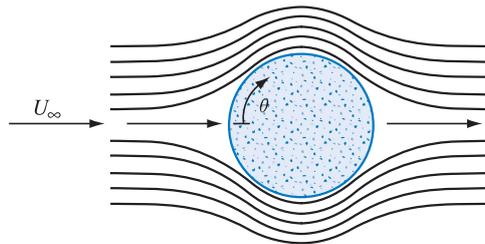


Figura 35. Líneas de corriente para flujo potencial sobre un cilindro circular.

Fuente: Kreith et al., 2010.

El número de Reynolds crítico para el flujo a través de un cilindro es $Re_c \simeq 2 \times 10^5$, es decir, la capa límite mantiene un flujo laminar cuando $Re \leq 2 \times 10^5$ y se vuelve flujo turbulento cuando $Re \geq 2 \times 10^5$.

El número de Reynolds se define como:

$$Re = Re_D = \frac{VD}{\nu}, \quad (14)$$

donde V es la velocidad uniforme del fluido al aproximarse al cilindro, D es el diámetro externo del cilindro, ν es la viscosidad cinemática.

El aumento de la rugosidad de la superficie puede reducir el coeficiente de arrastre de objetos no lineales como cilindros o esferas (ver **Figura 36**).

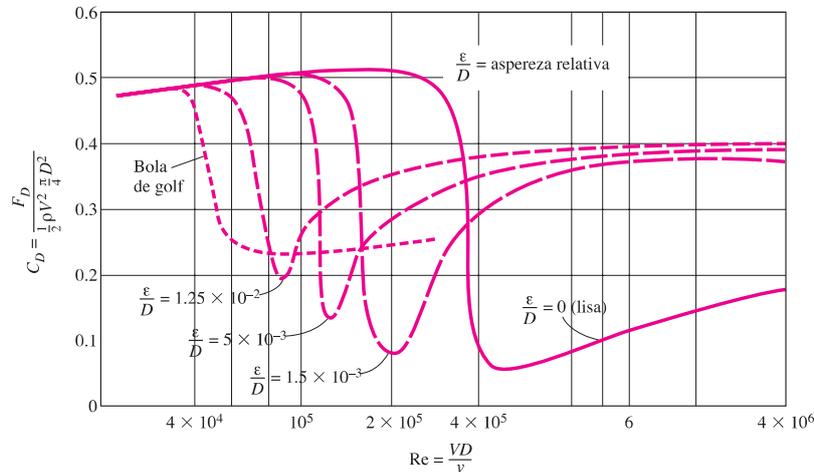


Figura 36. Efecto de la aspereza superficial sobre el coeficiente de resistencia de una esfera.

Fuente: Çengel y Ghajar, 2011.

Los patrones de flujo complejos alrededor del cilindro afectan la transferencia de calor. La **Figura 37** muestra el cambio del número de Nusselt local alrededor del cilindro bajo la influencia del cruce de aire. En todos los casos, el valor de Nu_θ comienza relativamente alto en el punto de estancamiento ($\theta = 0$) pero disminuye al aumentar θ debido al engrosamiento de la capa límite laminar.

El número de Nusselt promedio para los flujos alrededor de cilindros se puede expresar en forma compacta como (Çengel & Ghajar, 2011):

$$Nu_{cil} = \frac{hD}{k} = CRe^m Pr^n \quad (15)$$

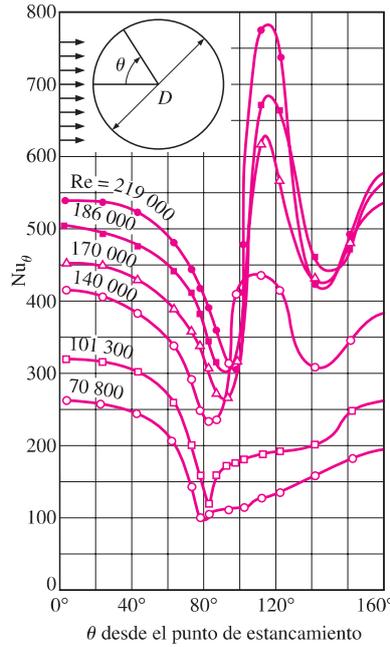


Figura 37. Variación del coeficiente de transferencia de calor local a lo largo de la circunferencia de un cilindro circular en flujo cruzado de aire.

Fuente: Çengel y Ghajar, 2011.

4.3.2.3 Convección natural en cilindro. La transferencia de calor por convección natural a una superficie depende de la geometría, la orientación, los cambios de temperatura de la superficie y las propiedades termofísicas de los fluidos involucrados. La superficie exterior de un cilindro vertical puede considerarse una placa vertical si el diámetro del cilindro es lo suficientemente grande como para que el efecto de la curvatura sea insignificante. Esta condición se cumple si

$$D \geq \frac{35L}{Gr_L^{\frac{1}{4}}} \quad (16)$$

El parámetro adimensional llamado número de Grashof se obtiene parencite (Çengel & Ghajar, 2011):

$$Gr_L \geq \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L_c^3}{\nu^2}, \quad (17)$$

donde g es la aceleración gravitacional, β es el coeficiente de expansión volumétrica, T_s es la temperatura superficial, T_∞ es la temperatura del fluido suficientemente lejos de la superficie, L_c es la longitud característica de la configuración geométrica, ν es la viscosidad cinemática del fluido.

4.3.3. Transferencia de calor en banco de tubos

4.3.3.1 Flujo cruzado en banco de tubos. Los tubos se pueden ajustar o desplazar según la dirección del flujo (**Figura 38**). La configuración de tubería en el banco se caracteriza por el paso transversal S_T , el paso longitudinal S_L y el paso diagonal S_D entre los centros de las tuberías. El tamaño del paso diagonal se determina (Çengel & Ghajar, 2011):

$$S_D = \sqrt{S_L^2 + \left(\frac{S_T}{2}\right)^2} \quad (18)$$

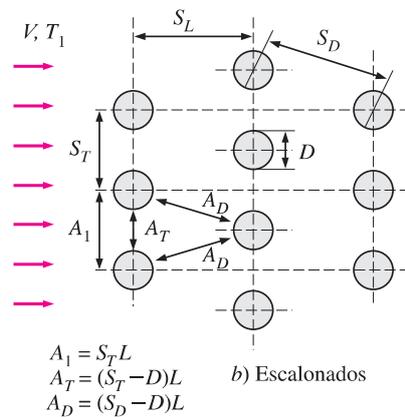
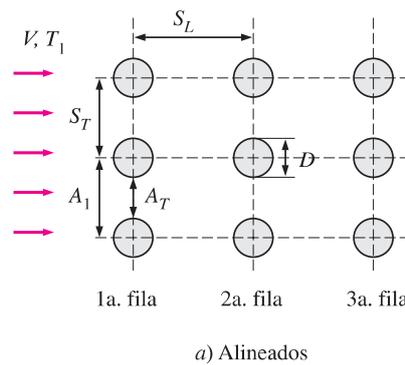


Figura 38. Configuración de los tubos en los bancos alineados o escalonados.

Fuente: Çengel y Ghajar, 2011.

Las características de flujo en un haz de tubos están determinadas por la velocidad máxima V_{max} en el haz de tubos, no por la velocidad de aproximación V . Por lo tanto, el número de Reynolds se define como una expresión para la velocidad máxima como se muestra en la **Ecuación 19**:

$$Re_D = \frac{\rho V_{max} D}{\mu} = \frac{V_{max} D}{\nu}, \quad (19)$$

donde ρ es la densidad del fluido, D es el diámetro exterior del tubo, μ es la viscosidad dinámica del fluido, ν es la viscosidad cinemática del fluido.

La velocidad máxima está determinada por los requisitos de conservación de masa para un flujo estable e incompresible. Las velocidades máximas para las configuraciones alineada y desplazada vienen dadas por las **Ecuaciones** 20 y 21, respectivamente (Çengel & Ghajar, 2011):

$$V_{max} = \frac{S_T}{(S_T - D)}V \quad (20)$$

$$V_{max} = \frac{S_T}{2(S_D - D)}V \quad (21)$$

Se tiene interés en el coeficiente promedio de transferencia de calor de todo el banco de tubos, que depende del número de filas en la dirección del flujo y de la configuración y tamaño de los tubos. Se han propuesto varias correlaciones basadas en datos experimentales para el número de Nusselt promedio de flujo transversal sobre los bancos de tubos. Recientemente, Zukauskas propuso una relación cuya forma general es

$$\text{Nu}_{cil} = \frac{hD}{k} = C\text{Re}^m\text{Pr}^n \left(\frac{\text{Pr}}{\text{Pr}_S} \right)^{0.25}, \quad (22)$$

donde los valores de las constantes C, m y n dependen del valor del número de Reynolds.

Tabla 3. Correlaciones del número de Nusselt para flujo cruzado sobre bancos de tubos, para $N_L > 16$ y $0.7 < \text{Pr} < 500$ (tomado de Zukauskas, 1987).

Configuración	Rango de Re_D	Correlación
Alineados	0 – 100	$\text{Nu}_D = 0.9\text{Re}_D^{0.4}\text{Pr}^{0.36} \left(\frac{\text{Pr}}{\text{Pr}_S} \right)^{0.25}$
	100 – 1000	$\text{Nu}_D = 0.52\text{Re}_D^{0.5}\text{Pr}^{0.36} \left(\frac{\text{Pr}}{\text{Pr}_S} \right)^{0.25}$
	1000 – 2×10^5	$\text{Nu}_D = 0.27\text{Re}_D^{0.63}\text{Pr}^{0.36} \left(\frac{\text{Pr}}{\text{Pr}_S} \right)^{0.25}$
Escalonados	$2 \times 10^5 - 2 \times 10^6$	$\text{Nu}_D = 0.033\text{Re}_D^{0.8}\text{Pr}^{0.4} \left(\frac{\text{Pr}}{\text{Pr}_S} \right)^{0.25}$
	0 – 500	$\text{Nu}_D = 1.04\text{Re}_D^{0.4}\text{Pr}^{0.36} \left(\frac{\text{Pr}}{\text{Pr}_S} \right)^{0.25}$
	500 – 1000	$\text{Nu}_D = 0.71\text{Re}_D^{0.5}\text{Pr}^{0.36} \left(\frac{\text{Pr}}{\text{Pr}_S} \right)^{0.25}$
	1000 – 2×10^5	$\text{Nu}_D = 0.35 \left(\frac{S_T}{S_L} \right)^{0.2} \text{Re}_D^{0.6}\text{Pr}^{0.36} \left(\frac{\text{Pr}}{\text{Pr}_S} \right)^{0.25}$
	$2 \times 10^5 - 2 \times 10^6$	$\text{Nu}_D = 0.031 \left(\frac{S_T}{S_L} \right)^{0.2} \text{Re}_D^{0.8}\text{Pr}^{0.36} \left(\frac{\text{Pr}}{\text{Pr}_S} \right)^{0.25}$

Fuente: Çengel y Ghajar, 2011.

Nota: Todas las propiedades, excepto Pr_S , se deben evaluar a la media aritmética de las temperaturas de admisión y de salida del fluido (Pr_S se debe evaluar a T_s).

Tabla 4. Factor de corrección F que debe usarse en $Nu_{D,N_L < 16} = F Nu_D$ para $N_L > 16$ y $Re_D > 1000$ (tomado de Zukauskas, 1987).

N_L	1	2	3	4	5	7	10	13
Alineados	0.70	0.80	0.86	0.90	0.93	0.96	0.98	0.99
Escalonados	0.64	0.76	0.84	0.89	0.93	0.96	0.98	0.99

Fuente: Çengel y Ghajar, 2011.

Para la temperatura de salida del fluido T_e se puede determinar a partir de la **Ecuación 23** (Çengel & Ghajar, 2011):

$$T_e = T_s - (T_s - T_i) \exp\left(-\frac{A_s h}{\dot{m} C_p}\right), \quad (23)$$

donde A_s es el área superficial de transferencia de calor y \dot{m} es el gasto de masa del fluido que se obtienen de las **Ecuaciones 24** y **25** (Çengel & Ghajar, 2011) respectivamente.

$$A_s = N\pi DL \quad (24)$$

$$\dot{m} = \rho V (N_T S_T L) \quad (25)$$

Aquí, N es el número total de tubos en el banco, N_T es el número de tubos en un plano transversal, y N_L es el número de filas en la dirección de flujo, L es la longitud de los tubos y V es la velocidad del fluido justo antes de entrar en el banco de tubos. La tasa de transferencia de calor puede entonces determinarse según la **Ecuación 26**.

$$\dot{Q} = h A_s \Delta T_{lm} = \dot{m} C_p (T_e - T_i) \quad (26)$$

4.4. Dinámica computacional de fluidos (CFD)

4.4.1. Concepto, aplicaciones y programas comerciales CFD

“CFD (Dinámica de Fluidos Computacional) es un conjunto de métodos numéricos utilizados para obtener soluciones aproximadas a problemas de dinámica de fluidos y transferencia de calor” (Zikanov, 2010).

Se puede utilizar para comprender los eventos o procesos físicos que ocurren en el flujo del fluido alrededor y dentro del objeto de estudio. Estos eventos están estrechamente relacionados con los efectos e interacciones de la dispersión, la difusión, la convección, la capa límite y los fenómenos relacionados con la turbulencia. Algunas de las mejores herramientas de análisis de CFD del mercado incluyen: Autodesk CFD, Ansys, CFD Module de Comsol: Es un módulo Comsol Multiphysics, Altair y SOLIDWORKS

4.4.2. Método de volúmenes finitos

El método del volumen finito discretiza directamente la forma integral de la ecuación de conservación en el espacio físico. El dominio computacional se divide en un número finito de volúmenes de control consecutivos, donde las declaraciones resultantes expresan la preservación exacta de las propiedades respectivas de cada volumen de control. En el centro de masa de cada volumen de control se calcula el valor de la variable. La interpolación se utiliza para representar los valores de las variables en la superficie del volumen de control en términos de valores centrales, y se utilizan fórmulas cuadráticas apropiadas para aproximar integrales de superficie y volumen. Para cada volumen de control se puede obtener una ecuación algebraica que muestra los múltiples valores de los nodos adyacentes.

Dado que el método de volúmenes finitos funciona sobre volúmenes de control y no sobre intersecciones de mallas, se puede adaptar a cualquier tipo de malla, como se muestra en la **Figura 39**.

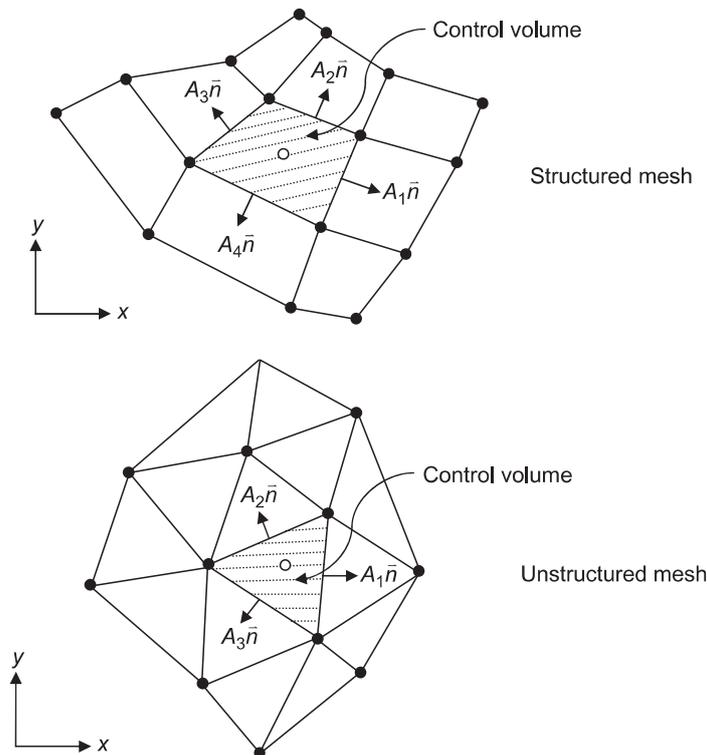


Figura 39. Una representación de malla estructurada y no estructurada para el método de volumen finito (los símbolos completos denotan vértices de elementos y los símbolos abiertos en el centro de los volúmenes de control denotan nodos computacionales)

Fuente: Yeoh et al., 2018.

Una característica importante de este método es la posibilidad de utilizar una malla tipo elementos finitos, que puede estar formada por una combinación de triángulos o cuadrados en el caso de dos dimensiones, o una combinación de tetraedros y hexágonos en el caso de

tres dimensiones. Este tipo de malla no estructurada proporciona más flexibilidad para manejar geometrías complejas. Otra característica atractiva es que este método no requiere la transformación de las ecuaciones según el sistema de coordenadas correspondiente al cuerpo, como ocurre con el método de diferencias finitas.

Al igual que con el método de diferencias finitas, primero se debe definir una cuadrícula numérica para discretizar el dominio de flujo físico de interés. Para los métodos acotados por volumen, ahora tenemos la flexibilidad de representar la red utilizando mallas estructuradas o no estructuradas.

Al aplicar el teorema de la divergencia de Gauss a la integral de volumen, la derivada de primer orden de ϕ en dos dimensiones se puede aproximar a la **Ecuación 27**.

$$\left(\frac{\partial\phi}{\partial x}\right) = \frac{1}{\Delta V} \int_V \frac{\partial\phi}{\partial x} dV = \frac{1}{\Delta V} \int_V \phi dA^x \approx \frac{1}{\Delta V} \sum_{i=1}^N \phi_i dA_i^x, \quad (27)$$

donde ϕ_i son los valores variables en las superficies elementales y N denota el número de superficies límite en el volumen elemental. La derivada de primer orden para en la dirección y se obtiene exactamente de la misma manera, que se puede escribir como la **Ecuación 28**.

$$\left(\frac{\partial\phi}{\partial y}\right) = \frac{1}{\Delta V} \int_V \frac{\partial\phi}{\partial y} dV = \frac{1}{\Delta V} \int_V \phi dA^y \approx \frac{1}{\Delta V} \sum_{i=1}^N \phi_i dA_i^y \quad (28)$$

4.4.3. Método de elementos finitos

En muchos sentidos, el método de los elementos finitos es similar al método del volumen finito. Tanto el método de elementos finitos como el de volumen finito son adecuados para dominios computacionales irregulares, lo que significa que pueden acomodar geometrías complejas. Sin embargo, un rasgo característico del método de elementos finitos es que las ecuaciones gobernantes se aproximan primero multiplicando por las llamadas funciones de forma y luego se integran en todo el dominio computacional. Para un dominio dividido en un conjunto finito de elementos, las variables universales pueden aproximarse mediante la **Ecuación 29**:

$$\phi = \sum_{j=1}^n \phi_j \psi_j(x, y, z), \quad (29)$$

donde n representa el número de incógnitas nodales discretas ϕ_j y $\psi_j(x, y, z)$ son las funciones de forma. Como guía general, el uso de funciones de forma lineal genera soluciones de aproximadamente la misma precisión que las del método de diferencias finitas de segundo orden. Luego, esta aproximación se sustituye en la integral del residuo ponderado sobre

el dominio de cálculo que se toma como igual a cero, como se observa en la **Ecuación 30**.

$$\int \int \int W_m(x, y, z) R dx dy dz = 0, \quad (30)$$

donde R se conoce como el residuo de la Ecuación, mientras que W_m representa las funciones de peso.

4.4.4. Ecuaciones gobernantes CFD

La CFD se basa esencialmente en las ecuaciones fundamentales de la dinámica de fluidos, que son formulaciones matemáticas de las leyes de conservación de la física. Por lo tanto, debemos comenzar nuestra comprensión con una descripción muy básica de los procesos de flujo de fluidos y el significado e importancia de cada término en ellos.

4.4.4.1 Continuidad. Una ley de conservación que es pertinente para el flujo de fluidos es que la materia no puede crearse ni destruirse. Considere un volumen de control arbitrario V fijo en el espacio y el tiempo en la **Figura 40**.

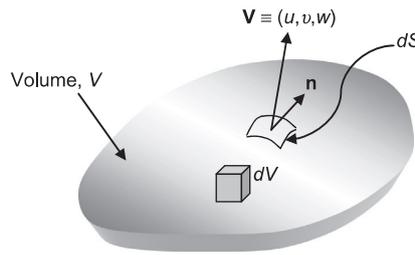


Figura 40. Volumen de control finito fijo en el espacio.

Fuente: Yeoh et al., 2018.

El fluido se mueve a través del volumen de control fijo, fluyendo a través de la superficie de control. La conservación de masa requiere que la tasa de cambio de masa dentro del volumen de control sea equivalente al flujo de masa que atraviesa la superficie S del volumen V . La **Ecuación 31** muestra la forma integral,

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho dV = - \int_S \rho V \cdot n dS, \quad (31)$$

donde n es el vector unitario normal. Podemos aplicar el teorema de la divergencia de Gauss que iguala la integral de volumen de una divergencia de un vector en una integral de área sobre la superficie que define el volumen. Esto se declara como

$$\int_V \text{div} \rho V dV = - \int_S \rho V \cdot n dS \quad (32)$$

Usando el teorema anterior, la integral de superficie en la **Ecuación 31** puede ser reem-

plazado por una integral de volumen, por lo tanto, se convierte en la **Ecuación 33**:

$$\int_V \left[\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho V) \right] dV = 0, \quad (33)$$

donde $\nabla(\rho V) = \text{div} \rho V$. Dado que la **Ecuación 33** es válida para cualquier tamaño de volumen V , la implicación es que

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho V) = 0 \quad (34)$$

La **Ecuación 34** es la conservación de la masa. En el sistema de coordenadas cartesianas, se puede expresar como la **Ecuación 35**:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0, \quad (35)$$

donde la velocidad del fluido V en cualquier punto del campo de flujo se describe mediante las componentes locales de velocidad u , v y w , que son, en general, funciones de ubicación (x, y, z) y tiempo (t) .

4.4.4.2 Momento. La segunda ley del movimiento de Newton establece que la suma de las fuerzas que actúan sobre el elemento fluido, como se ilustra en la **Figura 41**, es igual al producto entre su masa y la aceleración del elemento.

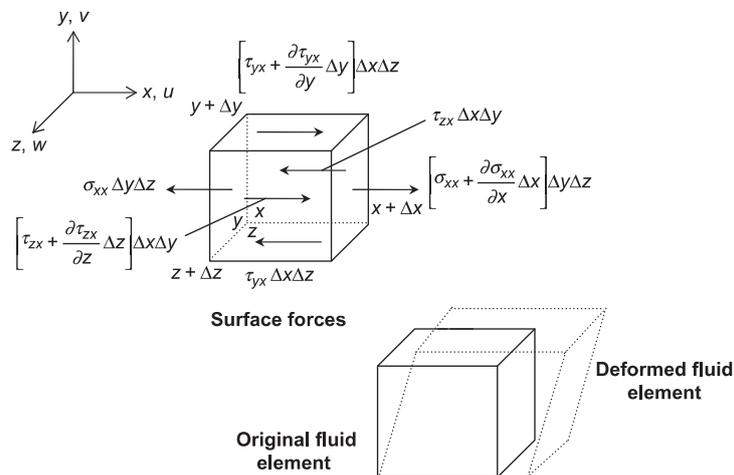


Figura 41. Fuerzas superficiales que actúan sobre el volumen de control infinitesimal para la componente de velocidad u . Elemento fluido deformado por la acción de las fuerzas superficiales.

Fuente: Yeoh et al., 2018.

Hay esencialmente tres relaciones escalares a lo largo de las direcciones x , y y z del marco cartesiano cuya ley fundamental puede ser invocada. Comenzamos considerando la

componente x de la segunda ley de Newton,

$$\sum F_x = ma_x, \quad (36)$$

donde F_x y a_x son la fuerza y la aceleración a lo largo de la dirección x . El eje de aceleración en el lado derecho de la **Ecuación 36** es simplemente el cambio de tasa de tiempo de u , que está dado por la derivada sustancial. De este modo,

$$a_x = \frac{Du}{Dt} \quad (37)$$

Recordando que la masa del elemento fluido m es $\rho\Delta x\Delta y\Delta z$, la tasa del aumento de la cantidad de movimiento x es

$$a_x = \frac{Du}{Dt} \quad (38)$$

Combinando la suma de estas fuerzas superficiales en el elemento fluido y el cambio de tasa de tiempo de u de la **Ecuación 38** en la **Ecuación 36**, la Ecuación de la cantidad de movimiento x, y, z se convierte en

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + \sum F_x \quad (39)$$

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + \sum F_y \quad (40)$$

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + \sum F_z \quad (41)$$

Los esfuerzos normales σ_{xx} , σ_{yy} y σ_{zz} se deben a la combinación de la presión p y los componentes de esfuerzo viscoso normal τ_{xx} , τ_{yy} y τ_{zz} que actúan perpendicularmente al volumen de control.

Con base en el concepto de derivado sustancial, la forma conservativa de las **Ecuaciones 39, 40 y 41** se pueden reescribir como

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uu)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vu)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho wu)}{\partial z} = \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + \sum F_x \quad (42)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho wv)}{\partial z} = \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + \sum F_y \quad (43)$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho ww)}{\partial z} = \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + \sum F_z \quad (44)$$

4.4.4.3 Energía. La ecuación para la conservación de la energía se deriva de la consideración de la primera ley de la termodinámica:

$$\text{Tasa de tiempo de cambio de energía} = \sum \dot{Q} + \sum \dot{W}, \quad (45)$$

donde $\sum \dot{Q}$ es la tasa neta de calor añadido, $\sum \dot{W}$ es la tasa neta de trabajo realizado.

La tasa de cambio en el tiempo de cualquier propiedad variable arbitraria ϕ se define como el producto entre la densidad y la derivada sustancial de ϕ . La tasa de cambio de energía en el tiempo para el elemento de fluido en movimiento es simplemente

$$\rho \frac{DE}{Dt} \Delta x \Delta y \Delta z \quad (46)$$

Los dos términos representados por $\sum \dot{Q}$ y $\sum \dot{W}$ describen la tasa neta de adición de calor al fluido dentro del volumen de control y la tasa neta de trabajo realizado por las fuerzas superficiales sobre el fluido.

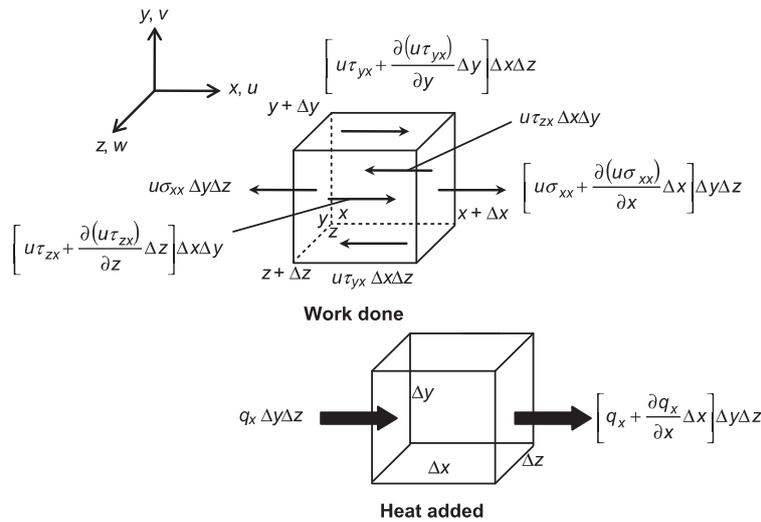


Figura 42. Trabajo realizado por fuerzas superficiales sobre el fluido y calor agregado al fluido dentro del volumen de control infinitesimal. Solo se muestran los flujos en la dirección x .

Fuente: Yeoh et al., 2018.

La tasa de trabajo realizado y calor agregado en las direcciones y y z se sigue automáticamente del análisis de la dirección x (ver **Figura 42**). La tasa de trabajo realizado sobre el volumen de control en la dirección x es equivalente al producto entre las fuerzas superficiales (causadas por la tensión viscosa normal σ_{xx} y las tensiones viscosas tangenciales τ_{yx} y τ_{zx}) con la componente de velocidad u .

Cuando combinamos todas las contribuciones de las fuerzas superficiales en las direc-

ciones x , y y z y reemplazamos estas expresiones junto con la tasa de cambio de energía E en el tiempo, de la **Ecuación 46** en la **Ecuación 45**, la forma no conservativa de la Ecuación para la conservación de la energía se da como

$$\begin{aligned} \rho \frac{DE}{Dt} = & \frac{\partial (u\sigma_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial (v\sigma_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial (w\sigma_{zz})}{\partial z} + \frac{\partial (u\tau_{yx})}{\partial y} + \frac{\partial (u\tau_{zx})}{\partial z} + \frac{\partial (v\tau_{xy})}{\partial x} \\ & + \frac{\partial (v\tau_{zy})}{\partial z} + \frac{\partial (w\tau_{xz})}{\partial x} + \frac{\partial (w\tau_{yz})}{\partial y} - \frac{\partial q_x}{\partial x} - \frac{\partial q_y}{\partial y} - \frac{\partial q_z}{\partial z} \end{aligned} \quad (47)$$

Los flujos de energía q_x , q_y y q_z se formulan aplicando la ley de conducción de calor de Fourier que relaciona el flujo de calor con el gradiente de temperatura local:

$$q_x = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x}, q_y = -\lambda \frac{\partial T}{\partial y}, q_z = -\lambda \frac{\partial T}{\partial z}, \quad (48)$$

donde λ es la conductividad térmica. Sustituyendo la **Ecuación 48** en la **Ecuación 47** se obtiene

$$\rho \frac{DE}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right] - \frac{\partial (up)}{\partial x} - \frac{\partial (vp)}{\partial y} - \frac{\partial (wp)}{\partial z} + \Phi \quad (49)$$

Los efectos debidos a las tensiones viscosas en la **Ecuación 49** se describen mediante la función de disipación Φ que se puede demostrar que es

$$\begin{aligned} \Phi = & \frac{\partial (u\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial (u\tau_{yx})}{\partial y} + \frac{\partial (u\tau_{zx})}{\partial z} + \frac{\partial (v\tau_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial (v\tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial (v\tau_{zy})}{\partial z} \\ & + \frac{\partial (w\tau_{xz})}{\partial x} + \frac{\partial (w\tau_{yz})}{\partial y} + \frac{\partial (w\tau_{zz})}{\partial z} \end{aligned} \quad (50)$$

Con base en el concepto de derivado sustancial, la forma conservativa de la Ecuación de la energía se puede reescribir como

$$\begin{aligned} \frac{\partial (\rho E)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u E)}{\partial x} + \frac{\partial (\rho v E)}{\partial y} + \frac{\partial (\rho w E)}{\partial z} = & \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right] \\ & - \frac{\partial (up)}{\partial x} - \frac{\partial (vp)}{\partial y} - \frac{\partial (wp)}{\partial z} + \Phi \end{aligned} \quad (51)$$

La **Ecuación 51** se reorganiza para dar una ecuación para la entalpía, que se puede escribir en la forma de

$$\frac{\partial (\rho h)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u h)}{\partial x} + \frac{\partial (\rho v h)}{\partial y} + \frac{\partial (\rho w h)}{\partial z} = \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right] + \Phi \quad (52)$$

Para un flujo comprimible bidimensional, la Ecuación para la conservación de energía puede reducirse a

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u h)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v h)}{\partial y} = \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right] + \Phi \quad (53)$$

Según la definición de entalpía, h se puede reducir a $C_p T$, donde C_p es el calor específico y se supone que es constante. Siendo la temperatura invariable a lo largo de la dirección z y la conductividad térmica λ constante, la Ecuación para la conservación de energía en dos dimensiones para un flujo incompresible se puede expresar como

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{\lambda}{\rho C_p} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\lambda}{\rho C_p} \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \quad (54)$$

4.4.5. Modelos de turbulencia

La turbulencia está relacionada con la aparición de fluctuaciones aleatorias en el fluido. Este comportamiento se puede ilustrar mediante una medición típica de la velocidad puntual versus el tiempo en un flujo turbulento que se muestra en la **Figura 43** (Yeoh et al., 2018).

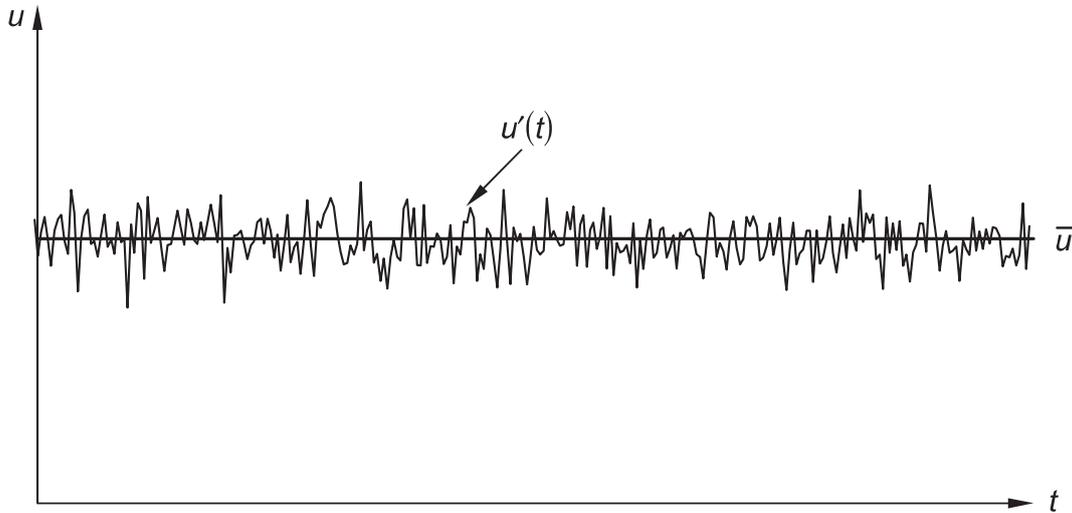


Figura 43. Velocidad que fluctúa con el tiempo en algún punto de un flujo turbulento.

Fuente: Yeoh et al., 2018.

La aparición de un flujo turbulento depende de la relación entre la fuerza de inercia y la fuerza viscosa, expresada como número de Reynolds. La visualización de flujos turbulentos muestra estructuras de flujo giratorias, llamadas remolinos turbulentos, con una amplia gama de escalas de longitud y velocidad, llamadas escalas de turbulencia. Los remolinos más grandes tienen velocidades y longitudes características similares a las escalas

de velocidad y longitud del flujo medio.

4.4.5.1 Modelo de turbulencia de dos ecuaciones $k - \epsilon$ Para este modelo es necesario obtener valores promedio aplicables a las ecuaciones de continuidad compresible bidimensional y a los modos de energía y momento conservados, dando ecuaciones gobernantes promediadas en el tiempo, más conocidas como ecuación de promedio de Reynolds de Navier-Stokes (RAEN).

$$\frac{\partial(\rho)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho\bar{u})}{\partial x} + \frac{\partial(\rho\bar{v})}{\partial y} = 0 \quad (55)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho\bar{u})}{\partial t} + \frac{\partial(\rho\bar{u}u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho\bar{v}u)}{\partial y} = & -\frac{\partial\bar{p}}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial\bar{u}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial\bar{u}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \frac{\partial\bar{u}}{\partial x} \right] \\ & + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \frac{\partial\bar{v}}{\partial x} \right] - \left[\frac{\partial(\rho\bar{u}'u')}{\partial x} + \frac{\partial(\rho\bar{v}'v')}{\partial y} \right] \end{aligned} \quad (56)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho\bar{v})}{\partial t} + \frac{\partial(\rho\bar{u}\bar{v})}{\partial x} + \frac{\partial(\rho\bar{v}\bar{v})}{\partial y} = & -\frac{\partial\bar{p}}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial\bar{v}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial\bar{v}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \frac{\partial\bar{u}}{\partial y} \right] \\ & + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \frac{\partial\bar{v}}{\partial y} \right] - \left[\frac{\partial(\rho\bar{u}'v')}{\partial x} + \frac{\partial(\rho\bar{v}'v')}{\partial y} \right] \end{aligned} \quad (57)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho\bar{T})}{\partial t} + \frac{\partial(\rho\bar{u}\bar{T})}{\partial x} + \frac{\partial(\rho\bar{v}\bar{T})}{\partial y} = & \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{k}{C_p} \frac{\partial\bar{T}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{k}{C_p} \frac{\partial\bar{T}}{\partial y} \right) \\ & - \left[\frac{\partial(\rho\bar{u}'\bar{T}')}{\partial x} + \frac{\partial(\rho\bar{v}'\bar{T}')}{\partial y} \right], \end{aligned} \quad (58)$$

donde \bar{u} , \bar{v} , \bar{p} y \bar{T} son valores medios y \bar{u}' , \bar{v}' , \bar{p}' y \bar{T}' son fluctuaciones turbulentas.

Las ecuaciones anteriores son similares a las formuladas para flujos laminares, excepto por la presencia de términos adicionales de la forma $\overline{a'b'}$.

Como resultado, tenemos tres incógnitas adicionales (en tres dimensiones, tendremos nueve incógnitas adicionales), conocidas como tensiones de Reynolds, en las ecuaciones de cantidad de movimiento promediadas en el tiempo. Para las ecuaciones bidimensionales incompresibles de continuidad y las formas no conservativas de cantidad de movimiento y energía, las ecuaciones gobernantes promediadas en el tiempo se pueden expresar como

$$\frac{\partial\bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial\bar{v}}{\partial y} = 0 \quad (59)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\bar{u})}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{u}u)}{\partial x} + \frac{\partial(\bar{v}u)}{\partial y} = & -\frac{1}{\rho} \frac{\partial\bar{p}}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu \frac{\partial\bar{u}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu \frac{\partial\bar{u}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left[\nu \frac{\partial\bar{u}}{\partial x} \right] \\ & + \frac{\partial}{\partial y} \left[\nu \frac{\partial\bar{v}}{\partial x} \right] - \left[\frac{\partial(\bar{u}'u')}{\partial x} + \frac{\partial(\bar{u}'v')}{\partial y} \right] \end{aligned} \quad (60)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{u}\bar{v})}{\partial x} + \frac{\partial (\bar{v}\bar{v})}{\partial y} = & -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left[\nu \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \right] \\ & + \frac{\partial}{\partial y} \left[\nu \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} \right] - \left[\frac{\partial (\bar{u}'\bar{v}')}{\partial x} + \frac{\partial (\bar{v}'\bar{v}')}{\partial y} \right] \end{aligned} \quad (61)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{T}}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{u}\bar{T})}{\partial x} + \frac{\partial (\bar{v}\bar{T})}{\partial y} = & \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{k}{\rho C_p} \frac{\partial \bar{T}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{k}{\rho C_p} \frac{\partial \bar{T}}{\partial y} \right) \\ & - \left[\frac{\partial (\bar{u}'\bar{T}')}{\partial x} + \frac{\partial (\bar{v}'\bar{T}')}{\partial y} \right], \end{aligned} \quad (62)$$

donde el término $\frac{k}{\rho C_p}$ en la **Ecuación** 62 es la difusividad térmica α del fluido.

Las ecuaciones promediadas en el tiempo se pueden resolver si las tensiones de Reynolds y los términos de transporte de temperatura extra se pueden relacionar con el flujo medio y las cantidades de calor. Boussinesq (1868) propuso que las tensiones de Reynolds podrían vincularse a las tasas medias de deformación. Se obtiene la **Ecuación** 63:

$$\begin{aligned} -\overline{\rho u' u'} = 2\mu_T \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} - \frac{2}{3}\rho k; \quad -\overline{\rho v' v'} = 2\mu_T \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} - \frac{2}{3}\rho k; \\ -\overline{\rho u' v'} = \mu_T \left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \right) \end{aligned} \quad (63)$$

El lado derecho es análogo a la ley de viscosidad de Newton, excepto por la aparición de la viscosidad turbulenta o de remolino μ_T y la energía cinética turbulenta k . El transporte turbulento de temperatura se considera proporcional al gradiente del valor medio de la cantidad transportada. Es decir,

$$-\overline{\rho u' T'} = \Gamma_T \frac{\partial \bar{T}}{\partial x}; \quad -\overline{\rho v' T'} = \Gamma_T \frac{\partial \bar{T}}{\partial y}, \quad (64)$$

donde Γ_T es la difusividad turbulenta. Dado que el transporte turbulento de cantidad de movimiento y calor se debe a los mismos mecanismos (mezcla de remolinos), el valor de la viscosidad turbulenta puede considerarse cercano al de la viscosidad turbulenta μ_T . Basándonos en la definición del número turbulento de Prandtl Pr_T , obtenemos

$$Pr_T = \frac{\mu_T}{\Gamma_T}, \quad (65)$$

La mayoría de los procedimientos de CFD asumen que este es el caso y usan valores de Pr_T alrededor de la unidad. Dado que la complejidad de la turbulencia en la mayoría de los problemas de ingeniería de flujo impide el uso de fórmulas simples, es posible desarrollar ecuaciones de transporte similares para acomodar la cantidad turbulenta k y otras cantidades turbulentas, una de las cuales es la tasa de disipación de la energía turbulenta ϵ . Aquí, indicamos la forma de un modelo típico de turbulencia de dos ecuaciones que se

usa comúnmente para manejar muchos problemas de ingeniería de fluidos turbulentos, el modelo $k - \epsilon$ estándar de Launder y Spalding (1974).

La energía cinética turbulenta k y la tasa de disipación de la energía turbulenta ϵ se pueden definir y expresar en notación de tensor cartesiano como

$$k = \frac{1}{2} u'_i u'_i y \epsilon = \nu_T \overline{\left(\frac{\partial u'_i}{\partial x_j} \right) \left(\frac{\partial u'_i}{\partial x_j} \right)} \quad \text{donde } i, j = 1, 2, 3 \quad (66)$$

A partir de los valores locales de k y ϵ , se puede evaluar una viscosidad turbulenta local μ_T como:

$$\mu_T = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (67)$$

Y la viscosidad cinemática turbulenta o de remolino se denota por $\nu_T = \frac{\mu_T}{\rho}$.

Al sustituir las expresiones de tensión de Reynolds en las **Ecuaciones** 56, 57, 60 y 61 y los términos adicionales de transporte de temperatura en las **Ecuaciones** 58 y 62, eliminando la barra superior que indica por defecto el promedio cantidades, obtenemos la forma compresible de las ecuaciones gobernantes como

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial (\rho v)}{\partial y} = 0 \quad (68)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial (\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u u)}{\partial x} + \frac{\partial (\rho v u)}{\partial y} = & - \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left[(\mu + \mu_T) \frac{\partial u}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[(\mu + \mu_T) \frac{\partial u}{\partial y} \right] \\ & + \frac{\partial}{\partial x} \left[(\mu + \mu_T) \frac{\partial u}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[(\mu + \mu_T) \frac{\partial v}{\partial x} \right] \end{aligned} \quad (69)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial (\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u v)}{\partial x} + \frac{\partial (\rho v v)}{\partial y} = & - \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left[(\mu + \mu_T) \frac{\partial v}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[(\mu + \mu_T) \frac{\partial v}{\partial y} \right] \\ & + \frac{\partial}{\partial x} \left[(\mu + \mu_T) \frac{\partial u}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[(\mu + \mu_T) \frac{\partial v}{\partial y} \right] \end{aligned} \quad (70)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial (\rho T)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u T)}{\partial x} + \frac{\partial (\rho v T)}{\partial y} = & \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\frac{\mu}{Pr} + \frac{\mu_T}{Pr_T} \right) \frac{\partial T}{\partial x} \right] \\ & \frac{\partial}{\partial y} \left[\left(\frac{\mu}{Pr} + \frac{\mu_T}{Pr_T} \right) \frac{\partial T}{\partial y} \right] \end{aligned} \quad (71)$$

y la forma incompresible de las ecuaciones de gobierno como

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (72)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial (uu)}{\partial x} + \frac{\partial (vu)}{\partial y} = & -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left[(\nu + \nu_T) \frac{\partial u}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[(\nu + \nu_T) \frac{\partial u}{\partial y} \right] \\ & + \frac{\partial}{\partial x} \left[(\nu + \nu_T) \frac{\partial u}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[(\nu + \nu_T) \frac{\partial v}{\partial x} \right] \end{aligned} \quad (73)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial (uv)}{\partial x} + \frac{\partial (vv)}{\partial y} = & -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left[(\nu + \nu_T) \frac{\partial v}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[(\nu + \nu_T) \frac{\partial v}{\partial y} \right] \\ & + \frac{\partial}{\partial x} \left[(\nu + \nu_T) \frac{\partial u}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[(\nu + \nu_T) \frac{\partial v}{\partial y} \right] \end{aligned} \quad (74)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial (uT)}{\partial x} + \frac{\partial (vT)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\frac{\nu}{Pr} + \frac{\nu_T}{Pr_T} \right) \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\left(\frac{\nu}{Pr} + \frac{\nu_T}{Pr_T} \right) \frac{\partial T}{\partial y} \right] \quad (75)$$

El término $\frac{\nu}{Pr}$ que aparece en la **Ecuación** 75 se obtiene de la definición del número de Prandtl laminar que ya está definido como $Pr_T = \frac{\mu}{\alpha}$ donde $\alpha = \frac{k}{\rho C_p}$.

Las ecuaciones diferenciales de transporte adicionales que se requieren para el modelo $k - \epsilon$ estándar, para el caso de una propiedad de fluido variable en forma conservativa, están dadas por

$$\frac{\partial (\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho uk)}{\partial x} + \frac{\partial (\rho vk)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\mu_T}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\mu_T}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial y} \right) + P - D \quad (76)$$

$$\frac{\partial (\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u \epsilon)}{\partial x} + \frac{\partial (\rho v \epsilon)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\mu_T}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\mu_T}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial y} \right) + \frac{\epsilon}{k} (C_{\epsilon 1} P - C_{\epsilon 2} D) \quad (77)$$

Con el término de destrucción D dado por $\rho \epsilon$ y el término de producción P formulado como

$$\begin{aligned} P = & 2\mu_T \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right] + \mu_T \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \\ & - \frac{2}{3} \mu_T \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 - \frac{2}{3} \rho \mu_T k \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) \end{aligned} \quad (78)$$

Para el caso de una propiedad de fluido constante, las ecuaciones diferenciales de transporte en forma no conservativa se expresan como

$$\frac{\partial k}{\partial t} + u \frac{dk}{dx} + v \frac{\partial k}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\nu_T}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\nu_T}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial y} \right) + P - D \quad (79)$$

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} + u \frac{\partial \epsilon}{\partial x} + v \frac{\partial \epsilon}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\nu_T}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\nu_T}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial y} \right) + \frac{\epsilon}{k} (C_{\epsilon 1} P - C_{\epsilon 2} D), \quad (80)$$

donde el término de destrucción D viene dado por ϵ y el término de producción P se

formula como

$$P = 2\nu_T \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right] + \nu_T \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \quad (81)$$

El significado físico de las ecuaciones anteriores es la tasa de cambio y el transporte de advección de k o ϵ es igual al transporte de difusión combinado con la tasa de producción y destrucción de k o ϵ . Las ecuaciones contienen cinco constantes ajustables C_μ , σ_k , σ_ϵ , $C_{\epsilon 1}$ y $C_{\epsilon 2}$. Se ha llegado a estas constantes mediante un amplio ajuste de datos para una amplia gama de flujos turbulentos (Yeoh et al., 2018):

$$C_\mu = 0.09, \sigma_k = 1, \sigma_\epsilon = 1.3, C_{\epsilon 1} = 1.44, C_{\epsilon 2} = 1.92$$

4.5. ANSYS Fluent

ANSYS Fluent es un paquete de software de dinámica de fluidos computacional que está escrito en lenguaje C" (Matsson, 2022). Este software CFD permite modelar y simular todo tipo de procesos de fluidos y transferencia de calor.

4.5.1. Características de Fluent

Hami y Radi (2017) indican las características principales de Fluent:

- Fluent es un solucionador, por lo que la malla debe construirse utilizando el software Gambit.
- Su interfaz gráfica permite configurar los parámetros del modelo.
- Dispone de una interfaz de secuencias de comandos para automatizar los procedimientos de cálculo.
- Posee gran cantidad de modelos que se implementan para resolver cuestiones de mecánica de fluidos como flujos bifásicos (miscible, inmiscible, cavitación, solidificación), turbulencia, combustión, transporte de partículas, flujos a través de medios porosos, mallas móviles y dinámicas con reconstrucción de malla, entre otros.
- Se pueden ajustar los esquemas numéricos temporales y espaciales de los modelos para mejorar su convergencia.
- Fluent admite el procesamiento paralelo y puede aprovechar los sistemas multiprocesador tanto en una sola máquina como en una red (clúster, doble núcleo, plataformas de múltiples CPU).

4.5.2. Simulación numérica mediante Fluent

El software FLUENT utiliza el método del volumen finito, dividiendo el área de diseño en una serie de bloques de control. Cada bloque de control tiene un nodo representativo. Derive la ecuación discreta manipulando la ecuación de control de volumen para la inte-

gral. Durante el proceso de inferencia, es necesario tomar la función y la primera derivada de la interfaz, y este método de construcción es el método de volúmenes finitos discretos.

4.5.3. Independencia de mallas

Para obtener resultados confiables, es necesario asegurar que la solución sea independiente de la resolución de la malla. Este aspecto es una causa común de resultados equívocos en CFD. Este proceso debe realizarse al menos una vez por cada problema que encuentre, de modo que cuando ocurra un problema similar, se pueda utilizar el mismo tamaño de malla.

Team (2012) describe los pasos respectivos para el estudio de independencia de malla:

Paso 1. Ejecute la simulación inicial en su malla inicial y asegúrese de que el error residual converja a 10^{-4} , los puntos del monitor estén estables y los desequilibrios estén por debajo del 1 %. Si no, refina la malla y repita.

Paso 2. Una vez que haya cumplido con los criterios de convergencia anteriores para su primera simulación, refina la malla globalmente para que tenga celdas más finas en todo el dominio. En general, apuntaremos alrededor de 1,5 veces el tamaño de malla inicial.

Ejecute la simulación y asegúrese de que el error residual caiga por debajo de 10^{-4} , que los puntos del monitor estén estables y que los desequilibrios estén por debajo del 1 %. En este punto, debe comparar los valores de los puntos del monitor del Paso 2 con los valores del Paso 1. Si son iguales (dentro de su propia tolerancia permitida), entonces la malla del Paso 1 fue lo suficientemente precisa como para capturar el resultado. Si el valor del Paso 2 no está dentro de los valores aceptables del resultado del Paso 1, significa que su solución está cambiando debido a la resolución de su malla y, por lo tanto, la solución aún no es independiente de la malla. En este caso, deberá pasar al Paso 3.

Paso 3. Debido a que su solución está cambiando con el refinamiento de la malla, aún no ha logrado una solución independiente de la malla. Debe refinar más la malla y repetir el proceso hasta que tenga una solución que sea independiente de la malla. Entonces, siempre debe usar la malla más pequeña que le brinde esta solución independiente de malla (para reducir el tiempo de ejecución de la simulación).

5. Metodología

5.1. Equipos y materiales

Los equipos y materiales utilizados en la investigación se detallan en la **Tabla 5**.

Tabla 5. Equipos y materiales utilizados en la investigación.

Equipos	Software	Materiales Bibliográficos
Computadora Portátil	Ansys Fluent 2022 R1	Libros
	Latex	Tesis
		Artículos científicos
		Manuales
		Sitios web

5.2. Procedimiento

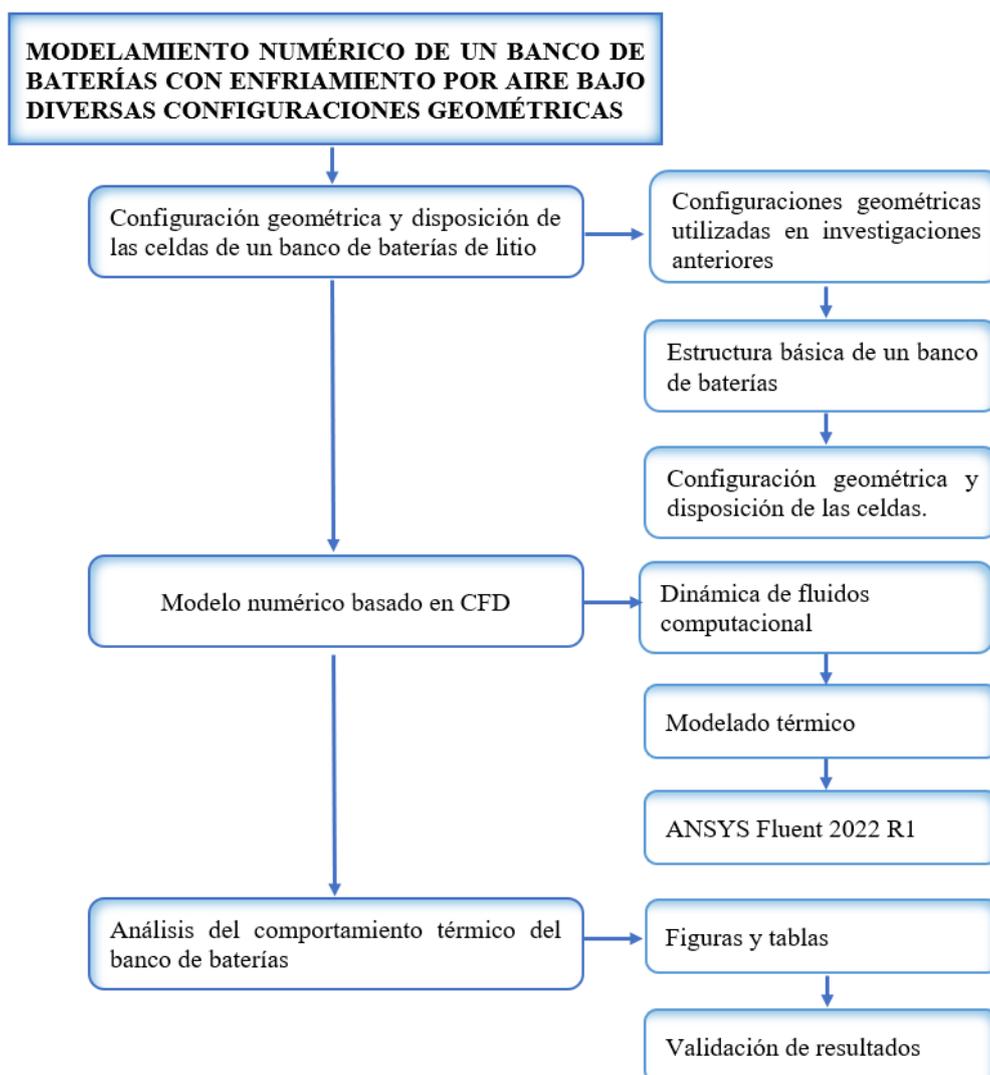


Figura 44. Metodología general de la investigación.

5.2.1. Configuración geométrica y disposición de las celdas de un banco de LIB

Para dar cumplimiento al primer objetivo se siguieron las actividades que se muestran en la **Figura 45**.

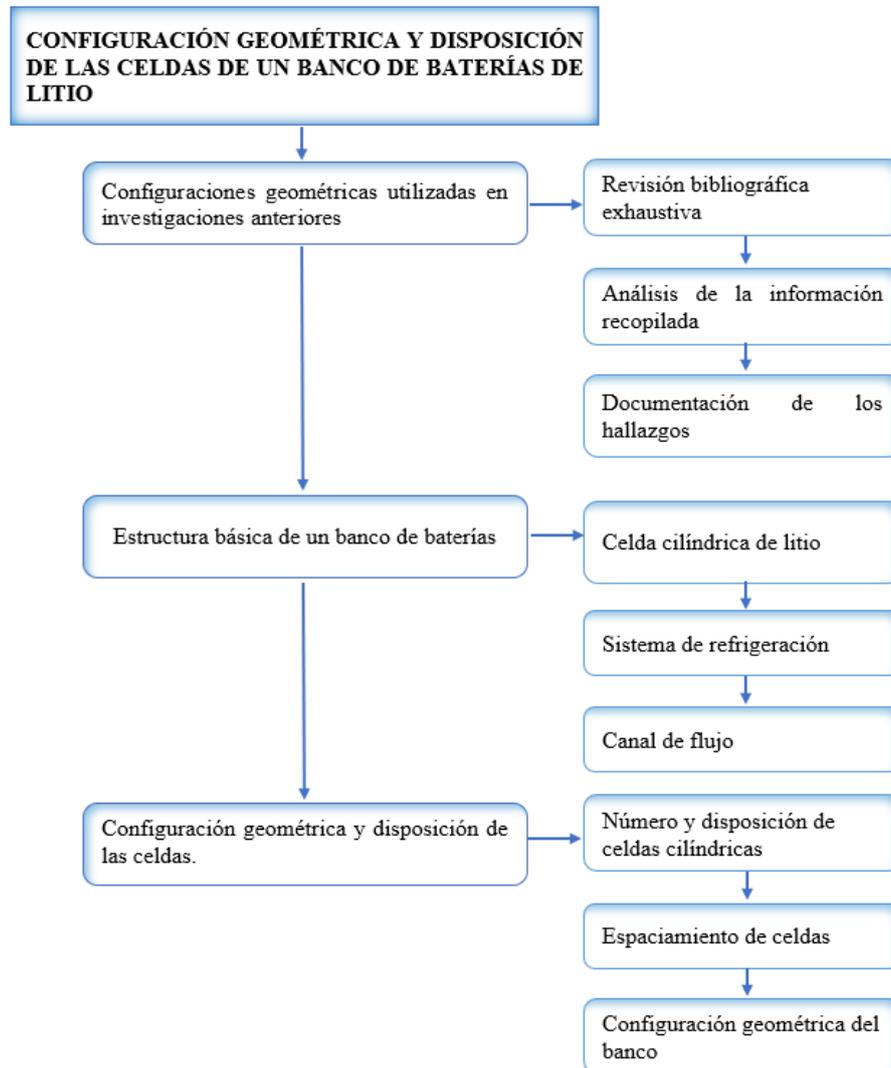


Figura 45. Procedimiento del primer objetivo.

5.2.1.1 Configuraciones geométricas utilizadas en investigaciones anteriores.

En esta actividad se realizaron los siguientes pasos.

1. Revisión bibliográfica exhaustiva:

- (a) Se buscó en bases de datos académicas como IEEE Xplore, ScienceDirect y Google Scholar artículos, libros y publicaciones científicas relacionadas con las baterías de litio y sus investigaciones utilizando palabras claves como LIB, configuración geométrica, refrigeración por aire, simulación numérica, etc. otro.
- (b) Se realizó una lectura comprensiva de los resúmenes y palabras clave de los

artículos para determinar su relevancia. Se descargaron los artículos científicos seleccionados para el análisis.

- (c) Se analizó el contexto y los objetivos de las investigaciones. Y se identificó los conceptos técnicos y las configuraciones geométricas utilizadas.

2. Extracción de información clave:

- (a) Se registró los conceptos técnicos relacionados con las baterías de litio, como celdas cilíndricas, electrodos, separadores, electrolitos, capacidad, densidad de energía, eficiencia, entre otros, incluyendo definiciones, características y aplicaciones.
- (b) Se identificó las diferentes configuraciones geométricas y se realizó un registro del número, disposición y espaciamiento de celdas, entradas y salidas de aire y la forma del banco de baterías.
- (c) Se evaluó las ventajas y desventajas de cada configuración geométrica en términos de rendimiento, temperatura máxima y variación de temperatura.

3. Documentación de los hallazgos.

- (a) Se organizó la información recopilada en tablas que incluyen conceptos técnicos.

5.2.1.2 Estructura básica de un banco de baterías. En esta actividad se siguieron los pasos que se detallan a continuación.

1. Selección de la LIB:

- (a) Se seleccionó una batería de litio 18650 del catálogo de Samsung.
- (b) Se determinó las especificaciones nominales de la celda cilíndrica que están presentes en el catálogo.
- (c) Se estableció las especificaciones térmicas de la celda de litio 18650.

2. Determinación del sistema de refrigeración:

- (a) Se determinó el tipo de gestión térmica y se identificó los diferentes mecanismos de transferencia de calor presentes en el sistema.
- (b) Se definió los parámetros térmicos del aire.
- (c) Se determinó los parámetros de diseño del sistema de refrigeración para el estudio.

3. Definición del canal de flujo de aire:

- (a) Se determinó tres diseños de canales de flujo de aire según los hallazgos de la primera actividad del primer objetivo.
- (b) Se seleccionó el material de fabricación del canal de flujo de aire.
- (c) Se estableció los parámetros térmicos del material del canal flujo de aire.

5.2.1.3 Configuración geométrica y disposición de las celdas. Para esta actividad se llevó a cabo los pasos que se describen a continuación.

1. Definición de número y disposición de celdas cilíndricas:
 - (a) Se determinó las dimensiones, el número total y la disposición de las celdas para el estudio térmico, considerando el mejor ajuste para los tres diseños.
2. Determinación del espaciamiento de celdas:
 - (a) De acuerdo al análisis de la primera actividad del primer objetivo se estableció los espaciamientos longitudinal y transversal óptimos de las celdas.
3. Configuración geométrica del banco de celdas:
 - (a) Se llevó a cabo tres configuraciones geométricas: forma de rombo, triangular y cuadrada.

5.2.2. Modelo numérico basado en CFD

Para cumplir con el segundo objetivo se siguieron las actividades de la **Figura 46**:

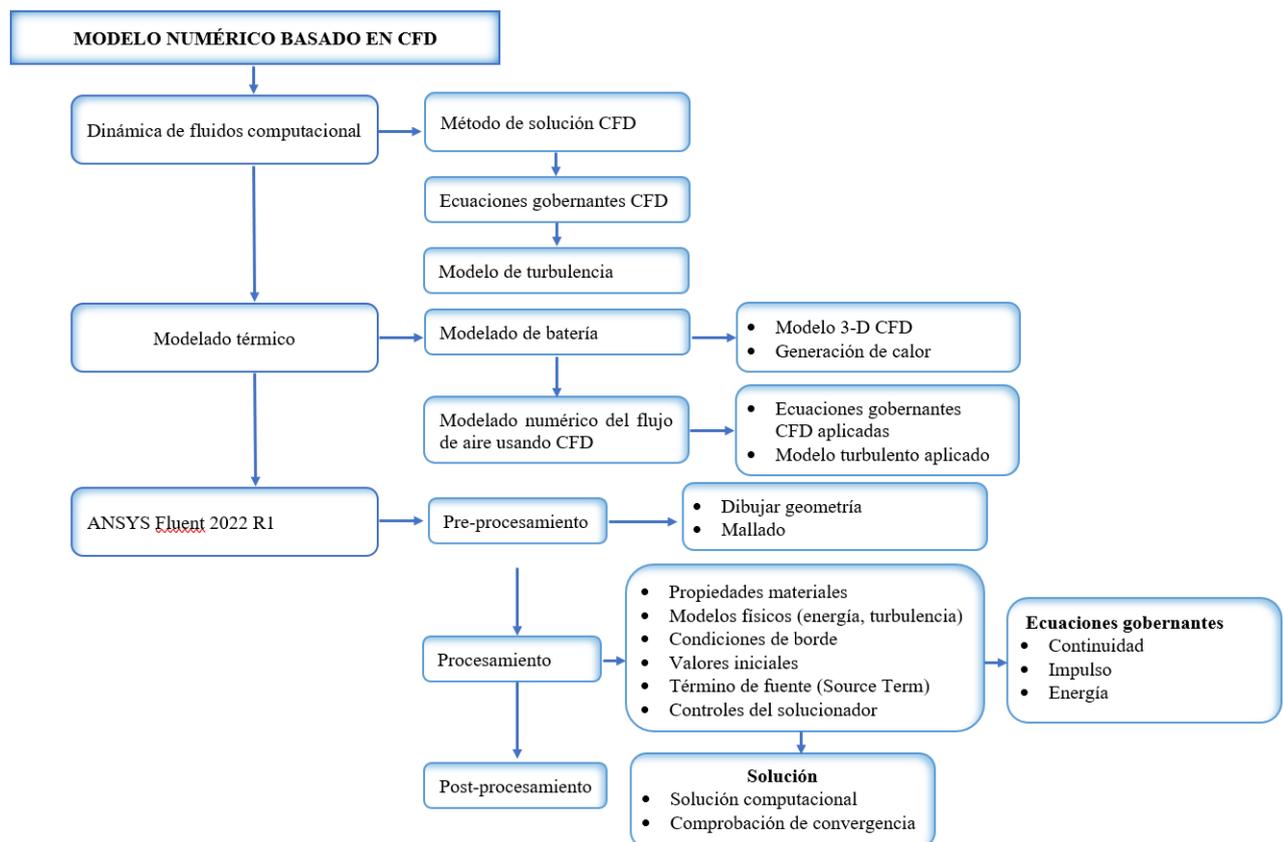


Figura 46. Procedimiento del segundo objetivo.

5.2.2.1 Dinámica de fluidos computacional. En esta actividad se realizó los siguientes pasos.

1. Método de solución de CFD:
 - (a) Se determinó el método que se emplea para CFD.
2. Ecuaciones gobernantes CFD:
 - (a) Se establecieron las ecuaciones gobernantes CFD: Continuidad, Momento y Energía
3. Modelo de turbulencia.
 - (a) Se determinó el modelo de turbulencia que se utilizó en el estudio.

5.2.2.2 Modelado térmico. Para cumplir con esta actividad se siguió los siguientes pasos.

1. Modelado de batería:
 - (a) Se estableció el modelo 3-D CFD para la simulación de una celda cilíndrica de litio y generación de calor a una corriente de descarga constante y variable de una celda cilíndrica de litio.
2. Modelado numérico del flujo de aire usando CFD:
 - (a) Se establecieron las ecuaciones gobernantes CFD de acuerdo al estudio térmico planteado y se seleccionó el modelo de turbulencia para el estudio térmico.

5.2.2.3 ANSYS Fluent 2022 R1. Para cumplir con esta actividad se siguió los siguientes pasos.

1. Preprocesamiento:
 - (a) Se diseñó la geometría de estudio mediante la herramienta SpaceClaim de Fluent.
 - (b) Se seleccionó el tipo de malla y posteriormente se generó la geometría de estudio mediante la herramienta Meshing de Fluent.
2. Procesamiento:
 - (a) Se definió las propiedades del material y del fluido, los modelos físicos (Energía y Turbulencia), las condiciones de frontera y borde, los valores iniciales y el parámetro de Término fuente (Source Term).
 - (b) Se inició la solución computacional y se analizó la convergencia de las ecuaciones gobernantes CFD.
3. Postprocesamiento:
 - (a) Se crearon informes de los resultados de las variables de interés.

5.2.3. Evaluación el comportamiento térmico del banco de baterías

Para la ejecución del tercer objetivo: “Evaluar el comportamiento térmico del banco de baterías”, se siguió el procedimiento de la **Figura 47**:

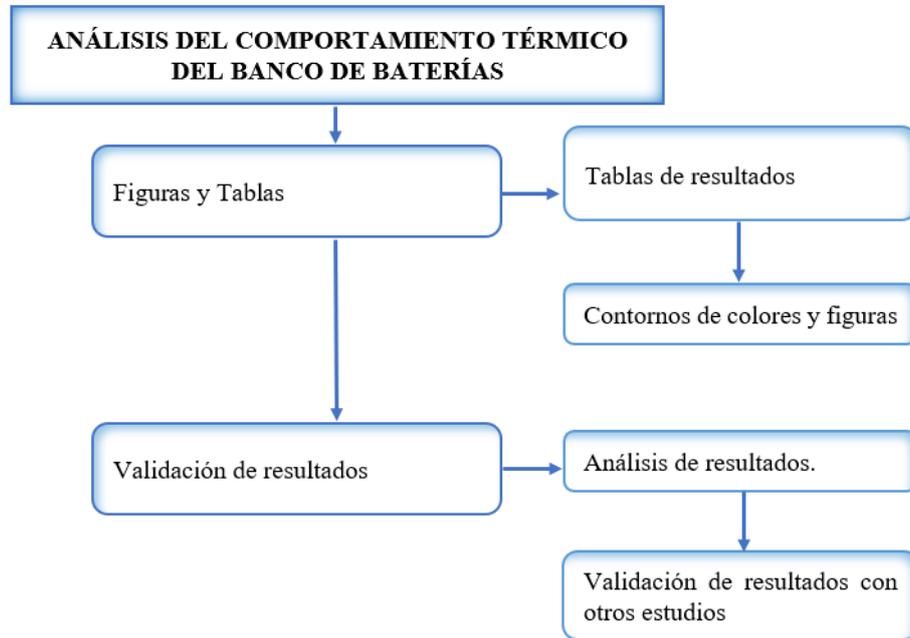


Figura 47. Procedimiento del tercer objetivo.

5.2.3.1 Tablas y Figuras. En esta actividad se realizaron los siguientes pasos.

1. Generación de tablas y figuras de la simulación:
 - (a) Se generaron tablas de resultados mediante LaTeX.
 - (b) Se crearon contornos de colores y figuras mediante Fluent y Python respectivamente.

5.2.3.2 Validación de resultados. En esta actividad se realizaron los siguientes pasos.

1. Análisis de resultados:
 - (a) Se realizó un análisis de las variables de interés del estudio y se buscó patrones o tendencias que puedan indicar posibles problemas de sobrecalentamiento o condiciones inseguras.
2. Validación de resultados:
 - (a) Se validó los resultados obtenidos mediante una comparación con otras investigaciones.

5.3. Procesamiento y análisis de datos

5.3.1. Configuraciones geométricas utilizadas en investigaciones anteriores

La **Tabla 6** muestra que en todas las investigaciones se han utilizado celdas cilíndricas 18650 para el estudio térmico con refrigeración por aire. Nazar et al. (2023) combinó la refrigeración con aire y PCM. Además, cada investigación tiene diferentes números de celdas de estudio debido a su aplicación. Widyantara et al. (2021) realizaron un estudio de un pack de baterías de un vehículo eléctrico donde se requiere un número elevado de celdas.

Tabla 6. Comparación de estudios realizados acerca del tema.

No.	Referencia	Tipo de Batería	Refrigerante\ Refrigeración	Número de Baterías
1	Fan et al. (2019)	Cilíndrica	Aire\ Activa	32
2	F. Zhang, Wang y Yi (2021)	Cilíndrica	Aire\ Activa	25
3	Kirad y Chaudhari (2021)	Cilíndrica	Aire\ Activa	30
4	Jiaqiang et al. (2018)	Cilíndrica	Aire\ Activa	60
5	Kummitha (2023)	Cilíndrica	Aire\ Activa	9
6	Nazar et al. (2023)	Cilíndrica	Aire; PCM\ Activa; Pasiva	9
7	Öztop y Şahinaslan (2022)	Cilíndrica	Aire\ Activa	24
8	Pordanjani et al. (2023)	Cilíndrica	Aire\ Activa	36
9	Sahin et al. (2022)	Cilíndrica	Aire\ Activa	12
10	Singh et al. (2021)	Cilíndrica	Aire\ Activa	28
11	Widyantara et al. (2021)	Cilíndrica	Aire\ Activa	240
12	Xu et al. (2022)	Cilíndrica	Aire\ Activa	24

La **Tabla 7** muestra las variables que se han estudiado en cada una de las investigaciones, siendo la temperatura máxima, la variación de temperatura y la caída de presión las que tienen mayor presencia. Además, se observa que los estudios térmicos de las celdas se desarrollan a diferentes tasas de descarga, a excepción de Öztop y Şahinaslan (2022), Pordanjani et al. (2023), Widyantara et al. (2021) y Xu et al. (2022) que utilizaron una sola tasa de descarga. Por lo que, cada investigación concluye con recomendaciones que se pueden emplear para un nuevo estudio térmico.

Tabla 7. Parámetros de interés en investigaciones previas.

No.	Referencia	Variable	Tasa de descarga y/o carga	Recomendaciones
1	Fan et al. (2019)	η	0.5C, 1C, 2C	Disposición alineada.
2	F. Zhang, Wang y Yi (2021)	ΔP T_{max} ΔT_{max}	1C, 2C, 3C	Entrada de aire en la parte superior central y cuatro salidas en esquinas.
3	Kirad y Chaudhari (2021)	ΔP T_{max} ΔT_{max}	1C, 2C, 3C, 4C, 5C	La uniformidad de temperatura y eficiencia de enfriamiento son afectados por el espacio transversal y longitudinal respectivamente.
4	Jiaqiang et al. (2018)	T_{max} ΔT_{max}	0.5C, 1C	Entradas y salidas en lados opuestos y el uso de un deflector.
5	Kummitha (2023)	T_{max} ΔT_{max} q	1C, 2C, 3C	Uso de soportes de celdas como aletas.
6	Nazar et al. (2023)	T_{max} ΔT_{max}	0.5C, 1C	La refrigeración por aire redujo la diferencia de temperatura a 6 °C aproximadamente con respecto al ambiente.
7	Öztop y Şahinaslan (2022)	T_{max} ΔT_{max}	1C	Con aletas se alcanzó temperaturas máximas entre 15 °C a 35 °C pero no se mantuvo la uniformidad de temperatura.
8	Pordanjani et al. (2023)	ΔP T_{max} ΔT_{max}	4C	Distribución central de las celdas y el aumento del área transversal.
9	Sahin et al. (2022)	T_{max} ΔT_{max} P_{fan}	0.1C, 1C, 3C, 5C	Los deflectores reducen la temperatura máxima y la diferencia de temperatura
10	Singh et al. (2021)	T_{max} ΔT_{max} Q	0.2C, 0.5C, 1C, 2C	La configuración de flujo no influye en la velocidad y el campo térmico.
11	Widyantara et al. (2021)	T_{max} ΔT_{max}	1C	Aumentar los ventiladores
12	Xu et al. (2022)	T_{max} ΔT_{max}	1C	Posición de entrada (10-30 mm) y la velocidad del aire de entrada (3-6 m/s)

5.3.2. Estructura básica de un banco de baterías

La estructura básica del enfriamiento por aire de un banco de baterías de litio consta de tres partes:

5.3.2.1 Batería de litio. Para el presente estudio se seleccionó la celda recargable de litio modelo ICR18650-22P de la marca Samsung. Las características técnicas del producto se presenta en la **Tabla 8**.

Tabla 8. Especificaciones nominales de la celda ICR18650-22P.

Parámetro	Especificación
Capacidad Nominal	2150 mAh
Voltaje Nominal	3.62 V (descarga 1C)
Máx. corriente de carga	2150 mAh
Máx. corriente de descarga	10 A
Dimensiones	Diámetro (máx.): 18.40 mm
	Altura (máx.): 65 mm
Temperatura de funcionamiento	Carga: -10 a 50 °C
	Descarga: -20 a 70 °C
Resistencia Interna	35 mΩ

Fuente: Adaptado de *Especificación del producto ICR18650-22P*, 2010.

Los parámetros térmicos de la batería de iones de litio 18650 necesarios para la simulación se presentan en la **Tabla 9**. Estos parámetros son el resultado de pruebas experimentales de los elementos que componen las baterías de litio y han sido utilizados en varios estudios previos sobre el tema.

Tabla 9. Especificaciones térmicas de la celda de litio 18650.

Parámetro	Valor
Densidad $\left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right)$	2873
Capacidad calorífica específica $\left(\frac{\text{J}}{\text{kg}\cdot\text{K}}\right)$	1200
Conductividad térmica en dirección radial $\left(\frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}}\right)$	0.2
Conductividad térmica en dirección axial $\left(\frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}}\right)$	37.6

Fuente: F. Zhang, Wang y Yi, 2021.

5.3.2.2 Sistema de refrigeración. Se eligió la gestión térmica activa, que utiliza un ventilador para forzar el ingreso de aire al volumen de la batería para enfriarla. Los parámetros térmicos para el aire se determinan en la **Tabla 10**. Es importante mencionar, que estos parámetros ya se encuentran por defecto en ANSYS Fluent 2022 R1 para la simulación.

Tabla 10. Especificaciones térmicas del aire.

Parámetro	Valor
Densidad $\left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right)$	1.165
Calor específico $\left(\frac{\text{J}}{\text{kg}\cdot\text{K}}\right)$	1005
Viscosidad dinámica $\left(\frac{\text{kg}}{\text{m}\cdot\text{s}}\right)$	1.86×10^{-5}
Conductividad térmica $\left(\frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}}\right)$	0.0267

Fuente: F. Zhang, Wang y Yi, 2021.

Para terminar, el diseño del sistema de refrigeración por aire se centró especialmente

en los siguientes parámetros:

- De diseño: el tamaño del canal, la posición de la entrada y salida de aire, disposición y espaciamiento de las celdas.
- De flujo: flujo de aire unidireccional.
- De operación: temperatura ambiente, tasa de flujo de masa de aire y estado de la batería.

5.3.2.3 Canal de flujo de aire. Es una estructura diseñada para controlar y dirigir el movimiento del aire en una dirección específica. En este estudio, se llevó a cabo tres diseños diferentes.

El primer diseño presenta un canal con forma de rombo. En este caso, se ha colocado una entrada en la parte izquierda del canal, y se ha dispuesto una única salida en la parte derecha como muestra la **Figura 48**. Así mismo, el diseño presenta dos chaflanes en la parte superior e inferior de la entrada de aire para favorecer el flujo de aire unidireccional.

El segundo diseño adopta una forma triangular. La entrada de aire se encuentra en la parte izquierda del canal, mientras que se ha establecido una salida en la parte superior como se observa en la **Figura 49**.

Por último, el tercer diseño presenta una forma circular y cuenta con una salida de aire ubicada en la parte derecha. Además, se ha dispuesto una entrada de aire al lado izquierdo del canal como se observa en la **Figura 50**.

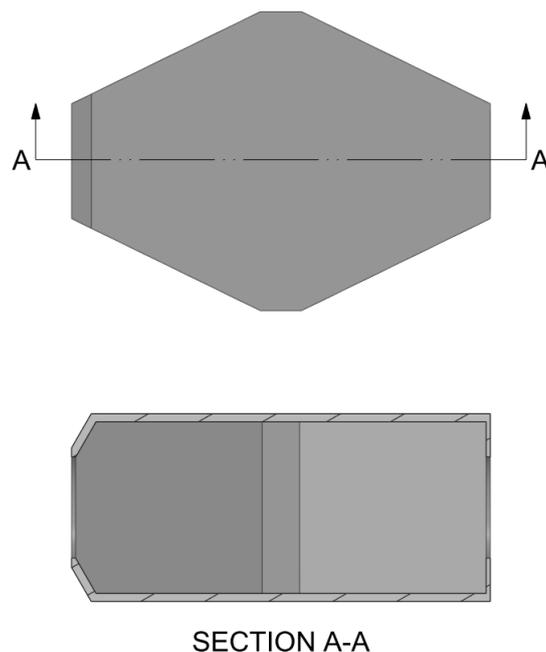


Figura 48. Canal de flujo de aire de forma rombo.

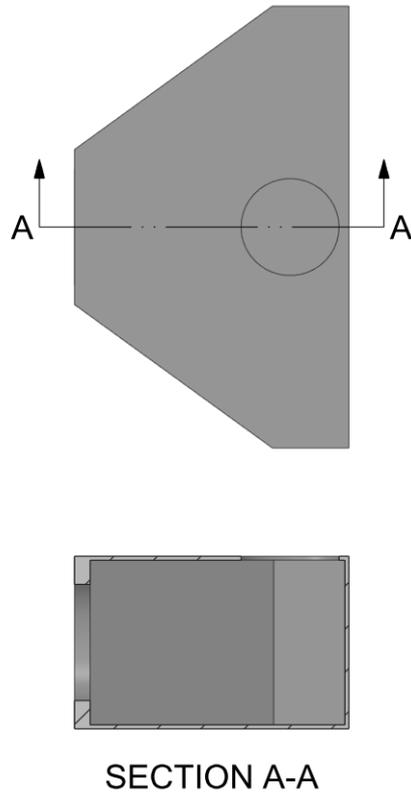


Figura 49. Canal de flujo de aire de forma triangular.

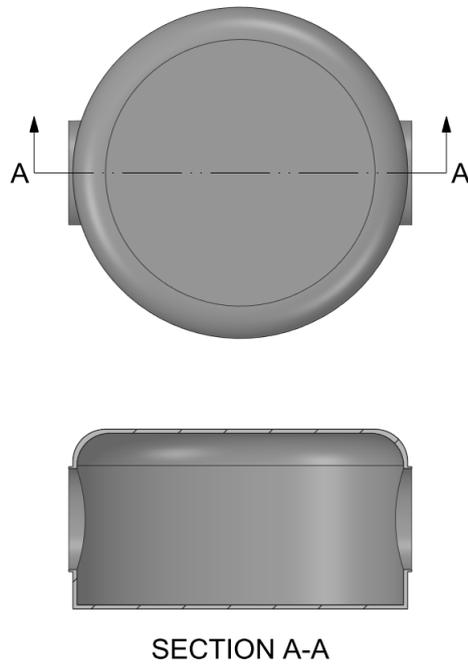


Figura 50. Canal de flujo de aire de forma circular.

De igual manera, la selección de un material adecuado es un proceso crucial donde se consideran una variedad de factores clave para cumplir los requerimientos del estudio. El polimetilmetacrilato es un polímero termoplástico ampliamente empleado debido a su

atractivo visual y excelente transparencia que presenta propiedades térmicas mostradas en la **Tabla 11**.

Tabla 11. Especificaciones térmicas del acrílico.

Parámetro	Valor
Densidad $\left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right)$	1200
Calor específico $\left(\frac{\text{J}}{\text{kg}\cdot\text{K}}\right)$	1464
Coefficiente de conductividad térmica $\left(\frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}}\right)$	0.19

Fuente: Plasco, 2023.

5.3.3. Configuración geométrica y disposición de las celdas

Las dimensiones de la celda cilíndrica se observa en la **Figura 51**.

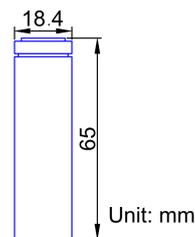


Figura 51. Dimensiones de la celda ICR18650-22P.

Fuente: Adaptado de *Especificación del producto ICR18650-22P*, 2010.

Dependiendo de la forma de los canales de flujo, el número regulable de celdas es de 16 unidades, y se pueden disponer de tres formas: rombo, triangular y cuadrada. Por lo tanto, se decidió utilizar dos disposiciones: alineado y escalonado como se ilustra en la **Figura 52**.

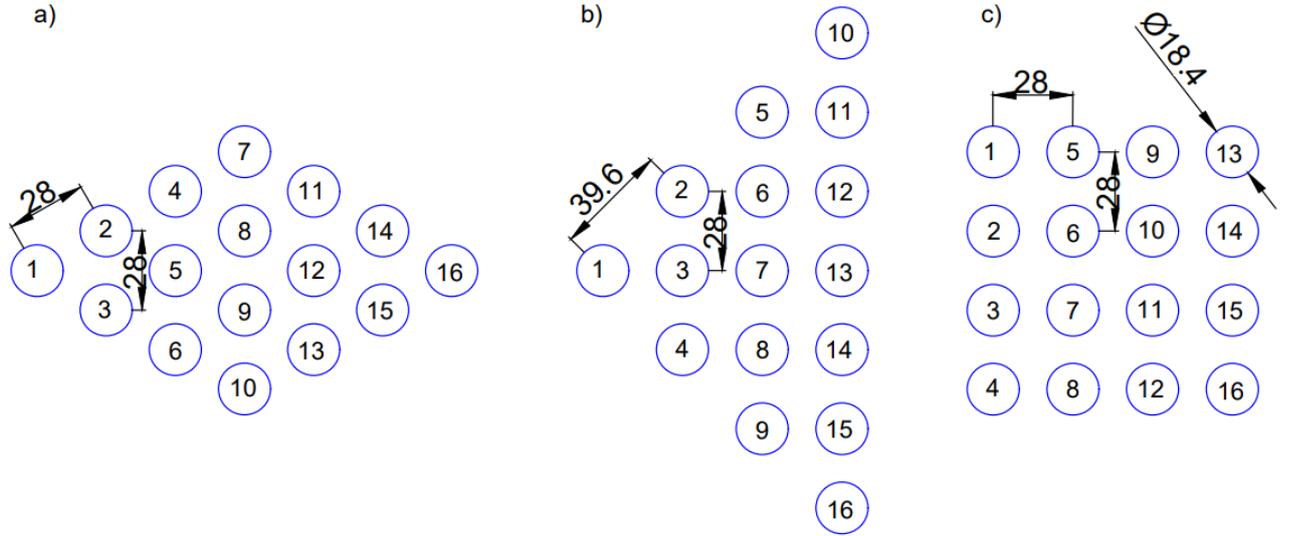


Figura 52. Configuraciones geométricas: (a) Rombo con arreglo escalonado. (b) Triángulo con arreglo alineado. (c) Cuadrado con arreglo alineado.

5.3.4. Dinámica de fluidos computacional

5.3.4.1 Método de solución CFD. Los solucionadores CFD de ANSYS se basan en el método de volumen finito que utiliza la siguiente ecuación.

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho \phi dV + \oint_A \rho \phi dV \cdot dA = \oint_A \Gamma_\phi \nabla \phi \cdot dA + \int_V S_\phi dV \quad (82)$$

5.3.5. Modelo térmico.

5.3.5.1 Modelo 3-D CFD. La ecuación de energía usada por el solucionador de CFD para el modelamiento de una batería como un sólido rígido por ANSYS (2018):

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho h_e) + \nabla \cdot (\vec{V} \rho h_e) = \nabla \cdot (k \nabla T) + S_h \quad (83)$$

donde ρ es la densidad, $h_e = \int C_p dT$ es la entalpía sensible, C_p es el calor específico, k es la conductividad térmica, T es la temperatura, S_h es el término fuente volumétrico y la velocidad V se obtiene del movimiento del fluido.

5.3.5.2 Generación de calor. Haciendo uso de la Ecuación 1 se determinó la generación de calor por unidad de volumen de la celda cilíndrica a tasas de descarga diferentes. Las tasas de corriente aplicadas fueron:

$$i_1 = 2150 \text{ mA} \cdot 1 \text{ C} = 2150 \text{ mA} = 2.15 \text{ A}$$

$$i_2 = 2150 \text{ mA} \cdot 2 \text{ C} = 4300 \text{ mA} = 4.3 \text{ A}$$

$$i_3 = 2150 \text{ mA} \cdot 3 \text{ C} = 6450 \text{ mA} = 6.45 \text{ A}$$

$$i_4 = 2150 \text{ mA} \cdot 4.6 \text{ C} = 9890 \text{ mA} \simeq 10 \text{ A}$$

Posteriormente, se determina la rapidez de descarga.

$$t_1 = \frac{2150 \text{ mAh}}{2150 \text{ mA}} = 1 \text{ h}$$

$$t_2 = \frac{2150 \text{ mAh}}{4300 \text{ mA}} = 0.5 \text{ h}$$

$$t_3 = \frac{2150 \text{ mAh}}{6450 \text{ mA}} = 1/3 \text{ h}$$

$$t_4 = \frac{2150 \text{ mAh}}{6450 \text{ mA}} = 0.215 \text{ h}$$

Seguidamente, se calcula el volumen de la celda cilíndrica.

$$Vol = \pi r^2 \cdot h \quad (84)$$

$$Vol = \pi(0.0092 \text{ m})^2 \cdot (0.065 \text{ m})$$

$$Vol \simeq 1.728 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$$

Finalmente, se determina la generación de calor por efecto Joule haciendo uso de la resistencia interna que nos proporciona el catálogo *Especificación del producto ICR18650-22P*, 2010, que es $R_i = 35 \text{ m}\Omega$ medido a 1 kHz en CA después de la carga estándar.

$$Q_{gen} = \frac{I^2 \cdot R_i}{Vol} \quad (85)$$

$$Q_{gen1} = \frac{(2.15 \text{ A})^2 \cdot (35 \cdot 10^{-3} \Omega)}{1.728 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3} = 9360.65 \text{ Wm}^{-3}$$

$$Q_{gen2} = \frac{(4.3 \text{ A})^2 \cdot (35 \cdot 10^{-3} \Omega)}{1.728 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3} = 37442.6 \text{ Wm}^{-3}$$

$$Q_{gen3} = \frac{(6.45 \text{ A})^2 \cdot (35 \cdot 10^{-3} \Omega)}{1.728 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3} = 84245.86 \text{ Wm}^{-3}$$

$$Q_{gen4} = \frac{(10 \text{ A})^2 \cdot (35 \cdot 10^{-3} \Omega)}{1.728 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3} = 202502 \text{ Wm}^{-3}$$

Además, Bernardi et al. (1985) desarrolló la siguiente fórmula:

$$Q_{gen} = I(V_{OC} - V) - I \left(T \frac{dV_{OC}}{dT} \right) = I^2 R_T - I \left(T \frac{dV_{OC}}{dT} \right), \quad (86)$$

donde la corriente I es positiva para descargar y negativa para cargar. Tanto el potencial de circuito abierto (V_{OC}) como la resistencia interna total de la batería R_T dependen del estado de carga (SOC) y la temperatura de la celda. El término $I(V_{OC} - V)$ de la ecuación 86 representa el calentamiento debido al efecto Joule (generación de calor irreversible).

El segundo término es el cambio de entropía (generación de calor reversible), atribuido a las reacciones electroquímicas, el cual se suele despreciar en algunos estudios. Además, el efecto de cambio de fase, el efecto de mezcla y las reacciones simultáneas se desprecian en la formulación de Bernardi.

En el estudio actual, el estado de carga de la batería (SOC) se estima mediante la integración de amperios-hora o el método de conteo de Coulomb (Kim et al. (2014)):

$$SOC = SOC_{t=0} - \frac{1}{C_N} \int I(t)dt, \quad (87)$$

donde $SOC_{t=0} = 1$ cuando la batería está completamente cargada, y C_N es la capacidad nominal de la celda.

Para estudiar el comportamiento del banco bajo un perfil de corriente variable, se empleó el software ADVISOR, seleccionando un ciclo de conducción HWFET en autopista como entrada de velocidad para un vehículo eléctrico. La corriente simulada se escaló a un máximo de 20 A (ver Anexo 1), como se muestra en la **Figura 53**, y este ciclo se aplicó repetidamente a la celda hasta que la energía extraída fue de 2 Ah. No se consideró la corriente de regeneración.

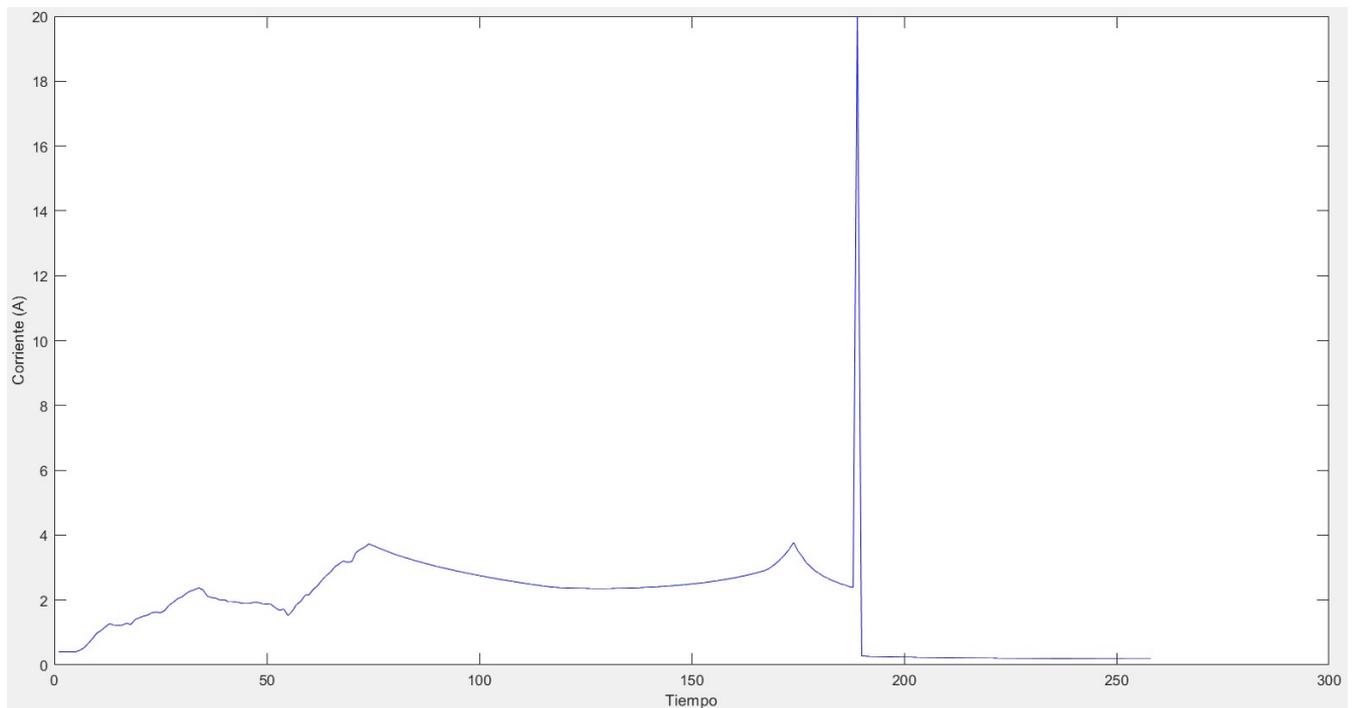


Figura 53. Perfil actual escalado de un ciclo de conducción HWFET.

5.3.6. Modelado numérico del flujo de aire usando CFD

Cada celda del módulo se modeló como un cilindro sólido. Las dimensiones del dominio de los diseños se observan en las **Figuras 48, 49, 50** y las condiciones de contorno se

muestran en la **Figura 54**, esto para todos los diseños. La condición en la entrada fue la velocidad de entrada y en la salida, la presión atmosférica.

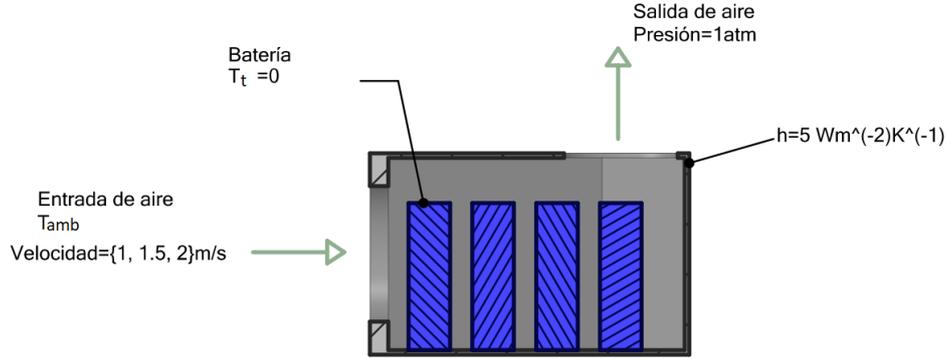


Figura 54. Condiciones de contorno para las simulaciones.

Además, se impuso un coeficiente de transferencia de calor de $5 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ en la carcasa de la batería, ya que según Incropera (1999) el coeficiente de convección para una convección natural va de $2 - 25 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ y este valor se ha utilizado en varios estudios del comportamiento de LIB (Paccha-Herrera et al., 2020). La discretización espacial de la presión para convección forzada fue PRESTO! (Pressure Staggering Option). ANSYS (2018) indica que, el esquema PRESTO! es ideal para gradientes de presión pronunciados que se encuentran en flujos giratorios. En situaciones donde hay grandes fuerzas corporales o fuertes variaciones de presión, como en flujos arremolinados, proporciona una interpolación de presión mejorada.

En el estudio, se ejecutó una simulación transitoria con un paso de tiempo de 1 s. Para obtener una convergencia más robusta, se aplicó un esquema Coupled para el acoplamiento presión-velocidad. Las condiciones iniciales para la temperatura de cada celda se aplicaron utilizando la opción Patch en Fluent.

5.3.6.1 Ecuaciones gobernantes CFD. El flujo de aire en el paquete de baterías se considera un flujo incompresible. Por lo tanto, según L. H. Saw et al. (2016) las ecuaciones gobernantes de continuidad, cantidad de movimiento y energía, respectivamente, se definen de la siguiente manera:

$$\nabla \cdot V = 0, \quad (88)$$

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} = -\frac{\nabla p}{\rho} + \frac{\mu}{\rho} \nabla^2 \vec{V}, \quad (89)$$

$$\frac{\partial \rho e}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho e \vec{V}) = -p \nabla \cdot \vec{V} + \nabla \cdot (k_f \nabla T) + \Phi, \quad (90)$$

donde μ es la viscosidad cinemática, e es la energía interna ($e = C_v T$ para un gas ideal) y Φ es el término de disipación viscosa definido como:

$$\begin{aligned} \Phi = & 2\mu \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + 2\mu \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + 2\mu \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 + \mu \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 \\ & + \mu \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 + \mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 \end{aligned} \quad (91)$$

5.3.6.2 Modelo turbulento. En los estudios de Xia et al. (2018), Erb et al. (2017), Smith et al. (2014) y Chen et al. (2017) han adoptado el modelo $k - \epsilon$ estándar para describir los flujos turbulentos en los módulos de batería. Por lo que, este enfoque se utiliza en el presente estudio.

Según ANSYS (2018), la primera ecuación de transporte para el modelo estándar $k - \epsilon$ es la energía cinética turbulenta k que se expresa como:

$$\frac{\partial (\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k + P_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k, \quad (92)$$

donde Y_M es el efecto de la compresibilidad sobre la turbulencia y S_k es la fuente cinética turbulenta término.

Y la segunda ecuación es la disipación de la energía cinética turbulenta ϵ , que se da para la siguiente expresión:

$$\frac{\partial (\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho \epsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_3 G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} + S_\epsilon, \quad (93)$$

donde S_ϵ es el término fuente para la disipación turbulenta y μ_t es la viscosidad turbulenta descrito por:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{K^2}{\epsilon}, \quad (94)$$

La componente de energía cinética turbulenta debida a los gradientes medios de velocidad P_k , denominada producción, se formula de la siguiente manera:

$$P_k = -\overline{\rho u'_i u'_j}, \quad (95)$$

El componente de energía cinética turbulenta debido a la flotabilidad P_b es

$$P_b = \beta g_i \frac{\mu_t}{Pr_t} \frac{\partial T}{\partial x_i}, \quad (96)$$

donde $Pr_t = 0.85$ es el número de Prandtl turbulento. Las constantes del modelo están dadas por:

$$C_\mu = 0.09, C_{1\epsilon} = 1.4, C_{2\epsilon} = 1.92, \sigma_k = 1, \sigma_\epsilon = 1$$

5.3.7. ANSYS Fluent 2022 R1

5.3.7.1 Configuración del modelo (Setup). La página de tarea General permite establecer varias configuraciones de problemas genéricos, como aquellas relacionadas con la malla o el solucionador. Se estableció el valor de la gravedad y se seleccionó las opciones Pressure-Based, Transient y Absolute, como se muestra en la **Figura 55**.

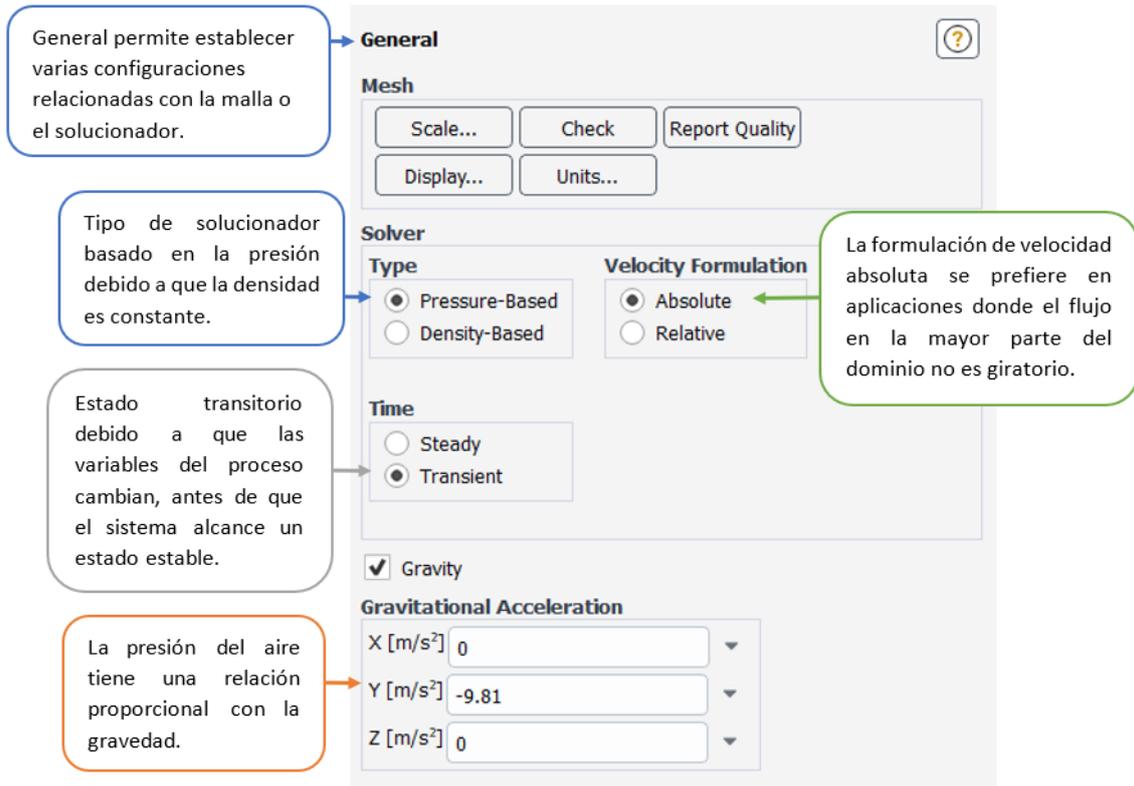


Figura 55. Configuración de los parámetros generales.

Posteriormente, en Models se activó el modelo Energy y se seleccionó el modelo $k - \epsilon$ estándar en ANSYS, como se muestran en las **Figuras 56** y **57** respectivamente. El modelo $k - \epsilon$ es ideal para flujos con alta intensidad de turbulencia y funciona bien en capas límite turbulentas, mientras que el modelo $k - \omega$ es más preciso en flujos donde la capa límite es muy delgada o cerca de la pared.

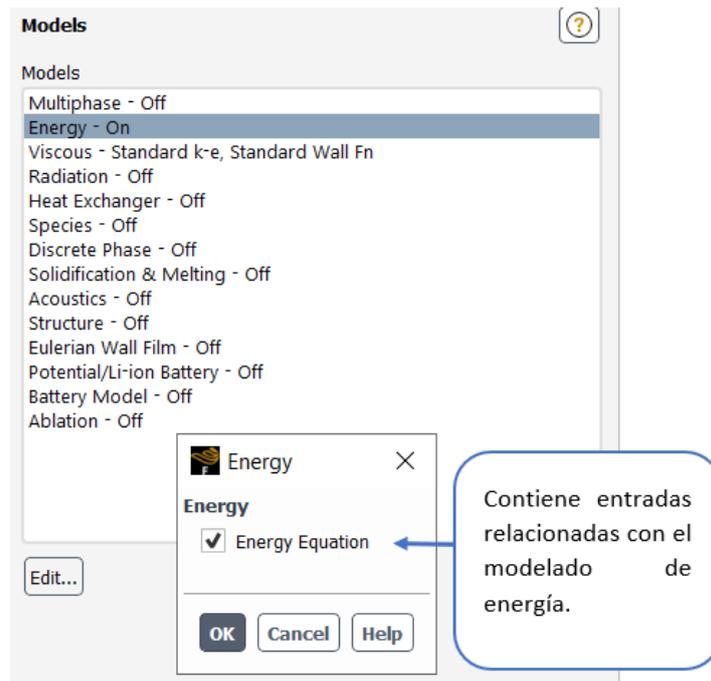


Figura 56. Activación de Energía.

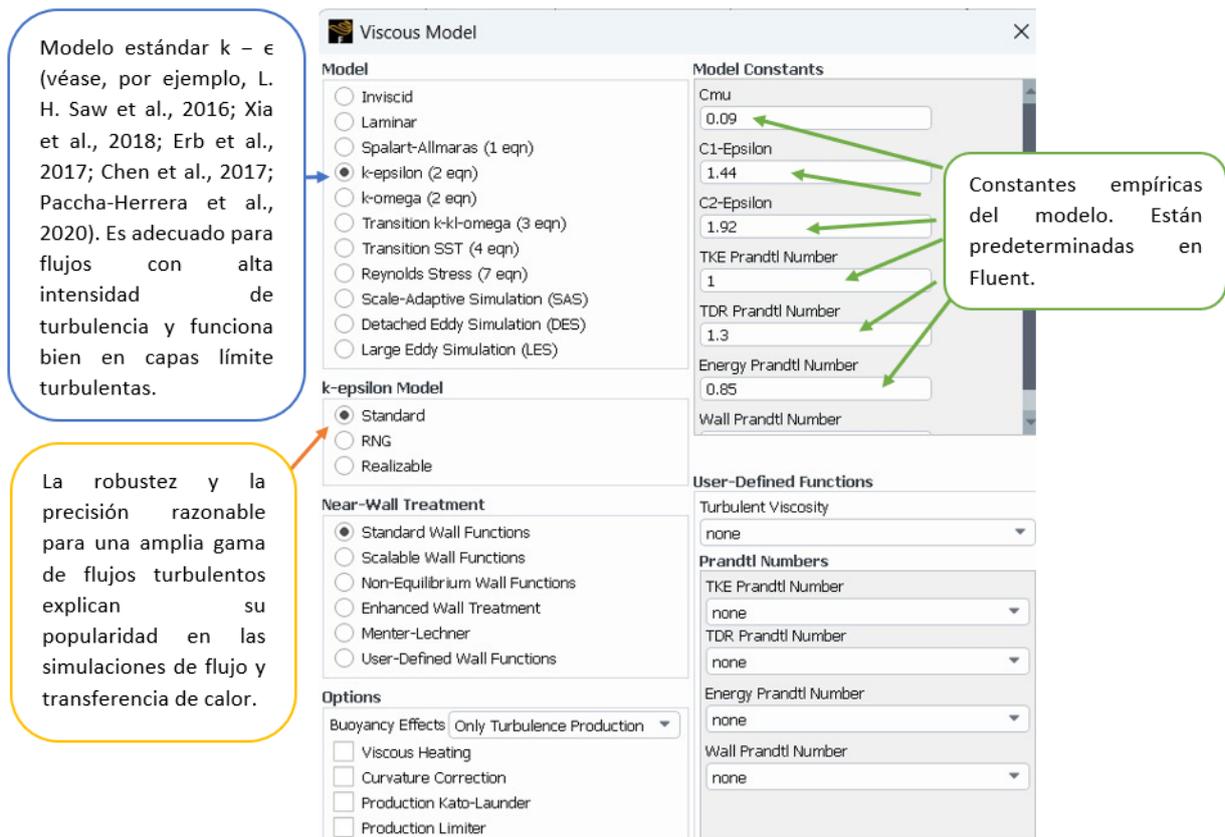


Figura 57. Ventana de opciones del modelo $k - \epsilon$.

Seguidamente, en la opción Materials, se estableció los parámetros térmicos de la celda 18650, acrílico y aire, como se muestran en las Figuras 58, 59 y 60 respectivamente.

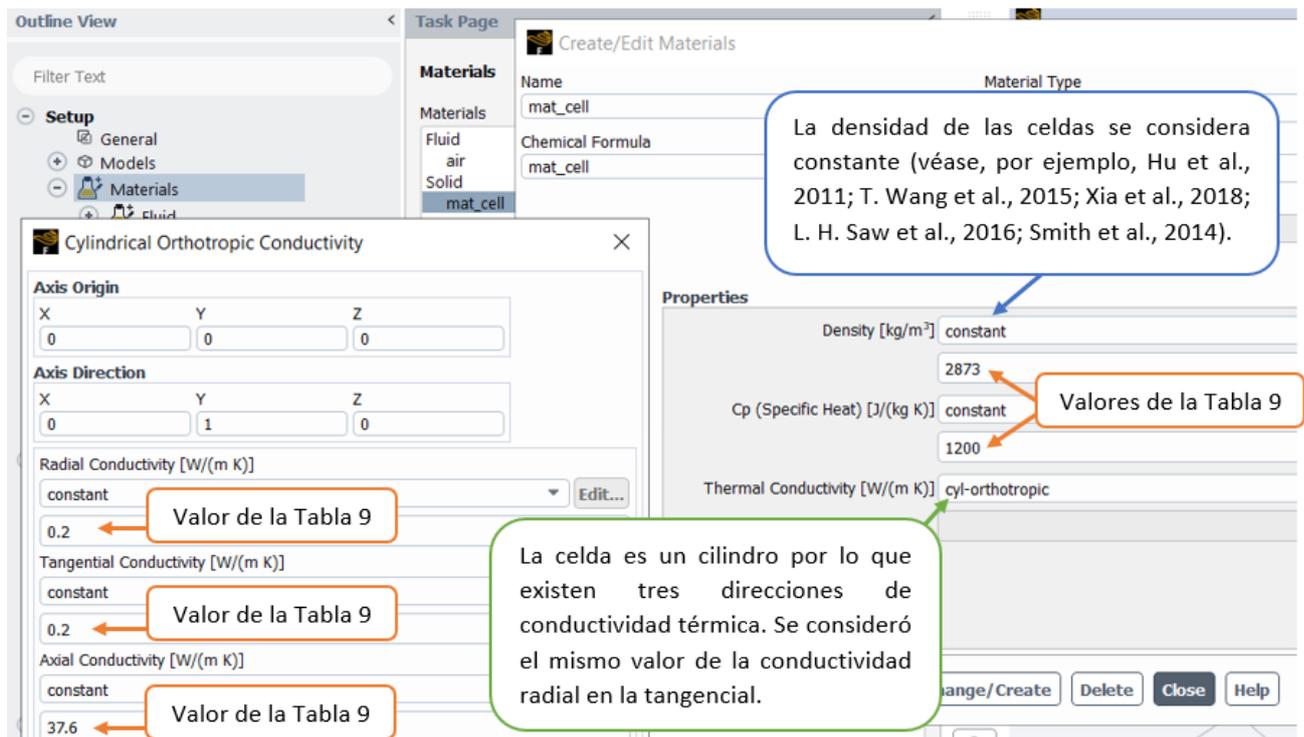


Figura 58. Propiedades térmicas de la celda 18650.

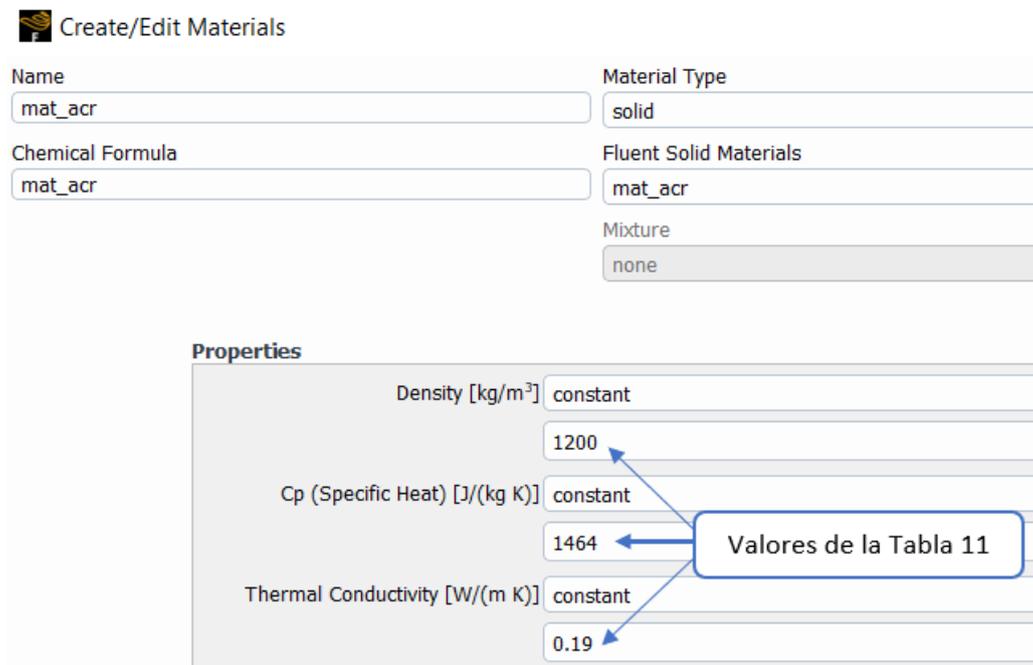


Figura 59. Propiedades térmicas del acrílico.

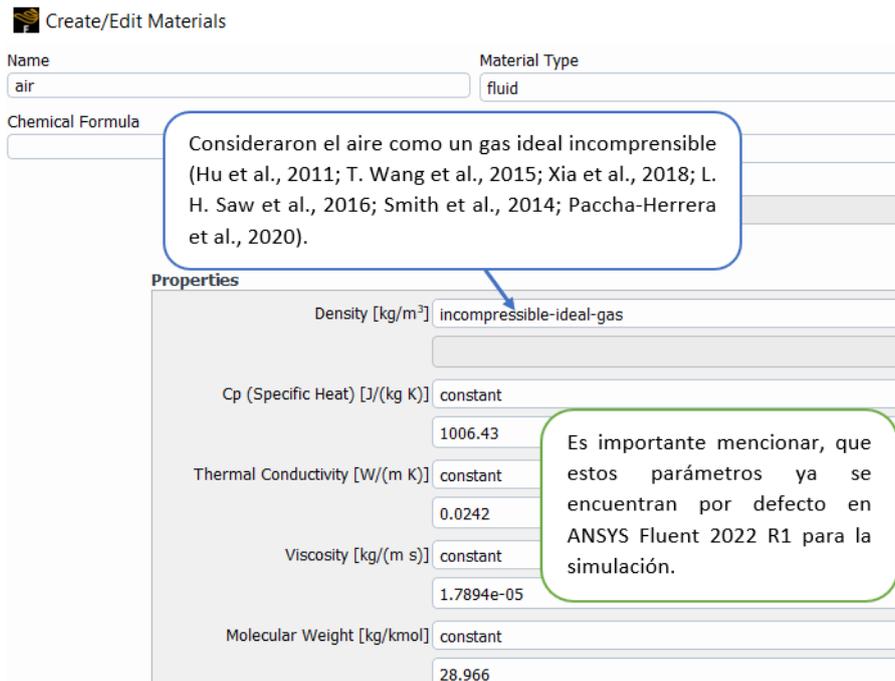


Figura 60. Propiedades térmicas dl aire.

Luego, en Cell Zone Conditions y Boundary Conditions se estableció el valor del término fuente (Source Term) en cada una de las celdas del módulo y las condiciones de contorno que son: la velocidad inicial, presión de salida, la temperatura inicial y coeficiente de convección de la pared del canal con el exterior, como se muestran en las Figuras 61, 62, 63 y 64 respectivamente.

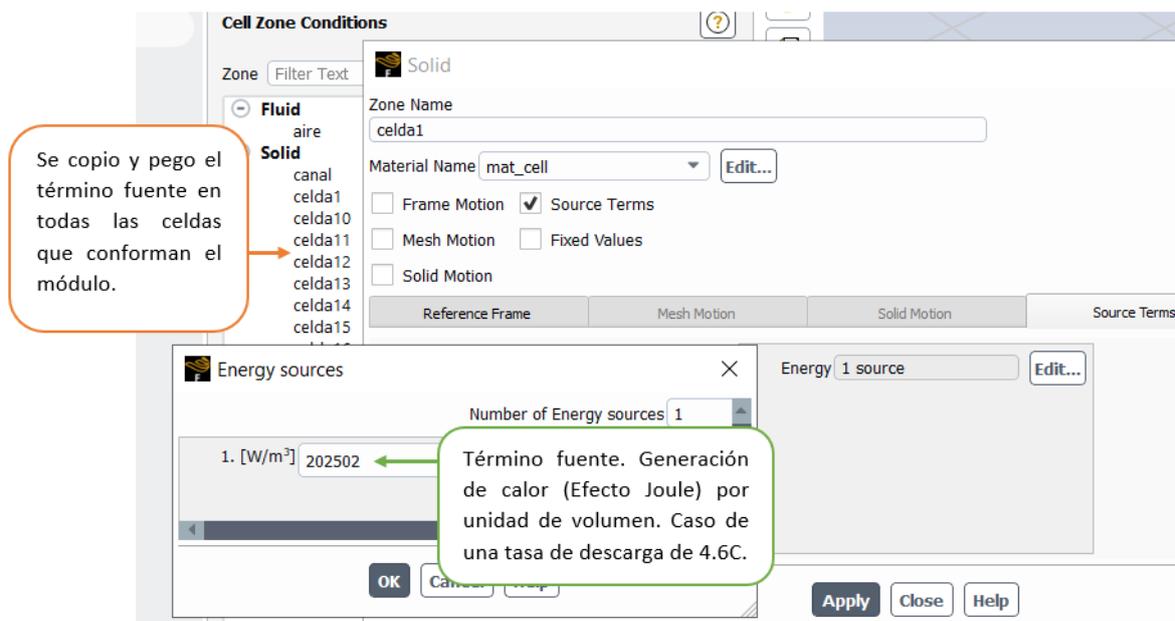


Figura 61. Configuración del término fuente.

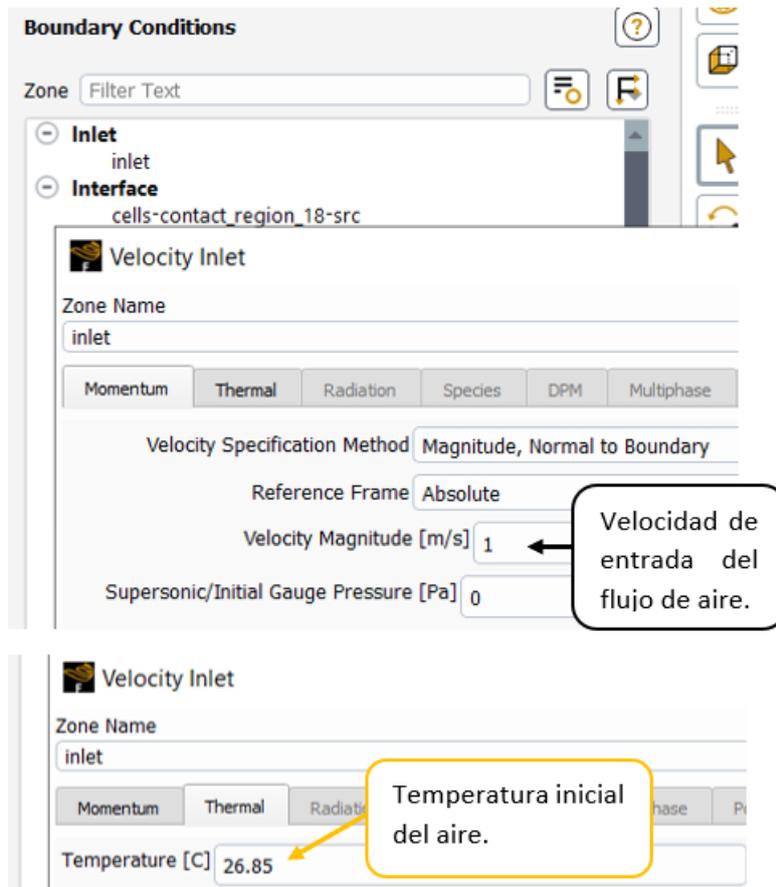


Figura 62. Configuración de la velocidad de entrada.

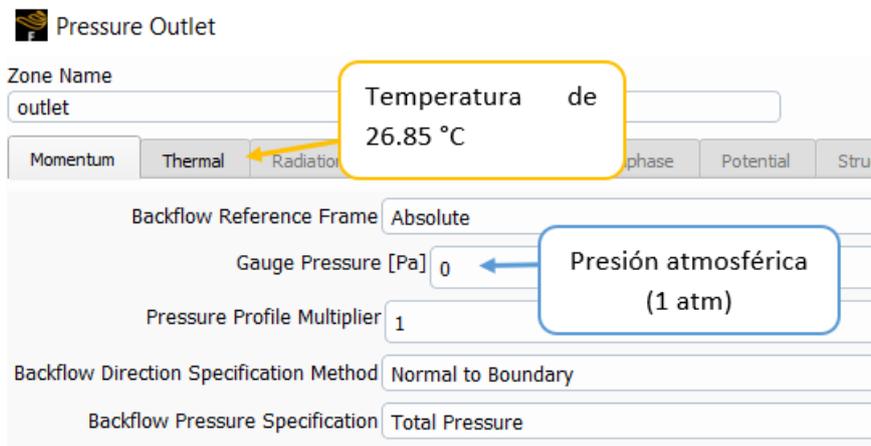


Figura 63. Configuración de la presión de salida.

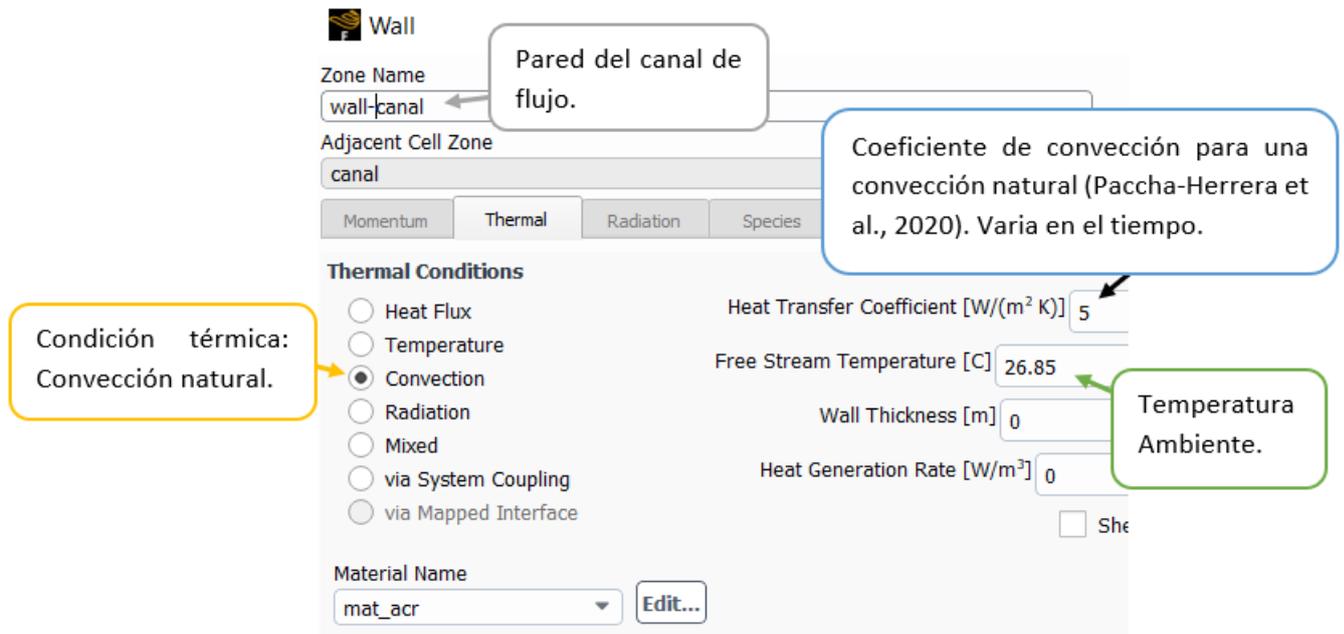


Figura 64. Configuración de pared del canal.

5.3.7.2 Configuración de la solución (Solution). En Methods, se eligió un esquema acoplado y para la discretización espacial de la presión se seleccionó el método PRESTO! (Pressure Staggering Option). Además, se crearon un Report Definitions para cada una de las celdas con el fin de guardar su temperatura al final de la descarga.

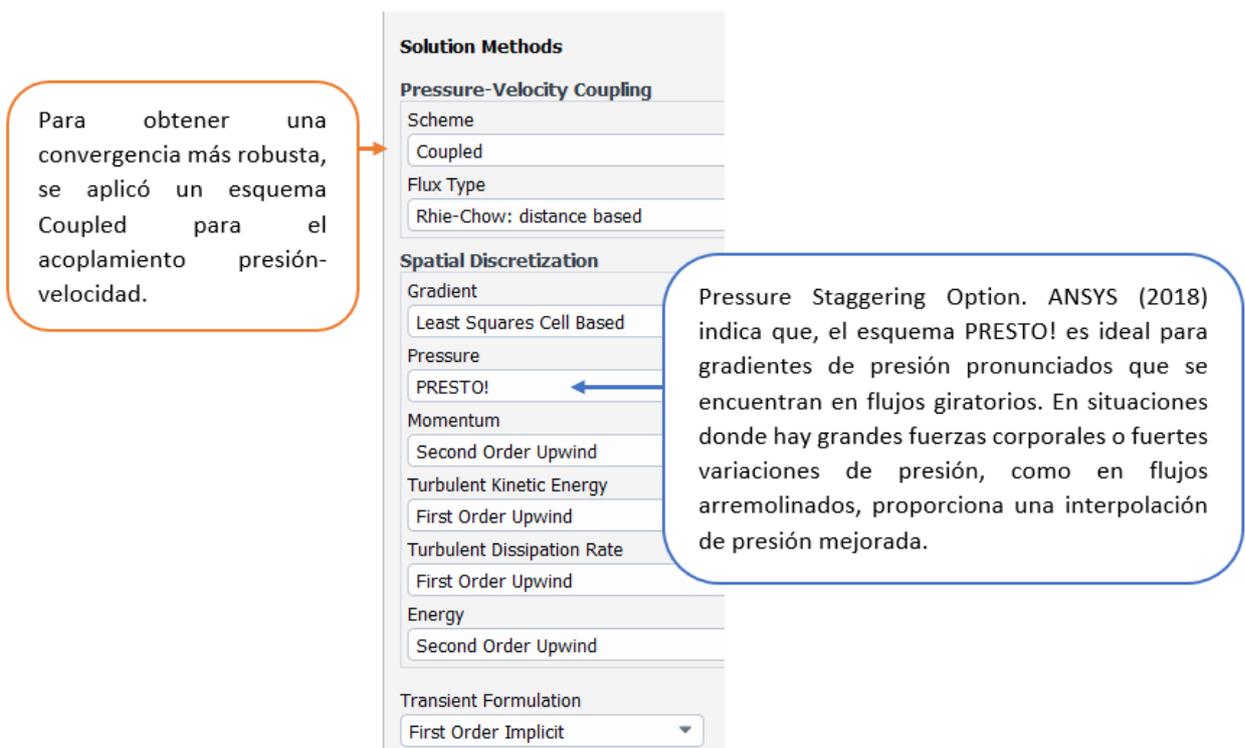


Figura 65. Configuración de Solution Methods.

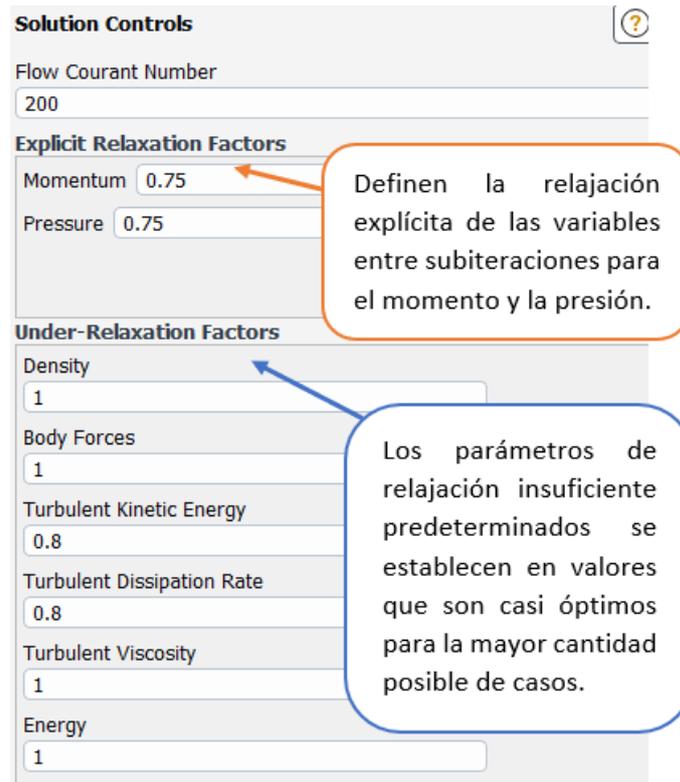


Figura 66. Configuración de Solution Controls.



Figura 67. Report Definitions para cada una de las celdas del módulo.

Finalmente, se configuró un número de iteraciones de 20 y el tiempo de simulación de

acuerdo al tiempo al final de descarga de la celda cilíndrica y se un paso de tiempo de un 1 segundo.

La inicialización estándar permite especificar todas las variables directamente como suposiciones iniciales.

Valores iniciales para las variables de flujo predeterminados. Temperatura de 26.85 °C.

Figura 68. Parámetros de inicialización.

Fijo: selecciona un paso de tiempo fijo, igual al tamaño de paso de tiempo especificado.

Establece la cantidad de pasos de tiempo que se realizarán (para cálculos de flujo transitorio). De acuerdo a la rapidez de descarga.

Establece la magnitud del paso de tiempo (para cálculos de flujo transitorio).

Establece la cantidad máxima de iteraciones que se realizarán por paso de tiempo.

Figura 69. Configuración de Run Calculation.

5.3.7.3 Estudio de mallas. Se generaron las geometrías mediante la herramienta SpaceClaim. Posteriormente, se realizó un mallado híbrido (Paccha-Herrera et al., 2020, F. Zhang, Wang y Yi, 2021). Por lo que, existen capas de inflación alrededor de cada celda (ver **Figura 70**) para capturar los efectos de la capa límite.

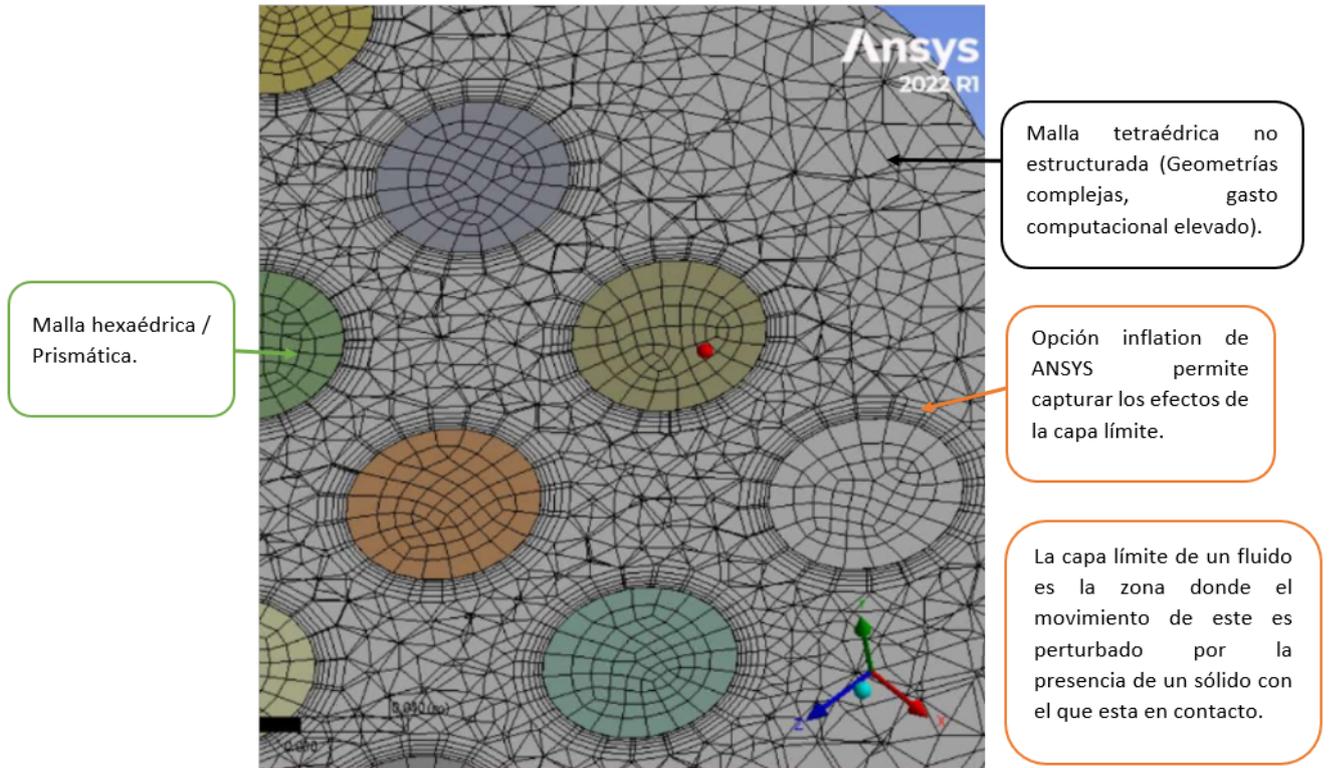


Figura 70. Malla detallada alrededor de las celdas.

Se simuló una prueba con una tasa de descarga de 4.6C y velocidad de 1 m/s en el módulo de batería con 16 celdas para realizar la prueba de independencia de malla en los tres diseños planteados. Se evaluaron cuatro mallas (ver **Tablas 12, 13 y 14**). La temperatura máxima de la celda más caliente al final de la descarga fue el parámetro de comparación entre las mallas. Se seleccionó las mallas con 281025 elementos, 309170 elementos y 295787 elementos, que son las mallas número 4.

Tabla 12. Independencia de malla para el primer diseño.

Descripción	Malla 1	Malla 2	Malla 3	Malla 4
No. de elementos	231099	269511	273029	281506
Inflation	No	Si	Si	Si
Temperatura máxima de la celda 12 (°C)	62.17	64.88	64.79	64.88
Tasa total de transferencia de calor (W)	55.08	55.08	55.08	55.08

Tabla 13. Independencia de malla para el segundo diseño.

Descripción	Malla 1	Malla 2	Malla 3	Malla 4
No. de elementos	290770	295497	299878	309170
Inflation	Si	Si	Si	Si
Temperatura máxima de la celda 15 (°C)	61.11	61.91	61.01	61.53
Tasa total de transferencia de calor (W)	55.08	55.08	55.08	55.08

Tabla 14. Independencia de malla para el tercer diseño.

Descripción	Malla 1	Malla 3	Malla 2	Malla 4
No. de elementos	285690	288085	290487	295787
Inflation	Si	Si	Si	Si
Temperatura máxima de la celda 13 (°C)	62.85	62.64	62.74	62.95
Tasa total de transferencia de calor (W)	55.08	55.08	55.08	55.08

Para la mayoría de los problemas, el criterio de convergencia predeterminado en ANSYS FLUENT es suficiente. Este criterio requiere que los residuos escalados disminuyan a 10^{-3} para todas las ecuaciones, excepto las ecuaciones de energía que el criterio es 10^{-6} . En este caso, el criterio de convergencia fue una vez que los residuales tomaron un valor por debajo de $1 \cdot 10^{-4}$ para las ecuaciones de continuidad, velocidad y energía.

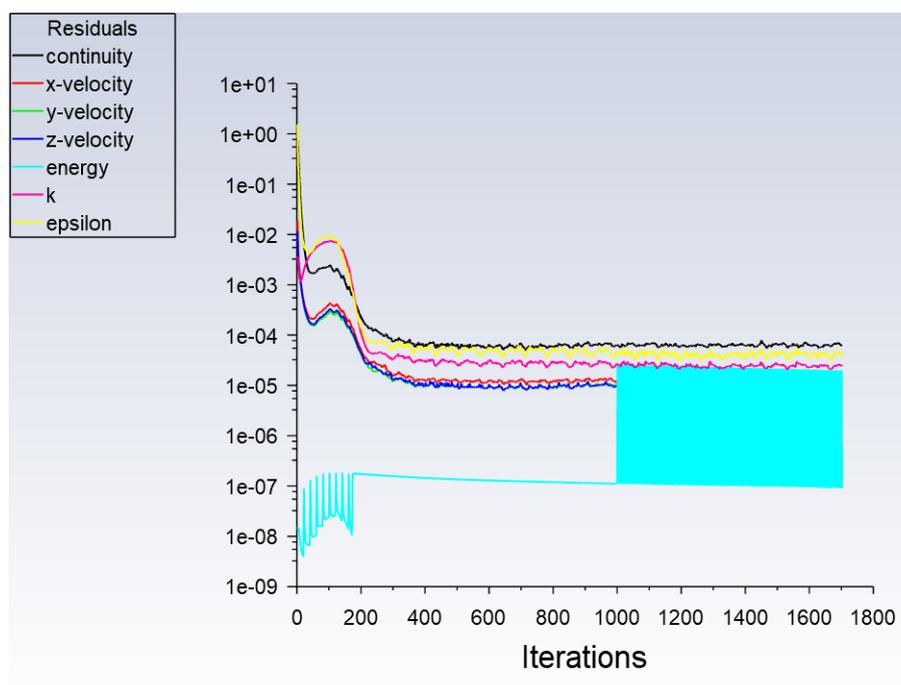


Figura 71. Residuales primer diseño.

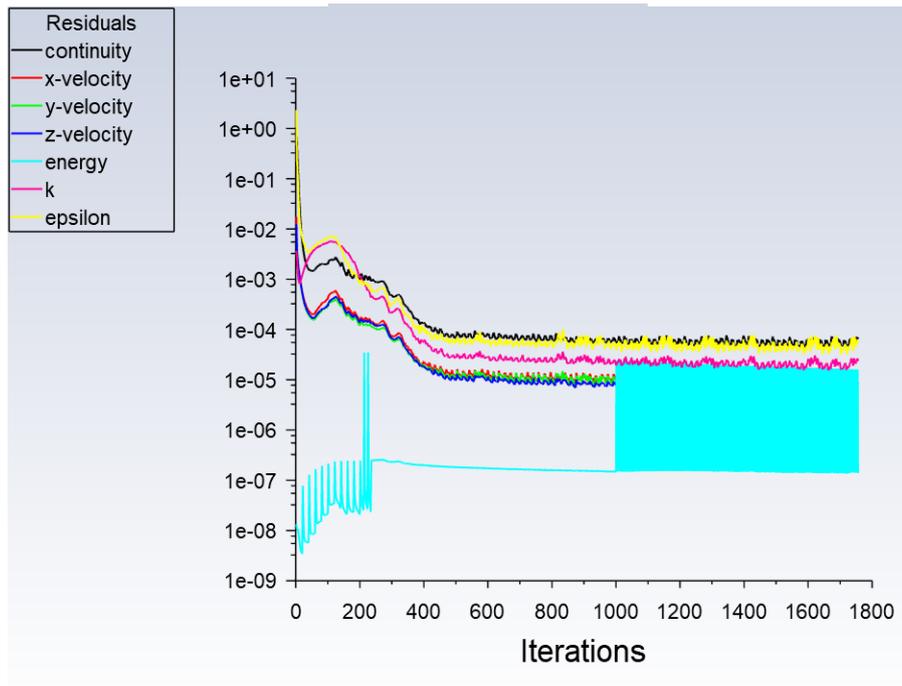


Figura 72. Residuales segundo diseño.

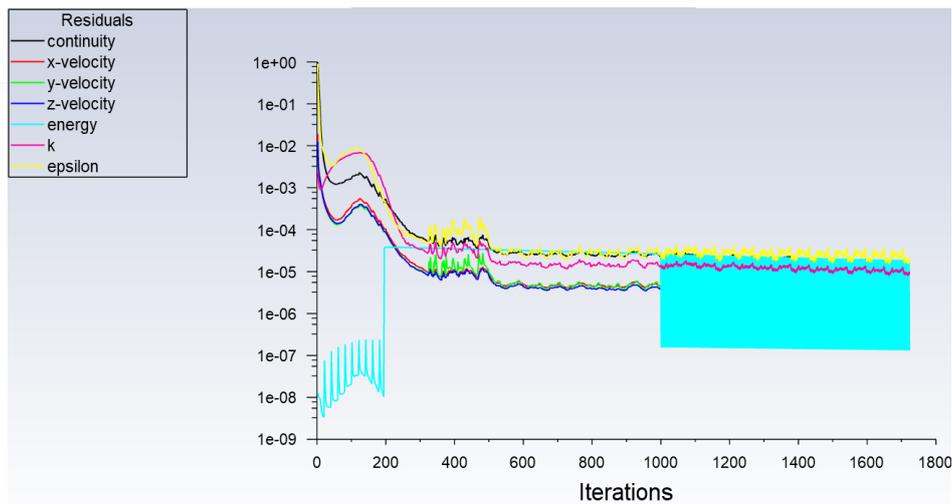


Figura 73. Residuales tercer diseño.

5.3.8. Figuras y Tablas

Al finalizar la simulación se extrajo las temperaturas resultantes de los reports definitions de la simulación. Seguidamente, se procedió a la creación de gráficas con los datos de las tablas para observar el comportamiento de la temperatura mediante Python. Por otro lado, la generación de los contornos de colores de los resultados corresponden al post-procesamiento. En la opción Results de la **Figura 74** se pueden crear los contornos de colores y vectores de los resultados de las variables que se desea analizar.

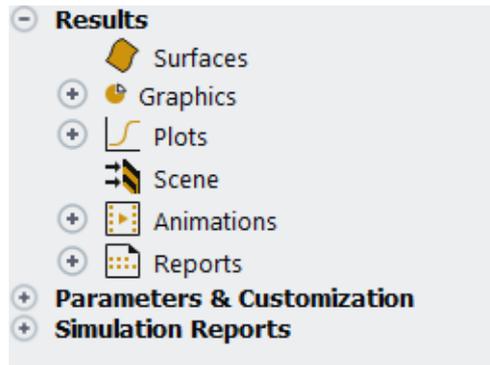


Figura 74. Árbol de opciones de Results.

5.3.9. Validación de resultados

La evaluación del comportamiento térmico del banco de baterías se basa en los siguientes aspectos:

- La temperatura ambiente alrededor del banco es de 300 K y la presión atmosférica a la entrada y salida del flujo de aire es de 101 325 Pa a nivel del mar.
- Las pruebas se realizaron con tasas de descarga de 1C, 2C, 3C, 4.6C y un perfil de corriente de descarga variable para simular las condiciones de uso reales.
- Los límites de temperatura seguros para la celda cilíndrica modelo ICR18650-22P se detalla en la Tabla 8.
- El diseño del sistema de refrigeración o disipación de calor del banco de baterías.
- Comparación con resultados de investigaciones acerca del comportamiento térmico de las LIBs.

6. Resultados

Se evaluó el comportamiento térmico de un módulo de batería con dieciséis celdas cilíndricas 18650 en tres diseños con diferente configuración geométrica, como se ilustran en las **Figuras** 48, 49 y 50. El proceso de enfriamiento del módulo fue mediante convección forzada con flujo unidireccional. Este fenómeno fue modelado utilizando el modelo $k - \varepsilon$ estándar bajo tres velocidades: 1, 1.5 m/s y 2 m/s a tasas de descarga de 1C, 2C, 3C, 4.6C y un perfil de corriente variable. La generación de calor en cada celda es uno de los parámetros más importantes a tener en cuenta para realizar las simulaciones. No se consideró el efecto del envejecimiento de las celdas.

6.1. Perfil de Temperatura a 1C con velocidad de 1 m/s

La **Figura** 75 muestra las temperaturas registradas en cada celda en grados Celsius a una velocidad de 1 m/s para los tres diseños y la diferencia de temperatura entre la celda más caliente y la más fría.

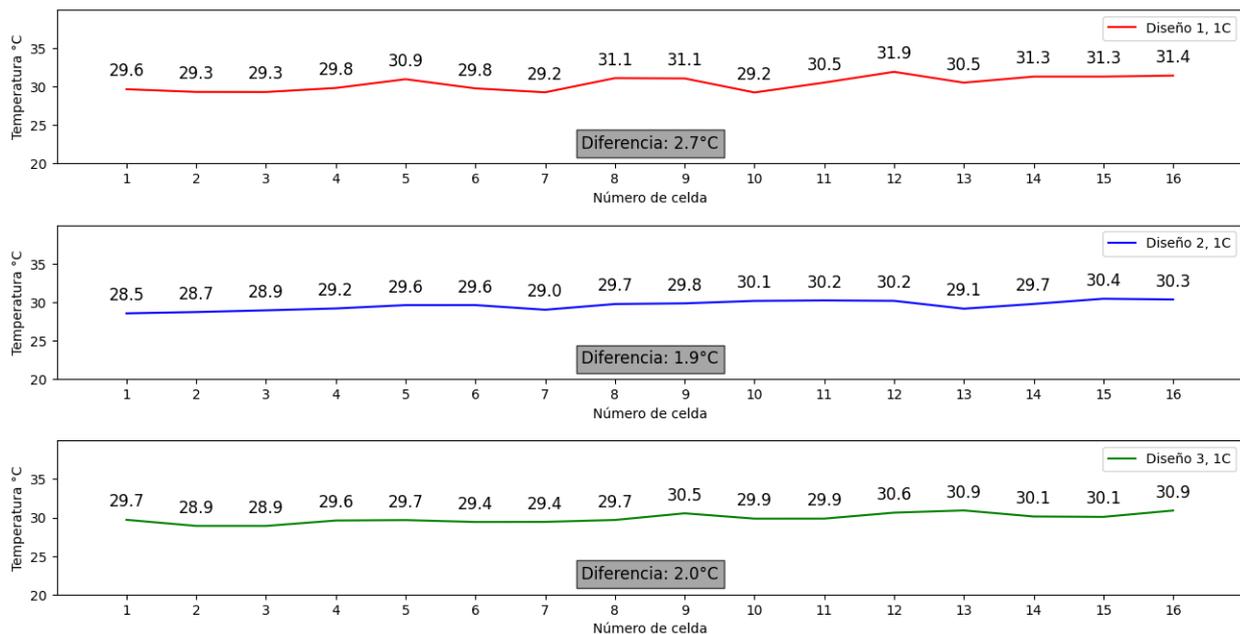


Figura 75. Temperaturas de las celdas a una velocidad de 1 m/s

6.2. Perfil de Temperatura a 1C con velocidad de 1.5 m/s

La **Figura** 76 muestra las temperaturas registradas en cada celda en grados Celsius a una velocidad de 1.5 m/s para los tres diseños y la diferencia de temperatura entre la celda más caliente y la más fría.

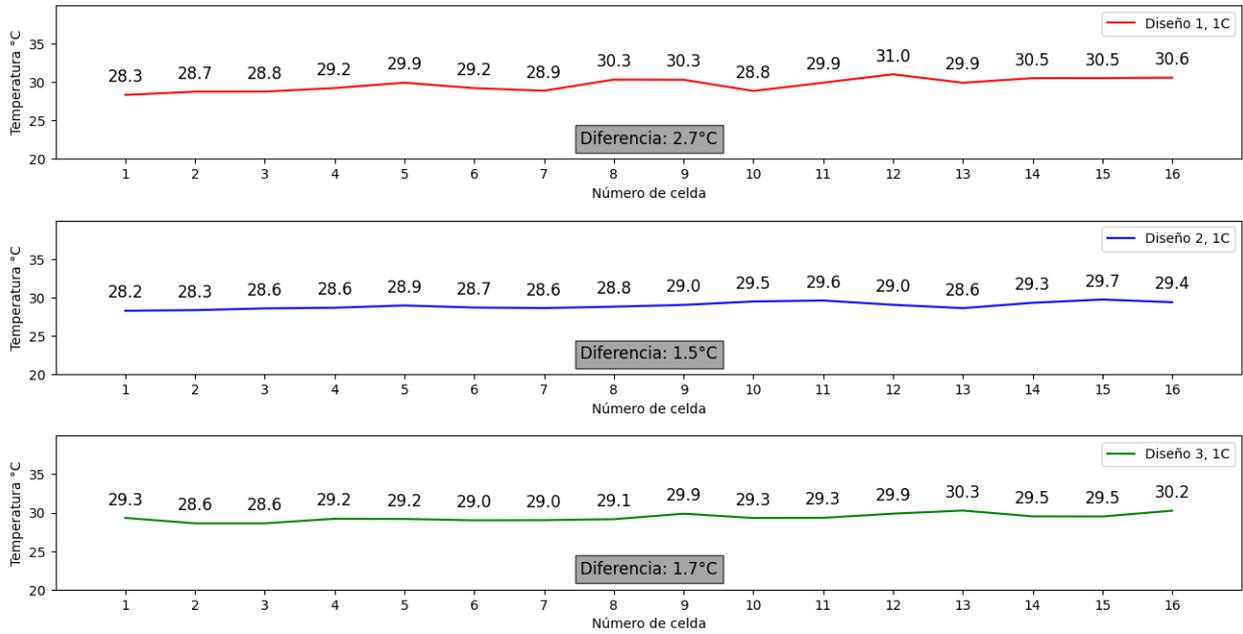


Figura 76. Temperaturas de las celdas a una velocidad de 1.5 m/s

6.3. Perfil de Temperatura a 1C con velocidad de 2 m/s

La Figura 77 muestra las temperaturas registradas en cada celda en grados Celsius a una velocidad de 2 m/s para los tres diseños y la diferencia de temperatura entre la celda más caliente y la más fría.

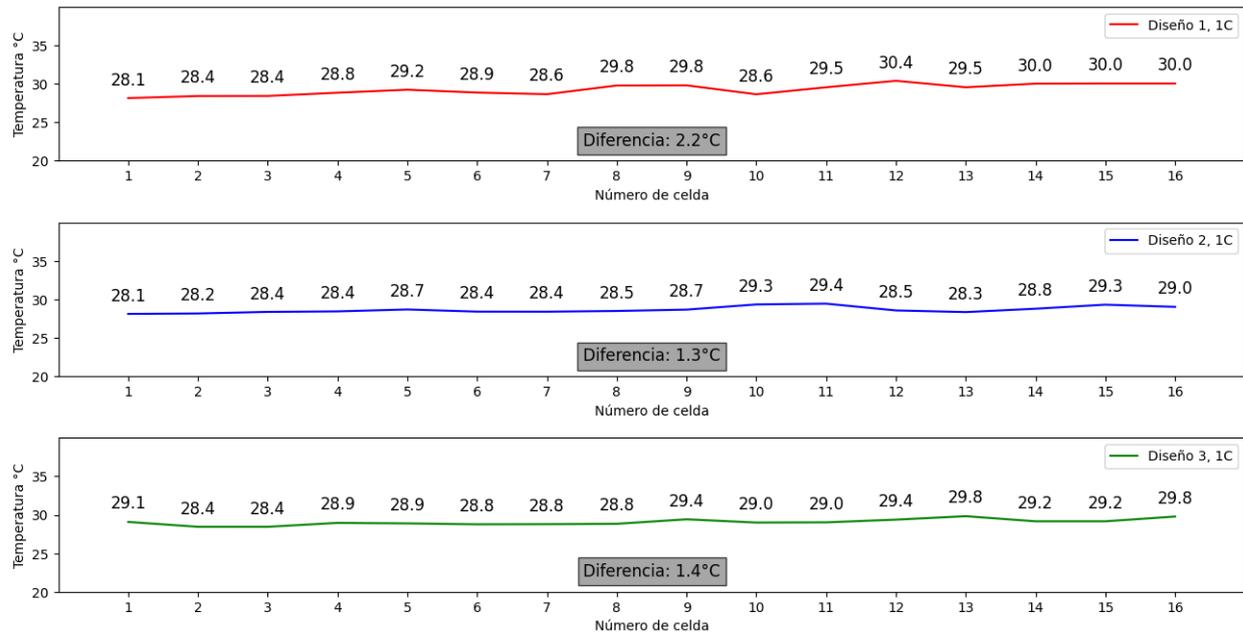


Figura 77. Temperaturas de las celdas a una velocidad de 2 m/s

6.4. Perfil de Temperatura a 2C con velocidad de 1 m/s

La **Figura 78** muestra las temperaturas registradas en cada celda en grados Celsius a una velocidad de 1 m/s para los tres diseños y la diferencia de temperatura entre la celda más caliente y la más fría.

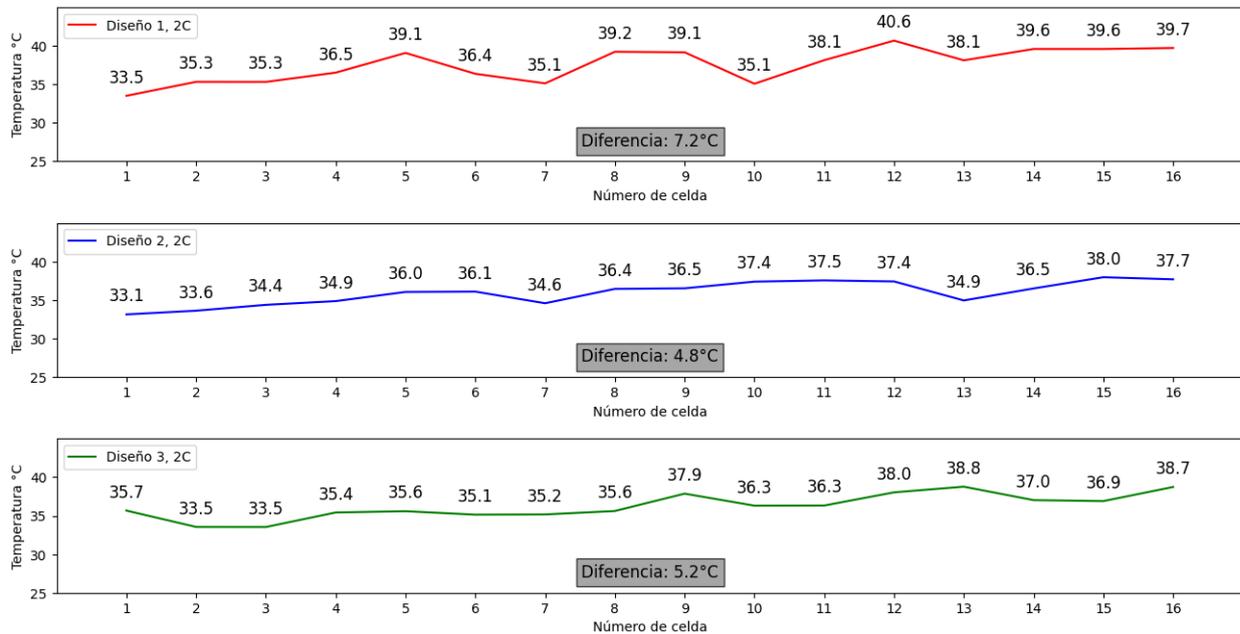


Figura 78. Temperaturas de las celdas a una velocidad de 1 m/s

6.5. Perfil de Temperatura a 2C con velocidad de 1.5 m/s

La **Figura 79** muestra las temperaturas registradas en cada celda en grados Celsius a una velocidad de 1.5 m/s para los tres diseños y la diferencia de temperatura entre la celda más caliente y la más fría.

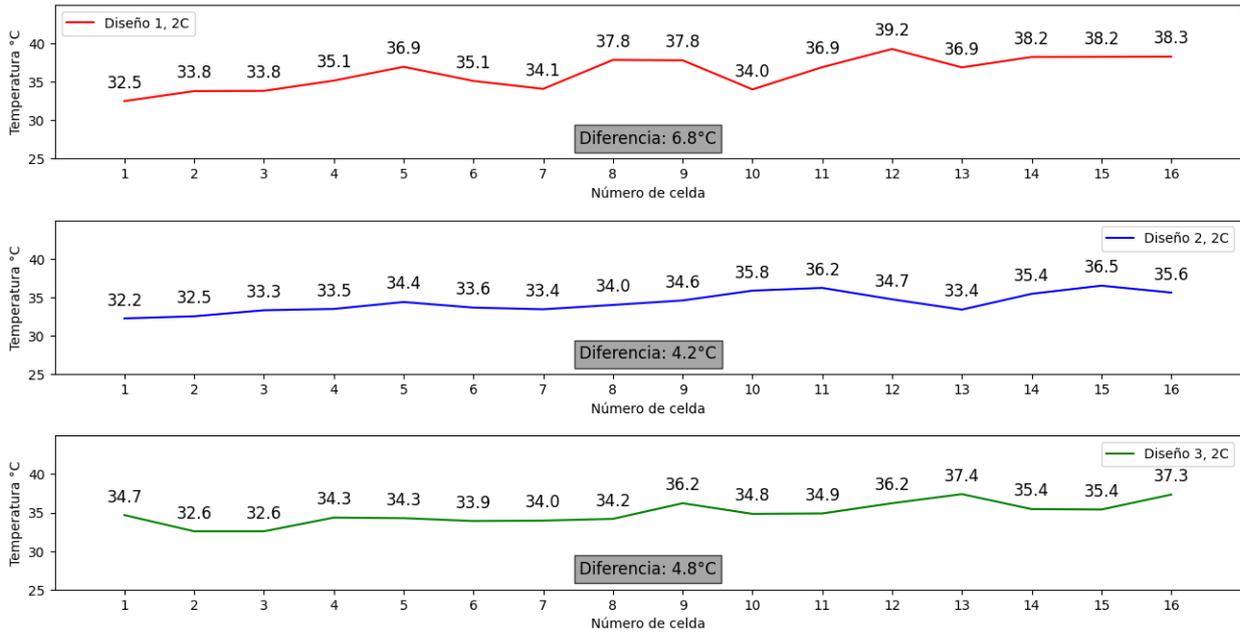


Figura 79. Temperaturas de las celdas a una velocidad de 1.5 m/s

6.6. Perfil de Temperatura a 2C con velocidad de 2 m/s

La Figura 80 muestra las temperaturas registradas en cada celda en grados Celsius a una velocidad de 2 m/s para los tres diseños y la diferencia de temperatura entre la celda más caliente y la más fría.

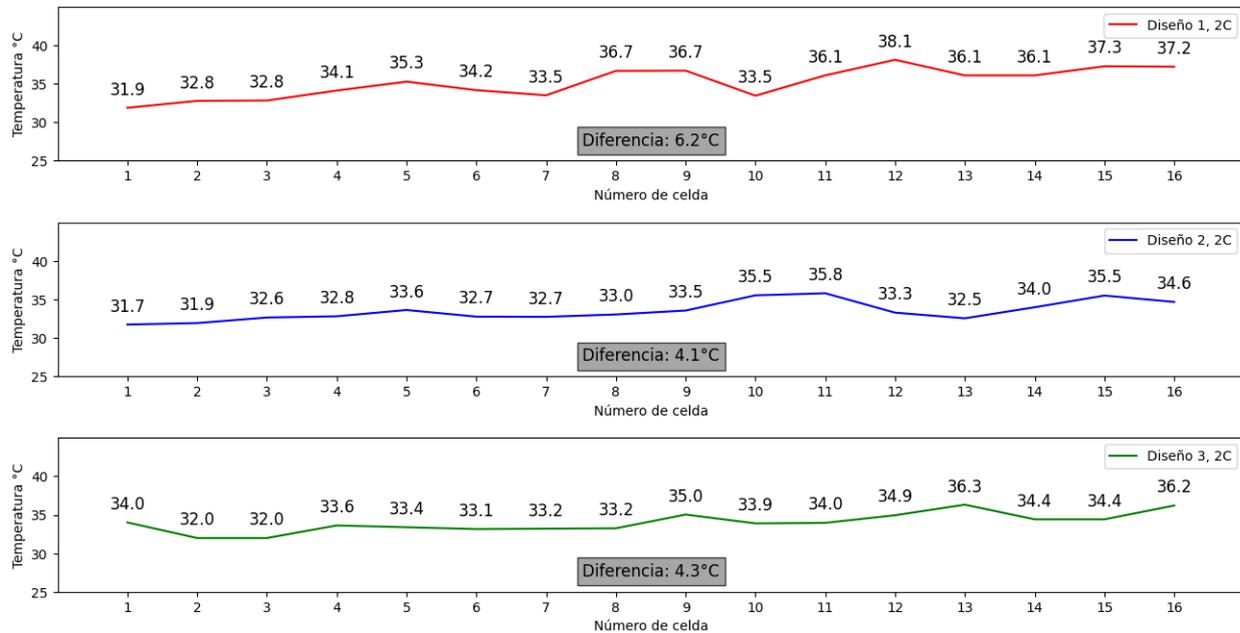


Figura 80. Temperaturas de las celdas a una velocidad de 2 m/s

6.7. Perfil de Temperatura a 3C con velocidad de 1 m/s

La **Figura 81** muestra las temperaturas registradas en cada celda en grados Celsius a una velocidad de 1 m/s para los tres diseños y la diferencia de temperatura entre la celda más caliente y la más fría.

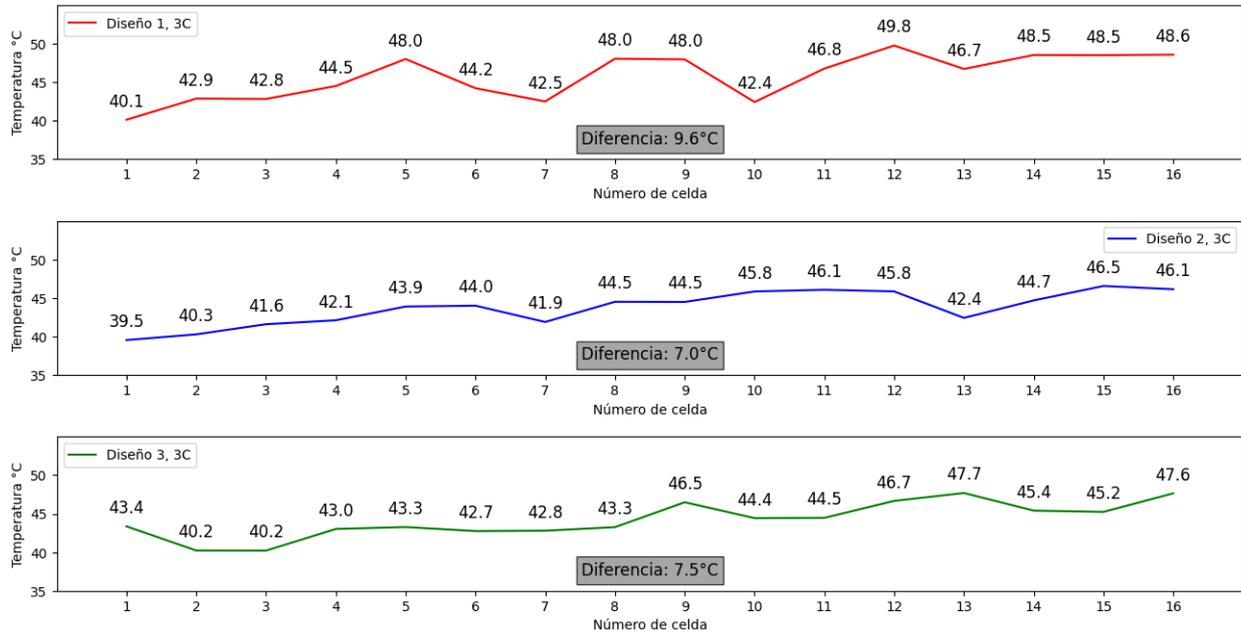


Figura 81. Temperaturas de las celdas a una velocidad de 1 m/s

6.8. Perfil de Temperatura a 3C con velocidad de 1.5 m/s

La **Figura 82** muestra las temperaturas registradas en cada celda en grados Celsius a una velocidad de 1.5 m/s para los tres diseños y la diferencia de temperatura entre la celda más caliente y la más fría.

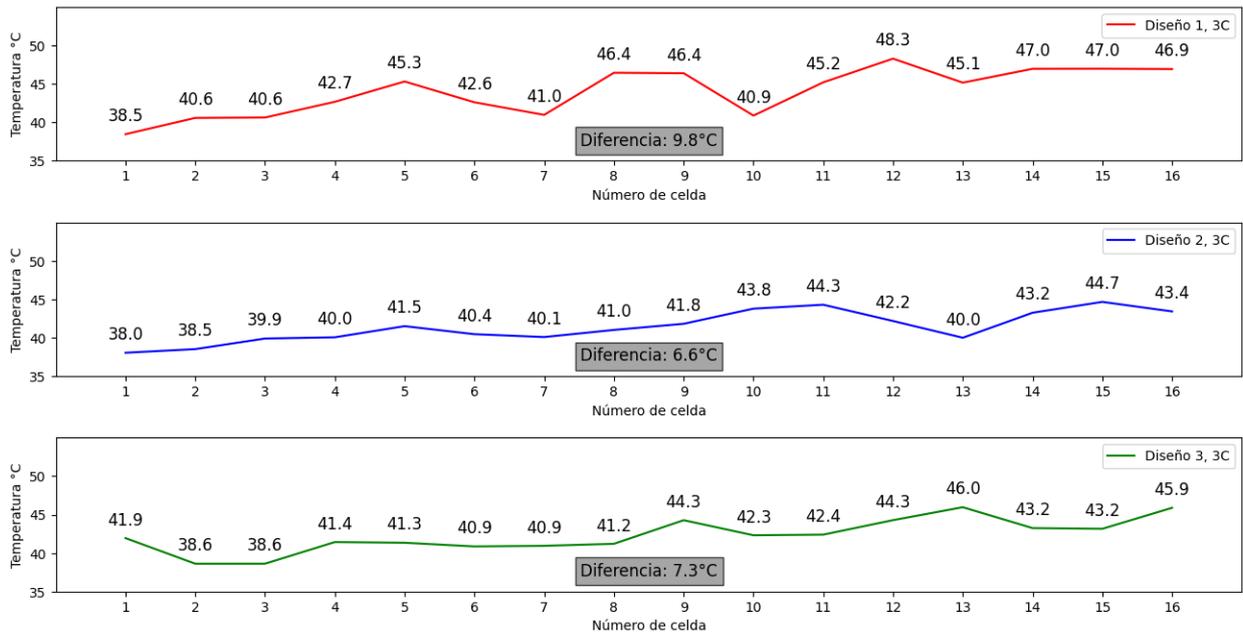


Figura 82. Temperaturas de las celdas a una velocidad de 1.5 m/s

6.9. Perfil de Temperatura a 3C con velocidad de 2 m/s

La Figura 83 muestra las temperaturas registradas en cada celda en grados Celsius a una velocidad de 2 m/s para los tres diseños y la diferencia de temperatura entre la celda más caliente y la más fría.

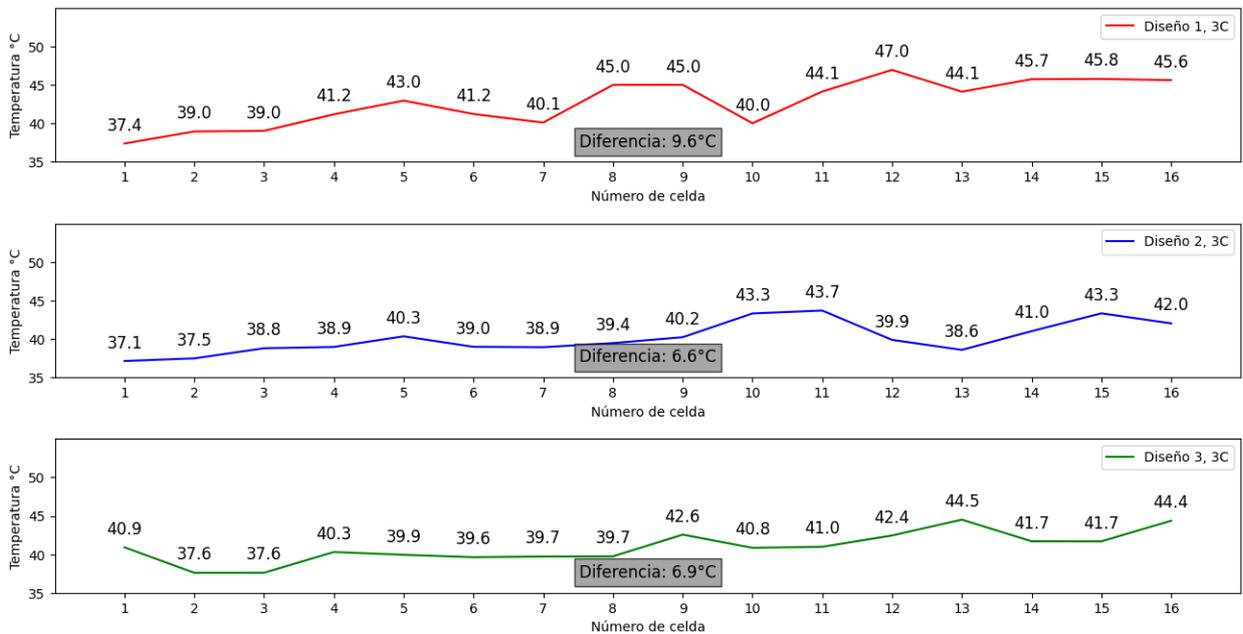


Figura 83. Temperaturas de las celdas a una velocidad de 2 m/s

6.10. Perfil de Temperatura a 4.6C con velocidad de 1 m/s

La **Figura 84** muestra las temperaturas registradas en cada celda en grados Celsius a una velocidad de 1 m/s para los tres diseños y la diferencia de temperatura entre la celda más caliente y la más fría.

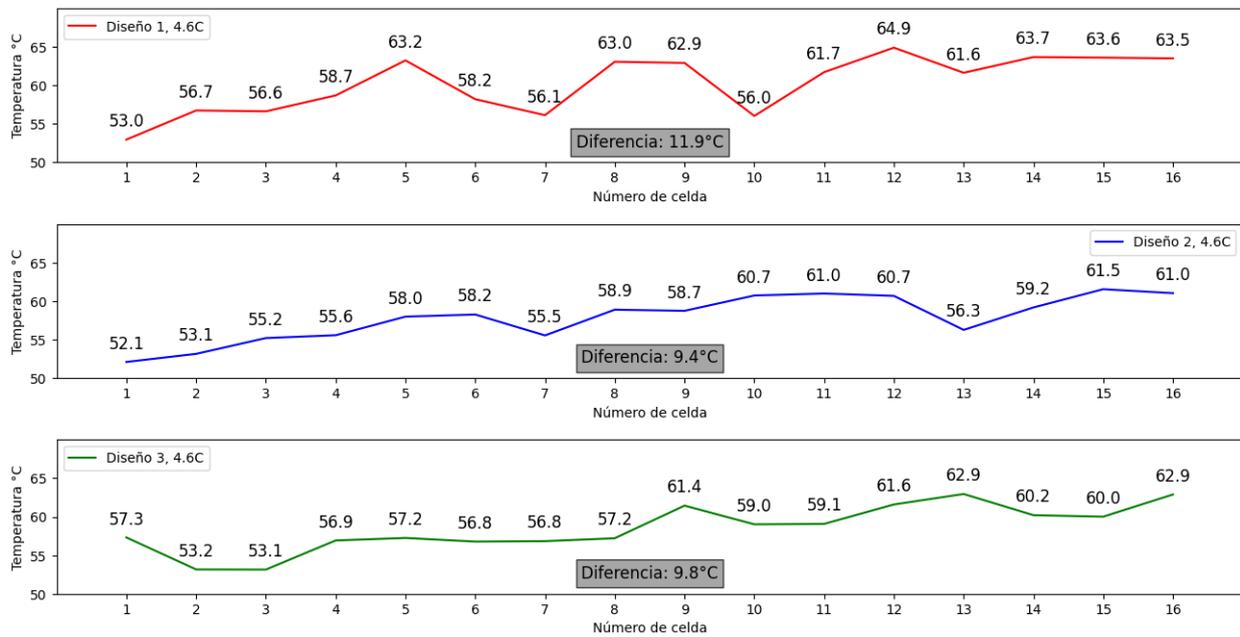


Figura 84. Temperaturas de las celdas a una velocidad de 1 m/s

6.11. Perfil de Temperatura a 4.6C con velocidad de 1.5 m/s

La **Figura 85** muestra las temperaturas registradas en cada celda en grados Celsius a una velocidad de 1.5 m/s para los tres diseños y la diferencia de temperatura entre la celda más caliente y la más fría.

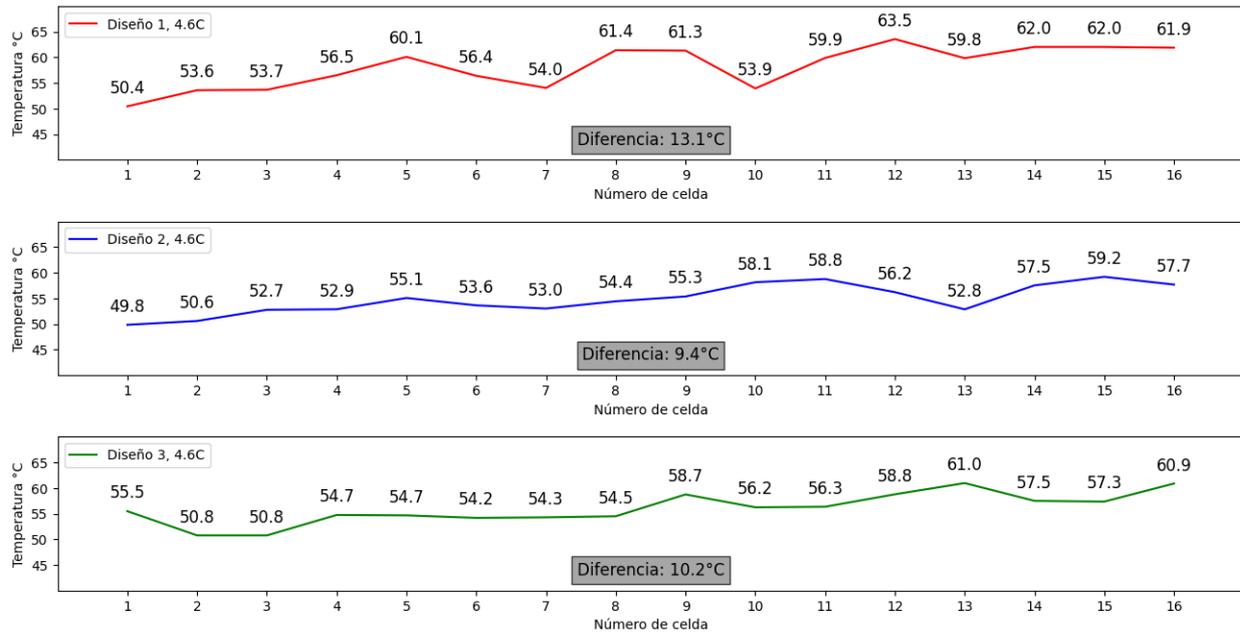


Figura 85. Temperaturas de las celdas a una velocidad de 1.5 m/s

6.12. Perfil de Temperatura a 4.6C con velocidad de 2 m/s

La Figura 86 muestra las temperaturas registradas en cada celda en grados Celsius a una velocidad de 2 m/s para los tres diseños y la diferencia de temperatura entre la celda más caliente y la más fría.

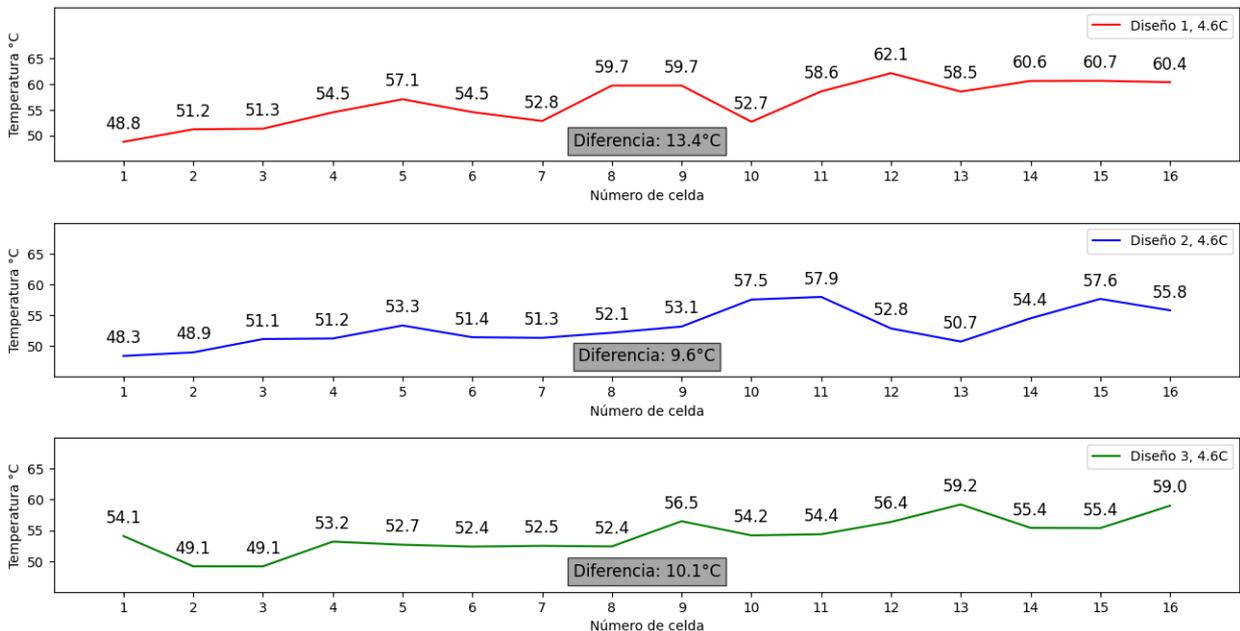


Figura 86. Temperaturas de las celdas a una velocidad de 2 m/s

6.13. ΔT entre la celda más caliente y la más fría

Las Figuras 87 y 88 muestran las diferencias de temperaturas entre la celda con mayor temperatura y la de menor a velocidades de 1 m/s y 2 m/s correspondientes a los tres diseños.

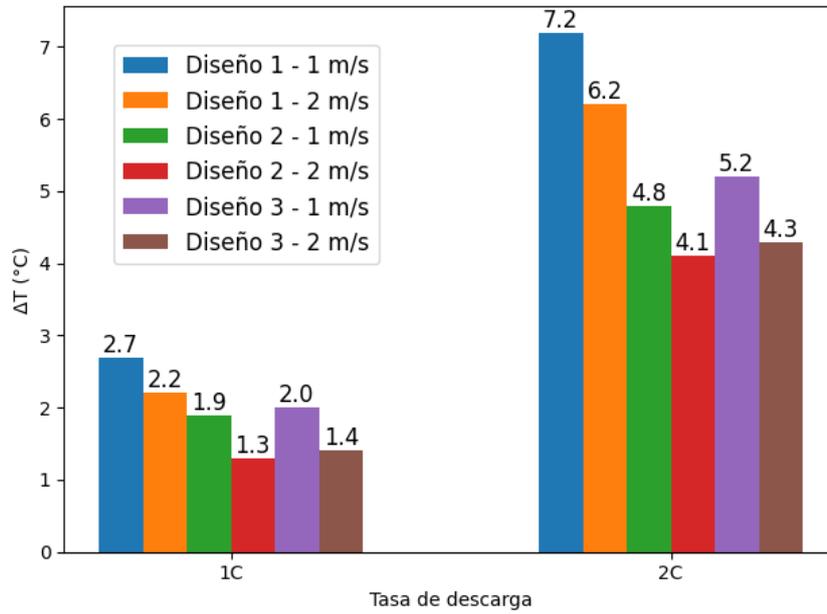


Figura 87. ΔT a 1C y 2C a velocidades de 1 m/s y 2 m/s.

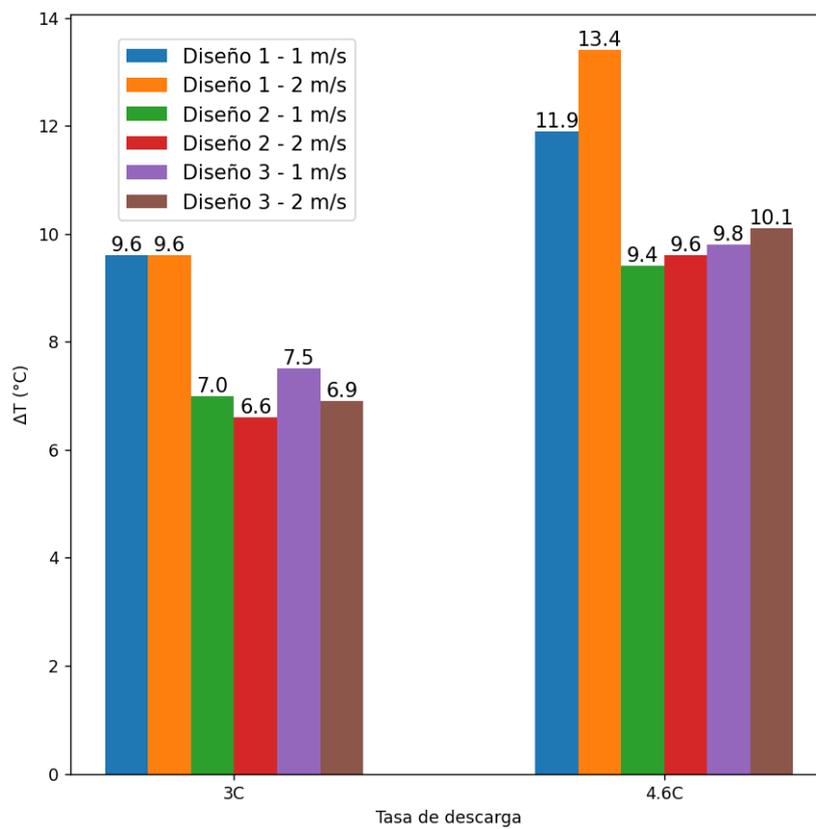


Figura 88. ΔT a 3C y 4.6C a velocidades de 1 m/s y 2 m/s.

6.14. Distribución de temperatura y flujo de aire

6.14.1. Diseño 1

Las Figuras 89, 90, 91 y 92 corresponde a los contornos de colores de las temperaturas y campos de velocidades entre las celdas. Se observa que la zona crítica se encuentra alrededor de la celda 12, que corresponden a las celdas 5, 8, 9, 11, 13, 14, 15 y 16, esto se evidencia en las diferentes tasas de descarga (ver Anexo 2). Así mismo, los resultados muestran que las temperaturas en las celdas 2 y 3, que se encuentran cerca de la entrada de aire, son menores a comparación de las demás. Además, se aprecia que la velocidad máxima del aire local es de 1.64 m/s cuando la velocidad de entrada del aire en el canal era de 1 m/s y 2.73 m/s cuando la velocidad de entrada del aire es de 2 m/s.

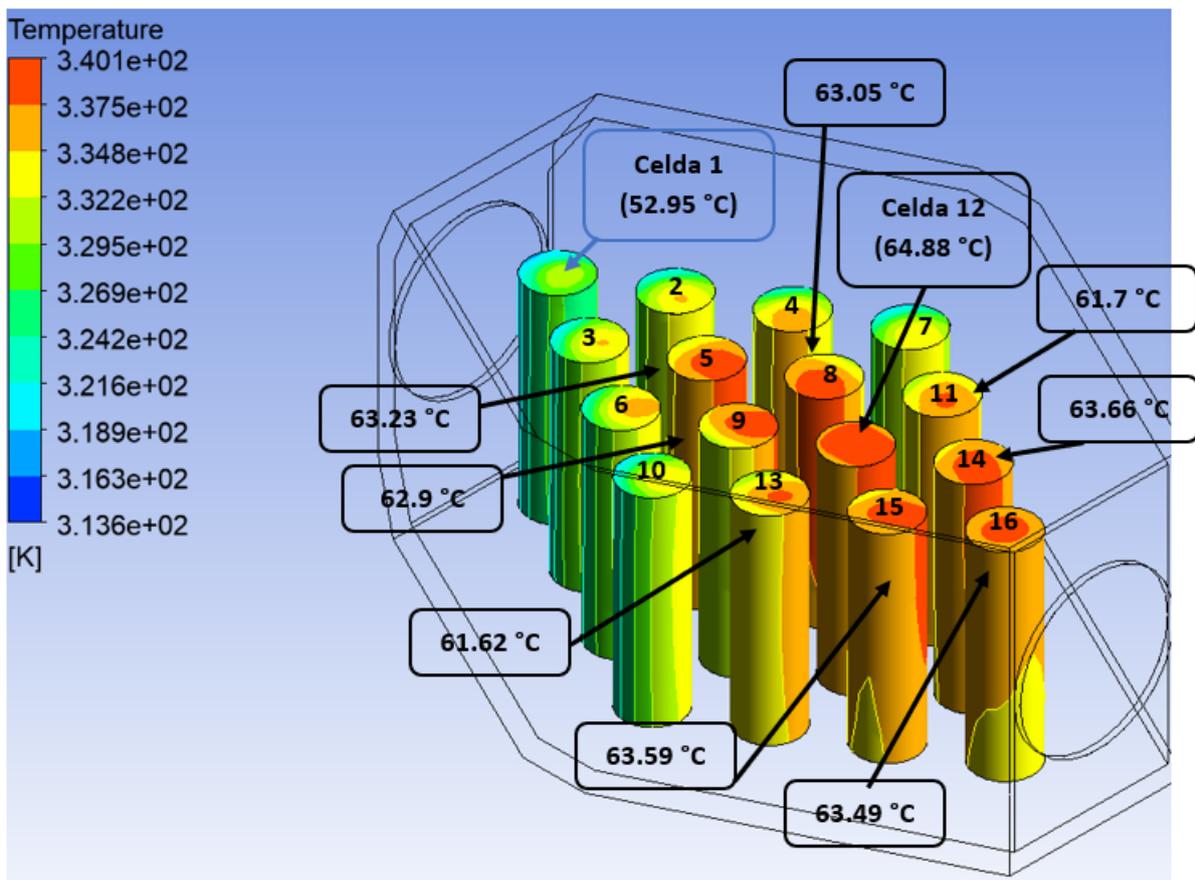


Figura 89. Distribución de temperatura a 4.6C a velocidad de 1 m/s.

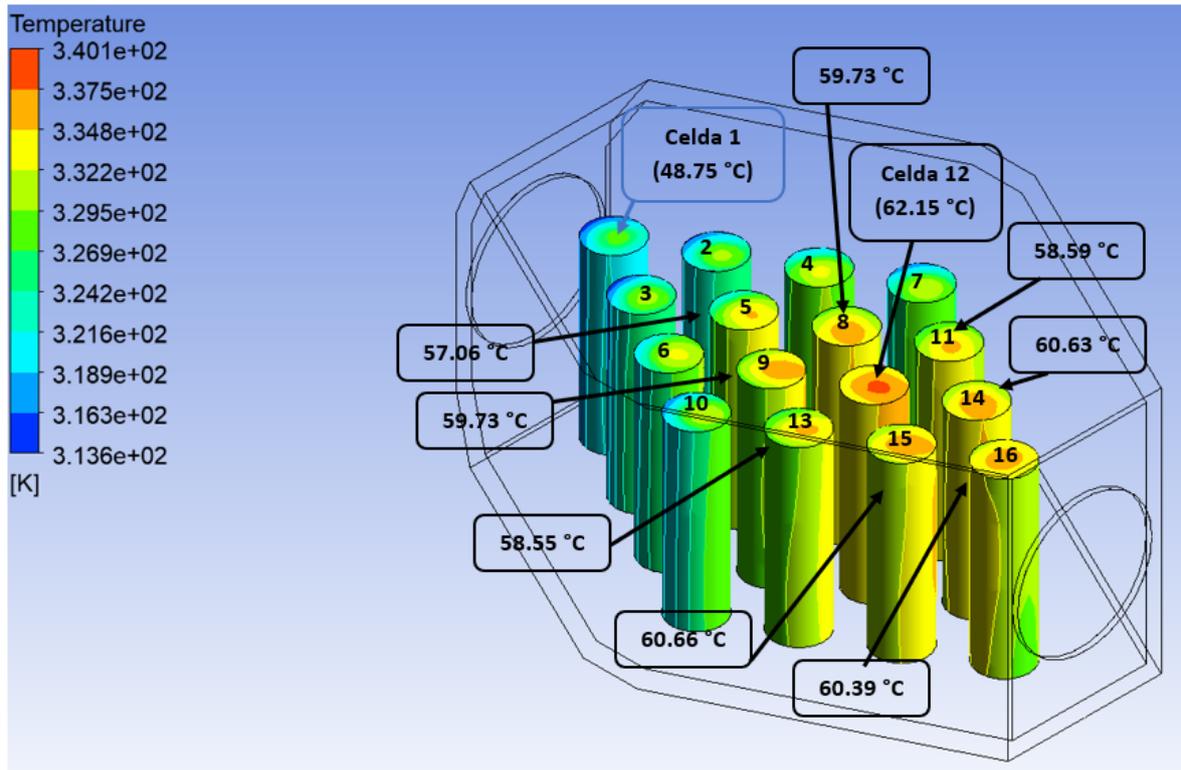


Figura 90. Distribución de temperatura a 4.6C a velocidad de 2 m/s.

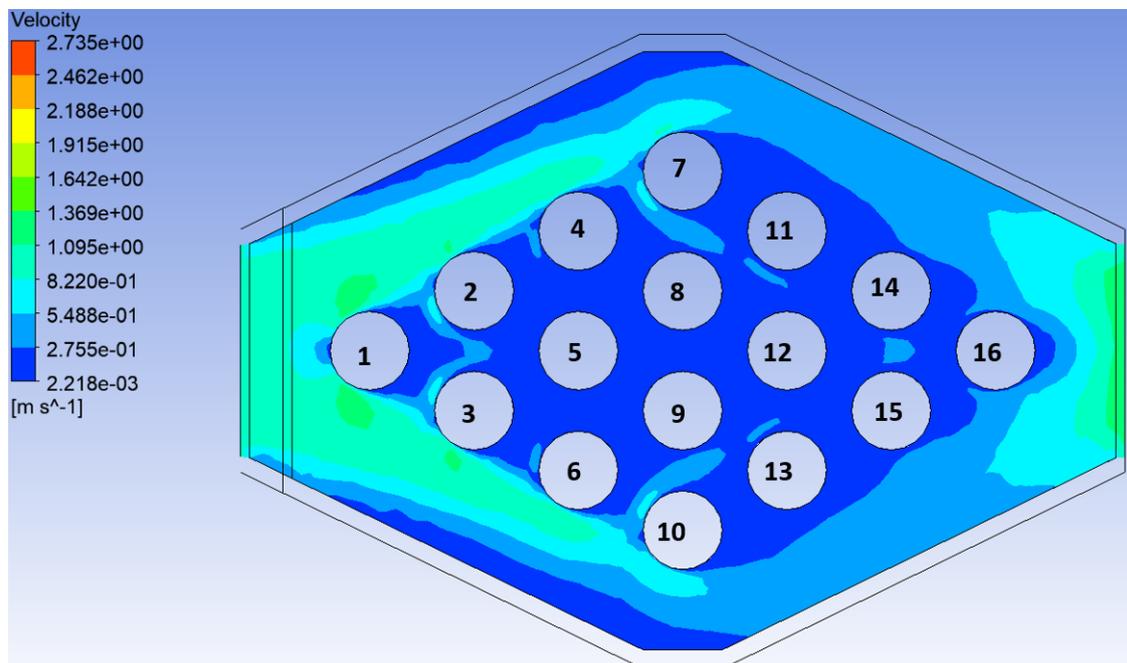


Figura 91. Campo de velocidades a 4.6C a velocidad de 1 m/s.

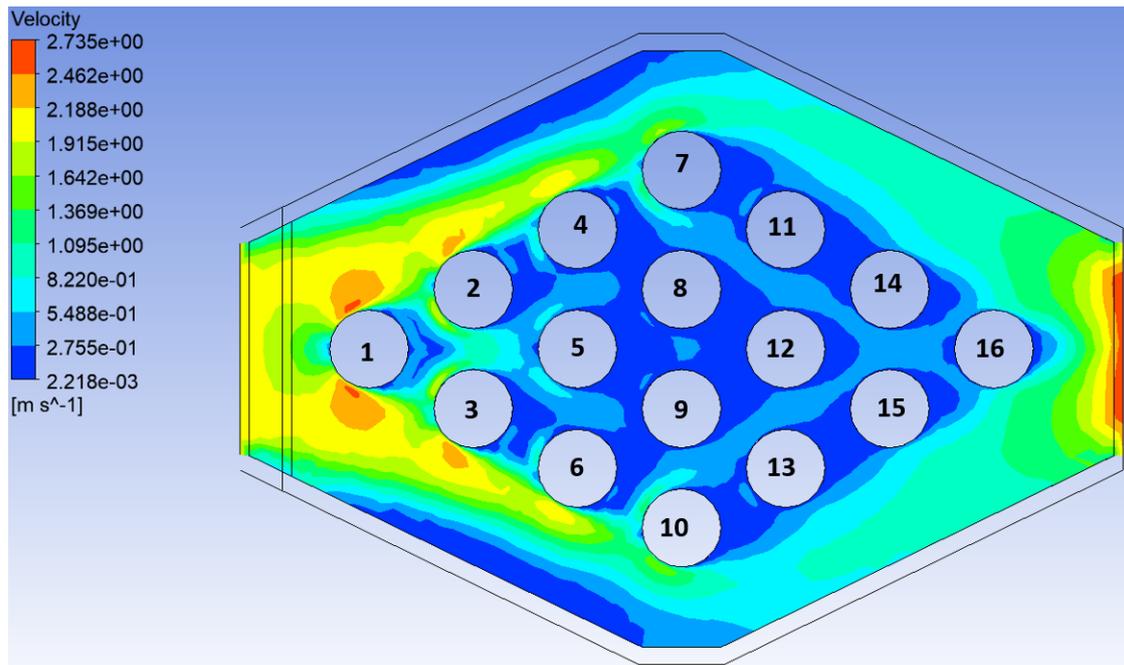


Figura 92. Campo de velocidades a 4.6C a velocidad de 2 m/s.

6.14.2. Diseño 2

Las **Figuras 93, 94, 95 y 96** corresponde a los contornos de colores de las temperaturas y campos de velocidades entre las celdas. En este caso, no existe una zona crítica de alta temperatura, hay una mejor uniformidad de temperatura a comparación del primer y segundo diseño, esto se evidencia en las diferentes tasas de descarga (ver Anexo 3). También, los resultados muestran que las temperaturas en las celdas 1, 2, 3, 4 son menores a comparación con las demás. Se observa que la velocidad máxima del aire local es de unos 1.5 m/s cuando la velocidad de entrada del aire en el canal era de 1 m/s y 3 m/s cuando la velocidad de entrada del aire es de 2 m/s.

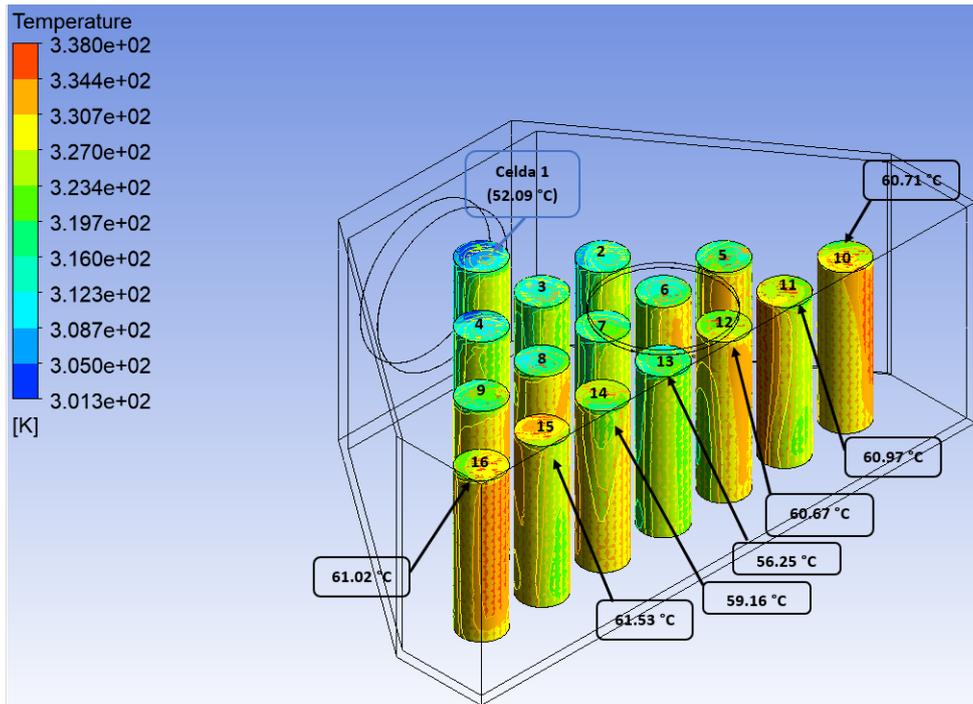


Figura 93. Distribución de temperatura a 4.6C a velocidad de 1 m/s.

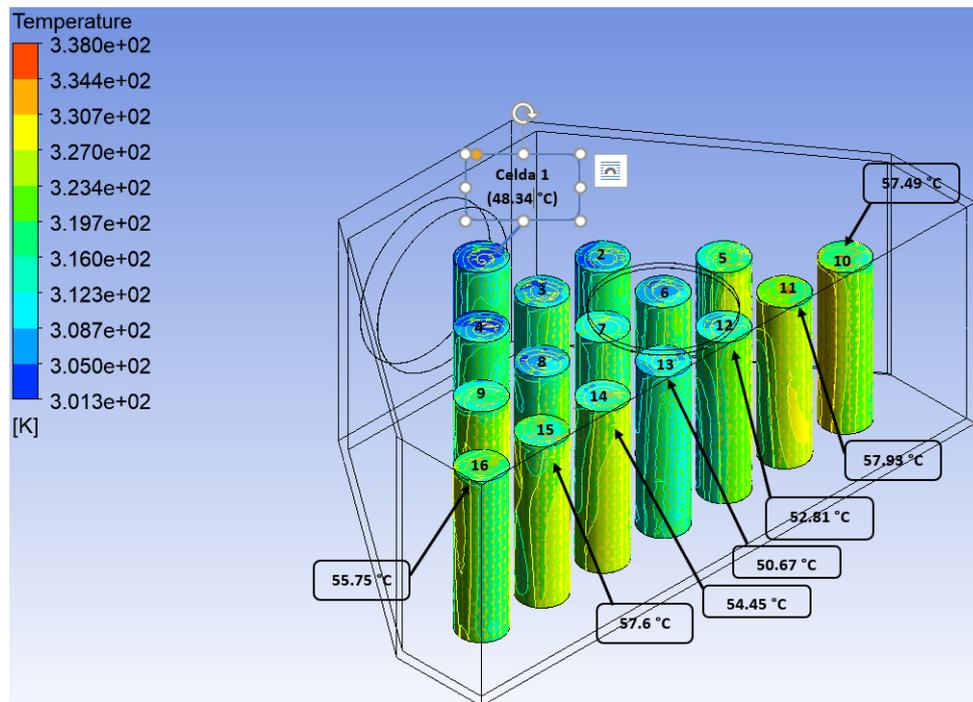


Figura 94. Distribución de temperatura a 4.6C a velocidad de 2 m/s.

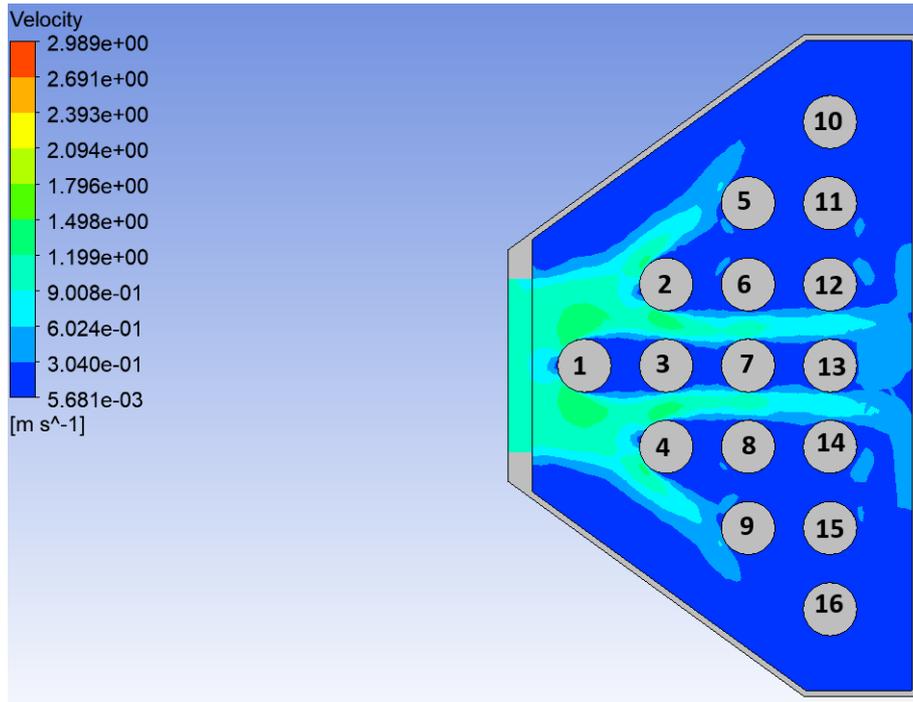


Figura 95. Campo de velocidades a 4.6C a velocidad de 1 m/s.

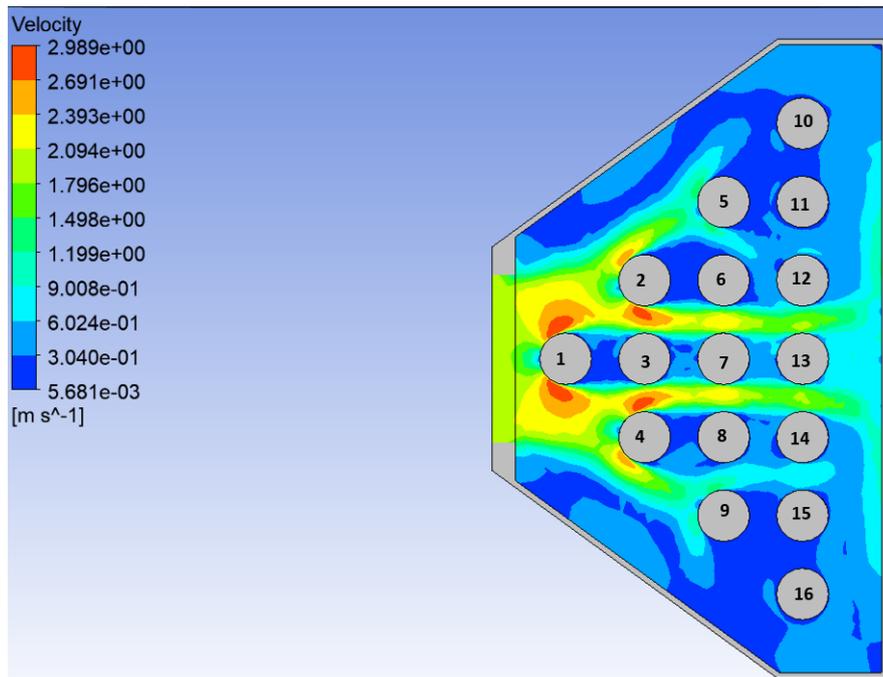


Figura 96. Campo de velocidades a 4.6C a velocidad de 2 m/s.

6.14.3. Diseño 3

Las Figuras 97, 98, 99 y 100 corresponde a los contornos de colores de las temperaturas y campos de velocidades entre las celdas. En este caso, existen dos zonas críticas de alta temperatura que corresponden a las celdas número 9, 13 y número 12, 16, respectivamente. Esto se evidencia en las diferentes tasas de descarga (ver Anexo 4). Se observa que la

velocidad máxima del aire local es de unos 1.5 m/s cuando la velocidad de entrada del aire en el canal es de 1 m/s y 2.77 m/s cuando la velocidad de entrada del aire es de 2 m/s.

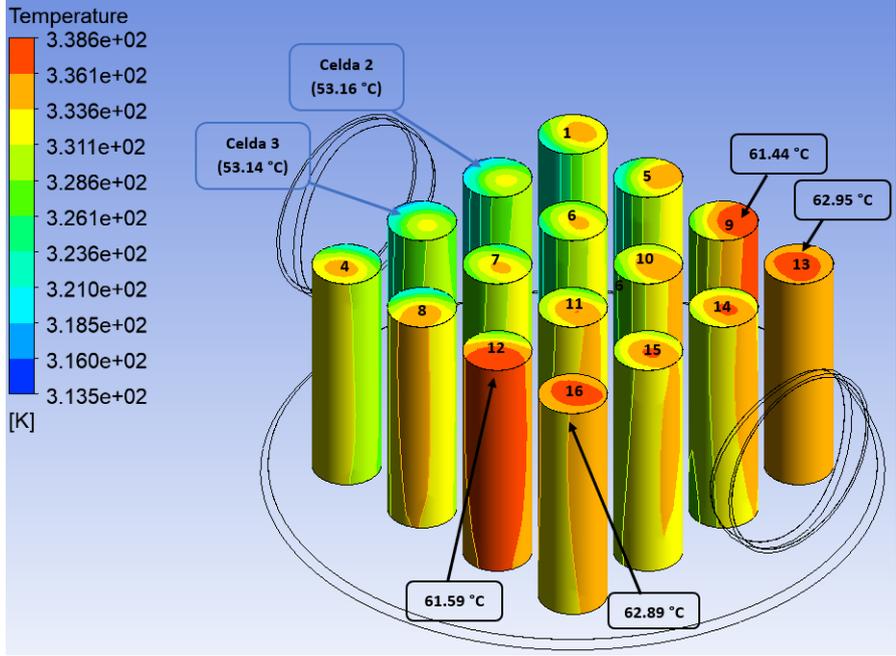


Figura 97. Distribución de temperatura a 4.6C a velocidad de 1 m/s.

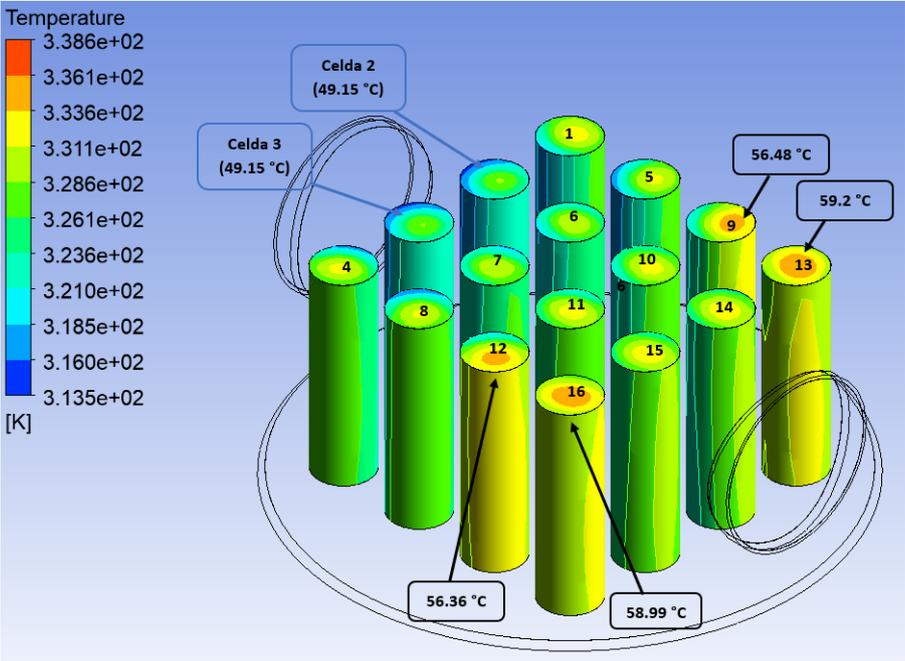


Figura 98. Distribución de temperatura a 4.6C a velocidad de 2 m/s.

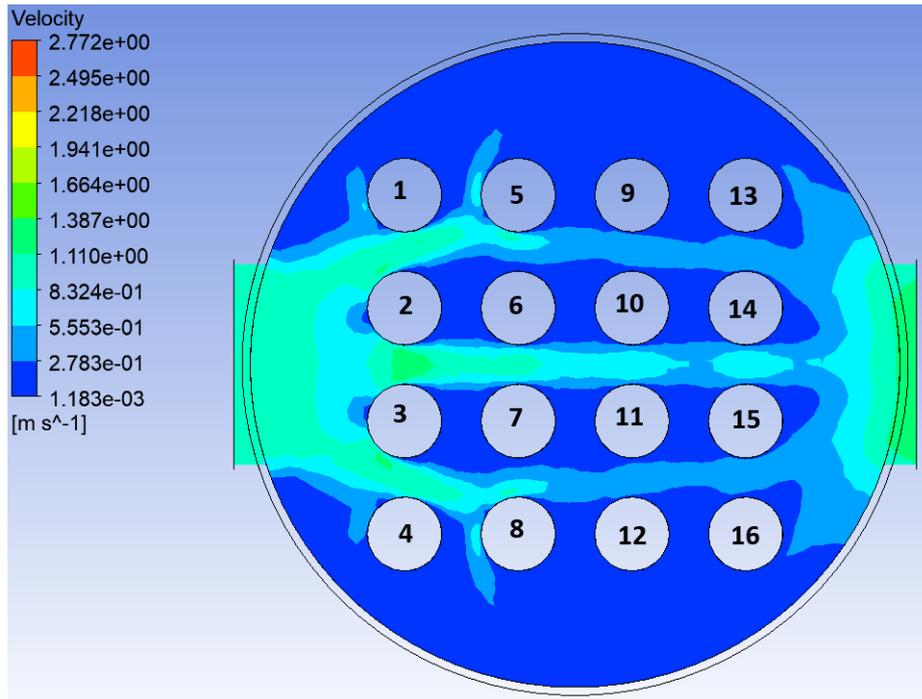


Figura 99. Campo de velocidades a 4.6C a velocidad de 1 m/s.

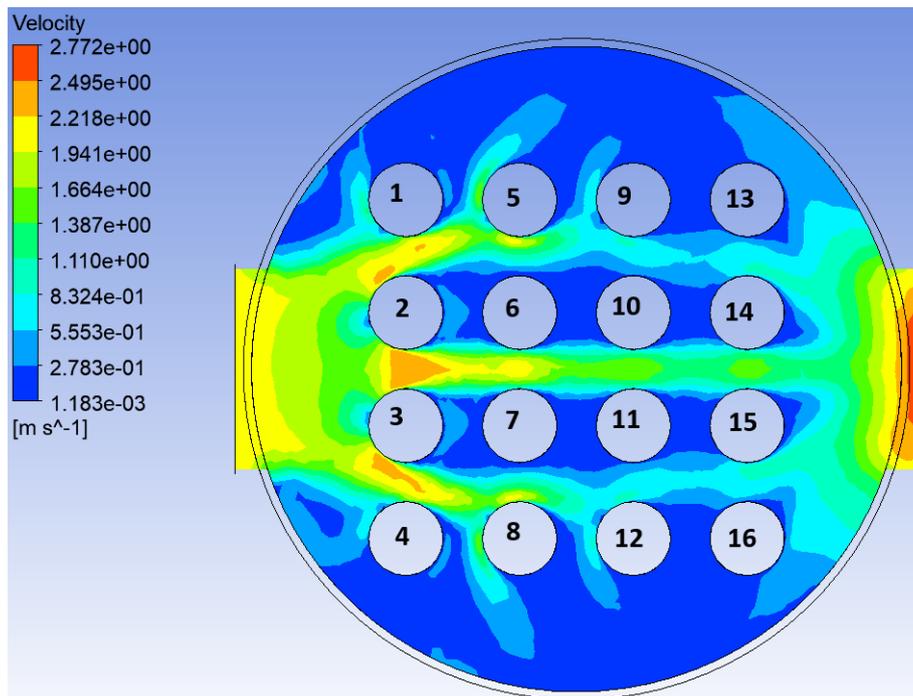


Figura 100. Campo de velocidades a 4.6C a velocidad de 2 m/s.

6.15. Temperatura de las celdas a una corriente variable

Las gráficas de la Figuras 101, 102 y 103 muestran las temperaturas registradas en cada celda para una tasa de descarga variable en grados Celsius.

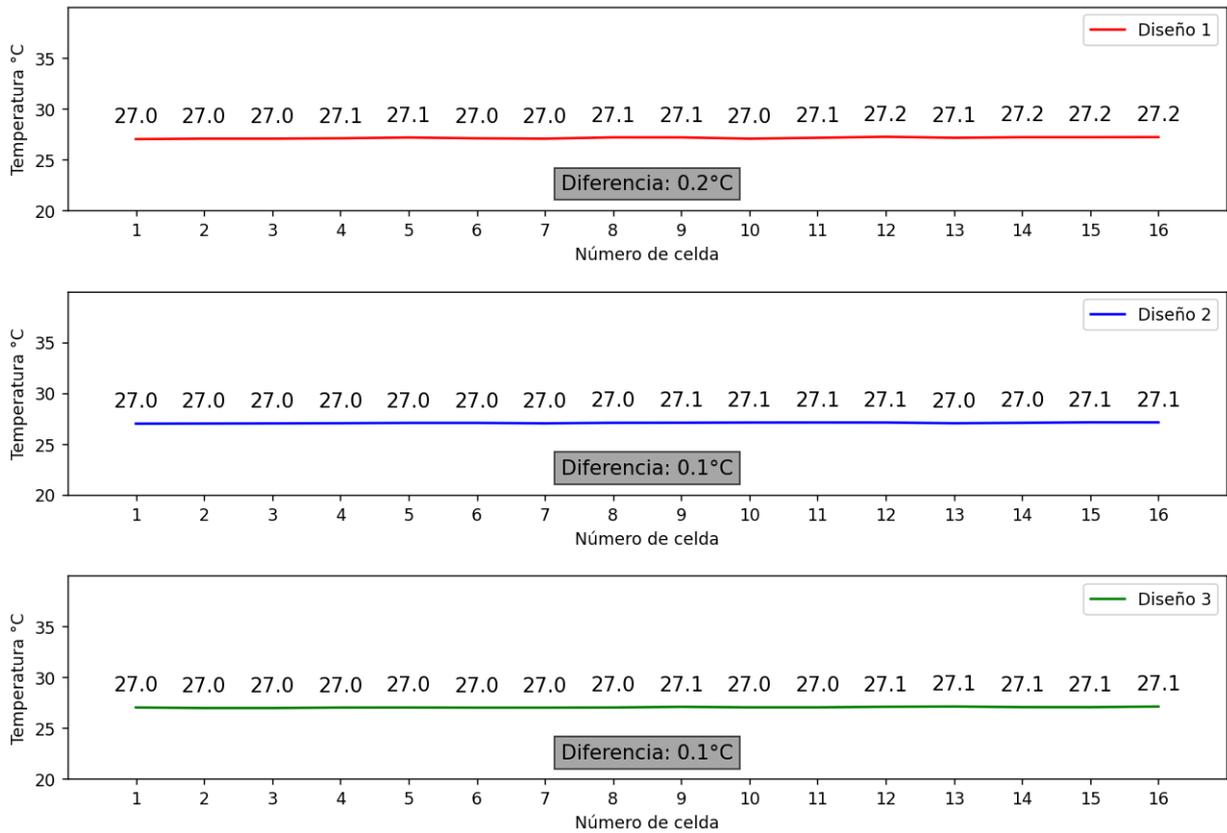


Figura 101. Campo de velocidades a 4.6C a velocidad de 2 m/s.

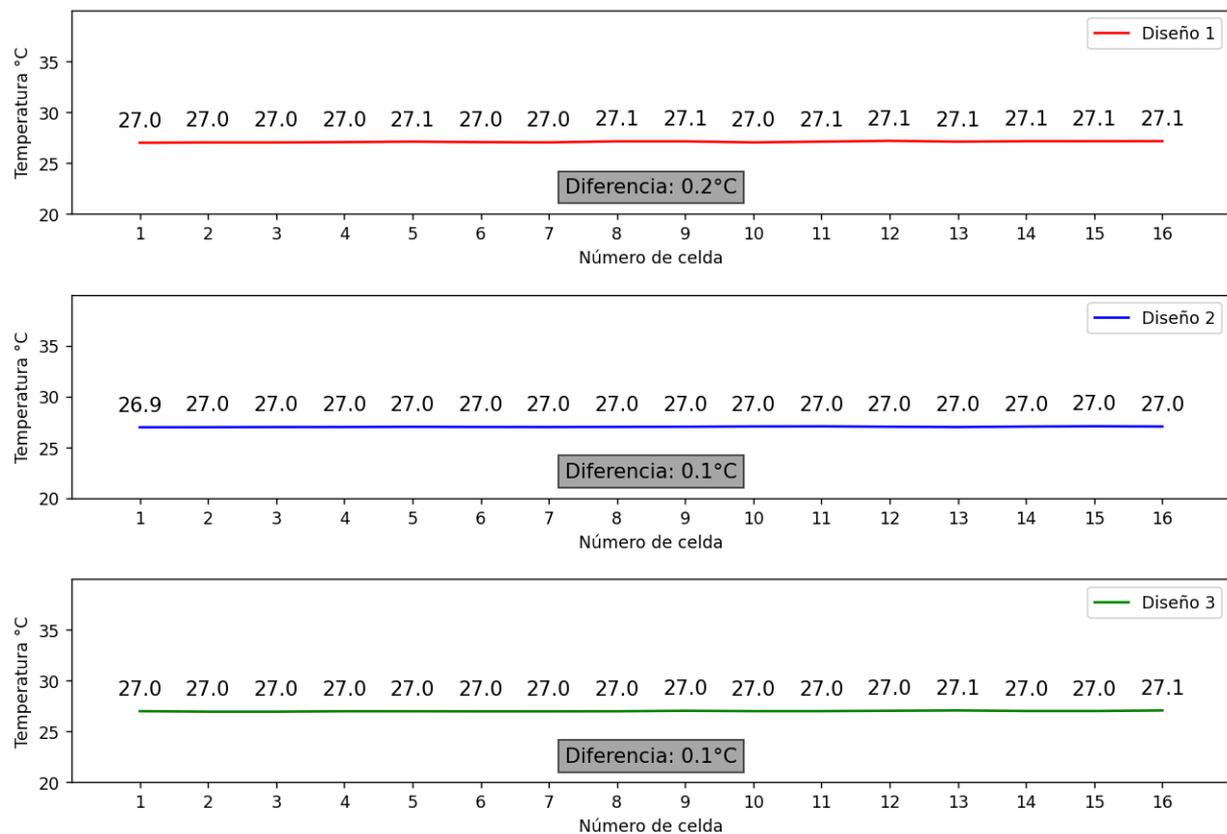


Figura 102. Campo de velocidades a 4.6C a velocidad de 2 m/s.

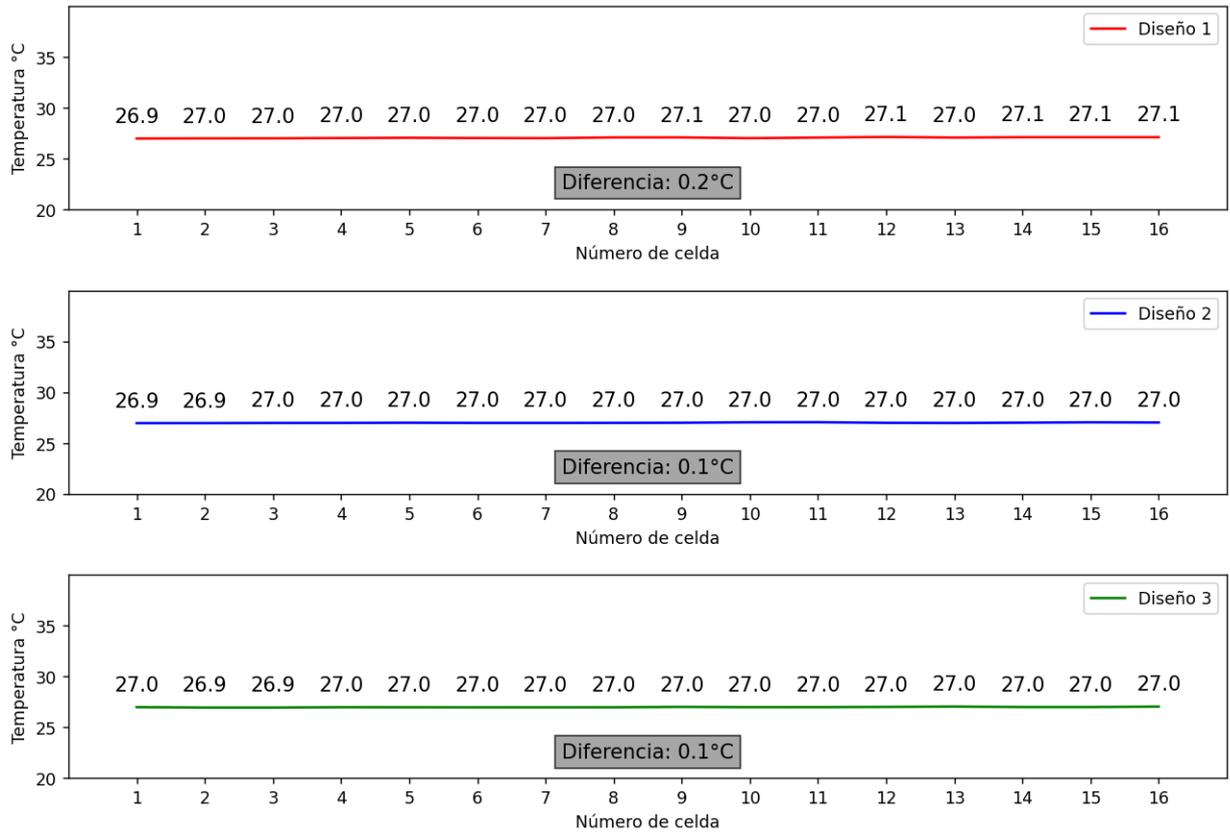


Figura 103. Campo de velocidades a 4.6C a velocidad de 2 m/s.

7. Discusión

Es importante evaluar el rendimiento térmico de los paquetes de baterías para evitar la pérdida de capacidad y accidentes en las celdas. Muchos estudios han utilizado paquetes computacionales como ANSYS para desarrollar modelos numéricos del comportamiento térmico de las disposiciones de baterías (véase, por ejemplo, Hu et al., 2011; T. Wang et al., 2015; Xia et al., 2018; L. H. Saw et al., 2016; Smith et al., 2014). Para describir los flujos turbulentos en los módulos de baterías, se ha adoptado ampliamente el modelo estándar $k - \epsilon$ debido a su robustez (véase, por ejemplo, L. H. Saw et al., 2016; Xia et al., 2018; Erb et al., 2017; Chen et al., 2017). Además, también se ha utilizado el modelo SST, que se ha mejorado para predecir la separación del flujo bajo gradientes de presión adversos (véase, por ejemplo, L. H. Saw et al., 2016).

La generación de calor juega un papel importante en la temperatura del módulo, especialmente debido a la tasa de corriente aplicada. No se consideran los efectos del envejecimiento de la celda y el estado de carga (SOC) que varía la resistencia interna (Barcellona et al., 2022). Además, la influencia del calentamiento de las pestañas en la temperatura de la batería (Ham et al., 2023) se considera insignificante y puede desempeñar un papel importante en baterías de alta capacidad.

De acuerdo al estudio térmico, la Figura 75 muestra que el diseño 1 es el menos efectivo debido a que tiene una diferencia de temperatura entre la celda más caliente y la celda más fría de 2.7 °C, mientras que en el diseño 2 es de 1.9 °C (presenta un perfil de temperatura más estable) y el diseño 3 muestra un rendimiento medio con 2 °C. La Figura 77 evidencia que cuando se usa una velocidad de flujo de aire de 2 m/s, la temperatura de las celdas disminuye ligeramente en comparación con el caso cuando se emplea 1 m/s. Por ejemplo, a una tasa de 4C, la temperatura de la celda 12 del diseño 1 disminuye de 64.88 °C (a 1 m/s) a 62.15 °C (a 2 m/s), este aspecto se señaló en F. Zhang, Yi et al., 2021. Así mismo, el aumento de velocidad de flujo de aire en la entrada disminuye la variación de temperatura entre la celda más caliente y la más fría (se observa en la Figura 87) pero en el caso de una Tasa de 4.6C sucede lo contrario (Figura 88).

Además, al aplicar tasas de descarga mayor a 1C se observa que el perfil de temperatura empieza a desestabilizarse, originando picos de temperaturas elevadas (caso de los tres diseños) y tiende a aumentar desde la celda número 1 hasta la celda número 16 según la trayectoria del flujo de aire. La temperatura más alta la alcanza la celda 12 (64.88 °C a 1 m/s) en el diseño 1 a una tasa de 4.6C. Por tal motivo, los fabricantes recomiendan que las LIBs trabajen a una tasa de 1C la mayoría del tiempo.

Es importante mencionar que las celdas que se encuentran cerca a la entrada de aire

tienen mejor enfriamiento que las que siguen, esto se debe que existen zonas de flujo turbulento donde el flujo de aire no es uniforme. Este aspecto se indicó en Pordanjani et al., 2023, Jiaqiang et al., 2018, T. Wang et al., 2014.

El campo de temperatura demuestra que las celdas cerradas a la salida del flujo de aire alcanzan las temperaturas más altas. Además, la trayectoria del flujo de aire en una disposición alineada con una configuración triangular (Figura 89) es más efectiva para rechazar el calor en comparación con la estructura escalonada en forma de rombo (Figura 93). Y una caja circular con una disposición cuadrada de celdas (diseño 3) tiende a ser la opción intermedia como método de enfriamiento para el módulo de batería (Figura 97).

Por otro lado, los resultados del diseño 1 muestran que, a una velocidad de entrada de 1 m/s, 1.5 m/s y 2 m/s, el flujo de aire se dirige alrededor del módulo, lo que forma una estela aguas abajo en la región de separación del flujo (Figura 91). Se nota que a 1 m/s el campo de velocidad dentro del conjunto de celdas en la dirección del flujo en el módulo de batería tiende a ser cero debido a la configuración escalonada del módulo de batería (ver Figura 91). Al aumentar la velocidad a 2 m/s la dirección del aire entra en los espaciamientos diagonales de las celdas, con mayor velocidad en la celda 2 y 3 con respecto a la celda 1 y 5 y con menor velocidad en las siguientes celdas (ver Figura 92).

Además, los campos de velocidad de aire del diseño 2 y 3 se observa que, a las mismas velocidades de entrada en la parte central (en el caso del diseño 2, las celdas 1, 3, 7 y 13), el flujo de aire se dirige alrededor del contorno de la celda, lo que forma una estela aguas abajo en la región de separación del flujo. En este punto, el campo de velocidad tiende a ser cero debido a la configuración alineada del módulo de batería (ver Figuras 97 y 95). En este caso, el campo de velocidades entre dos celdas adyacentes tiende a aumentar. Estos comportamientos se indicó en Pordanjani et al., 2023, Singh et al., 2021.

Por lo tanto, el diseño del canal de flujo influye en la dirección que toma el flujo de aire para enfriar el módulo de baterías. Además, cuando el flujo es menos turbulento, el campo de velocidad en esa zona (entrada y salida de aire) tiende a aumentar (esto se indicó en Paccha-Herrera et al., 2020).

8. Conclusiones

El diseño 2 es el más efectivo en términos de estabilidad térmica, con una menor variación de temperatura entre la celda más caliente y la más fría (1.9 °C a 1C con velocidad de 1 m/s), seguido por el diseño 3 (2 °C a 1C con velocidad de 1 m/s), y el diseño 1 resulta ser el menos eficiente (2.7 °C a 1C con velocidad de 1 m/s).

El diseño del canal de flujo influye en el rendimiento térmico del módulo de baterías. Caso del diseño 1 que, por su forma del canal, a bajas velocidades de entrada (1 m/s), el flujo de aire tiende a dirigirse al contorno del módulo. A mayor velocidad (2 m/s), el aire se dirige hacia dentro del módulo.

El aumento de la velocidad del flujo de aire de 1 m/s a 2 m/s mejora el enfriamiento en todos los diseños, reduciendo la temperatura de las celdas y la variación de temperatura entre la celda más caliente y la más fría. Sin embargo, a tasas de descarga más altas, como 4.6C, este comportamiento se invierte en los casos del presente estudio, aumentando la variación térmica de 9.4 a 9.6 °C (Caso del diseño 2).

A tasas de descarga superiores a 1C, el perfil térmico de las celdas se vuelve más inestable, con incrementos de temperatura notables, especialmente en las celdas más alejadas de la entrada de aire. La celda 12 del diseño 1 alcanzó la temperatura más alta (64.88 °C) a una tasa de 4.6C y 1 m/s de velocidad de aire.

9. Recomendaciones

Puesto que el diseño 2 presentó un comportamiento térmico eficiente, con una menor variación de temperatura ($1.9\text{ }^{\circ}\text{C}$), se recomienda realizar un estudio más profundo, específicamente en analizar la influencia de la ubicación de la salida de aire en el rendimiento térmico del módulo.

Dado que el diseño 1 presentó un comportamiento térmico menos eficiente, con una mayor variación de temperatura ($2.7\text{ }^{\circ}\text{C}$) y problemas en el direccionamiento del flujo de aire, se recomienda emplear deflectores en el canal de flujo para redirigir mejor el aire hacia las celdas centrales, evitando que el aire se concentre en los contornos.

Se sugiere investigar más a fondo el comportamiento térmico a tasas de descarga superiores a 1C , especialmente mayor a 4C , donde se observó un aumento en la variación térmica. Se deben probar diferentes configuraciones de flujo de aire y geometrías del canal para mitigar estos efectos adversos y mejorar la estabilidad térmica en condiciones de alta demanda.

Para evitar el sobrecalentamiento de las celdas, especialmente en las posiciones más alejadas de la entrada de aire, se recomienda operar los módulos a tasas de descarga no superiores a 1C . Esto reducirá la inestabilidad térmica y ayudará a prevenir picos de temperatura elevados.

10. Bibliografía

- Al Rasyid Ar, Z. J., Firmansyah, E., & Wijaya, F. D. (2021). Modelado del efecto de la temperatura en el SoC del paquete de baterías de iones de litio, 299-303. <https://doi.org/10.1109/ISMEE54273.2021.9774044>
- ANSYS, I. (2018). *ANSYS Fluent Tutorial Guide*. ANSYS.
- Ariwibawa, K., Utama, P. H. K., Leksono, E., Haq, I. N., & Suprijanto. (2019). Simulation Study on Thermal Characteristics and Temperature Distribution of Lithium-ion Battery Pack in Electric Tricycle, 368-371. <https://doi.org/10.1109/ICEVT48285.2019.8993976>
- Barcellona, S., Colnago, S., Dotelli, G., Latorrata, S., & Piegari, L. (2022). Aging effect on the variation of Li-ion battery resistance as function of temperature and state of charge. *Journal of Energy Storage*, 50, 104658. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.est.2022.104658>
- Bernardi, D., Pawlikowski, E., & Newman, J. (1985). A General Energy Balance for Battery Systems. *Journal of The Electrochemical Society*, 132(1), 5. <https://doi.org/10.1149/1.2113792>
- Bisht, A. S., Bisht, V. S., Bhandari, P., Rawat, K. S., Alam, T., & Blecich, P. (2023). The Use of a Vortex Generator for the Efficient Cooling of Lithium-Ion Batteries in Hybrid Electric Vehicles. *Processes*, 11(2). <https://doi.org/10.3390/pr11020500>
- Bryden, T. S., Dimitrov, B., Hilton, G., de León, C. P., Bugryniec, P., marrón, S., Cumming, D., & Cruden, A. (2018). Methodology to determine the heat capacity of lithium-ion cells. *Journal of Power Sources*, 395, 369-378. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2018.05.084>
- Çengel, Y. A., & Ghajar, A. J. (2011). *Transferencia De Calor y Masa (4^a ed.)* McGRAW-HILL.
- Chen, K., Wang, S., Song, M., & Chen, L. (2017). Configuration optimization of battery pack in parallel air-cooled battery thermal management system using an optimization strategy. *Applied Thermal Engineering*, 123, 177-186. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.05.060>
- Erb, D., Kumar, S., Carlson, E., Ehrenberg, I., & Sarma, S. (2017). Analytical methods for determining the effects of lithium-ion cell size in aligned air-cooled battery packs. *Journal of Energy Storage*, 10, 39-47. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.est.2016.12.003>
- Especificación del producto ICR18650-22P*. (2010). datasheet. Ver. 1.0.
- Fan, Y., Bao, Y., Ling, C., Chu, Y., Tan, X., & Yang, S. (2019). Experimental study on the thermal management performance of air cooling for high energy density cylindrical lithium-ion batteries. *Applied Thermal Engineering*, 155, 96-109. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.03.157>

- Fill, A., & Birke, K. P. (2022). Interacción de las diferencias de temperatura y corriente entre celdas de iones de litio conectadas en paralelo en dependencia del diseño de la batería térmica, 195-200. <https://doi.org/10.1109/MELECON53508.2022.9842985>
- Ham, S. H., Jang, D. S., Lee, M., Jang, Y., & Kim, Y. (2023). Effective thermal management of pouch-type lithium-ion batteries using tab-cooling method involving highly conductive ceramics. *Applied Thermal Engineering*, *220*, 119790. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.119790>
- Hami, A. E., & Radi, B. (2017). *Fluid-Structure Interactions and Uncertainties: Ansys and Fluent Tools (1st ed.)* Wiley.
- Hu, X., Lin, S., Stanton, S., & Lian, W. (2011). A Foster network thermal model for HEV/EV battery modeling. *IEEE Transactions on Industry Applications - IEEE TRANS IND APPL*, *47*, 1692-1699. <https://doi.org/10.1109/TIA.2011.2155012>
- Incropera, F. P. (1999). *Fundamentos de transferencia de calor (4^{ta} ed.)* Pearson Educación.
- Jiaqiang, Yue, M., Chen, J., Zhu, H., Deng, Y., Zhu, Y., Zhang, F., Wen, M., Zhang, B., & Kang, S. (2018). Effects of the different air cooling strategies on cooling performance of a lithium-ion battery module with baffle. *Applied Thermal Engineering*, *144*, 231-241. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.08.064>
- Kim, Y., Mohan, S., Siegel, J. B., Stefanopoulou, A. G., & Ding, Y. (2014). Estimación de la distribución de temperatura en celdas de baterías cilíndricas en condiciones de enfriamiento desconocidas. *Transacciones IEEE sobre tecnología de sistemas de control*, (6), 2277-2286. <https://doi.org/10.1109/TCST.2014.2309492>
- Kirad, K., & Chaudhari, M. (2021). Design of cell spacing in lithium-ion battery module for improvement in cooling performance of the battery thermal management system. *Journal of Power Sources*, *481*, 229016. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2020.229016>
- Korthauer, R. (2018). *Lithium-Ion Batteries: Basics and Applications (1st ed.)* Springer Berlin Heidelberg.
- Kreith, F., Manglik, R. M., & Bohn, M. S. (2010). *Principles of Heat Transfer (7th ed.)* Cengage Learning.
- Kummitha, O. R. (2023). Thermal cooling of li-ion cylindrical cells battery module with baffles arrangement for airflow cooling numerical analysis. *Journal of Energy Storage*, *59*, 106474. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.est.2022.106474>
- 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/https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2013.04.073>
- LIR18650R-20 High discharge battery. (2023). datasheet. Ver. 1.0.
- Matsson, J. E. (2022). *An Introduction to ANSYS Fluent 2022 (1st ed.)* SDC Publications.

- Nazar, M. W., Iqbal, N., Ali, M., Nazir, H., & Amjad, M. Z. B. (2023). Thermal management of Li-ion battery by using active and passive cooling method. *Journal of Energy Storage*, *61*, 106800. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.est.2023.106800>
- Öztop, M., & Şahinaslan, A. (2022). Control of temperature distribution for Li-ion battery modules via longitudinal fins. *Journal of Energy Storage*, *52*, 104760. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.est.2022.104760>
- Paccha-Herrera, E., Calderón-Muñoz, W. R., Orchard, M., Jaramillo, F., & Medjaher, K. (2020). Thermal Modeling Approaches for a LiCoO₂ Lithium-ion Battery—A Comparative Study with Experimental Validation. *Batteries*, *6*(3). <https://doi.org/10.3390/batteries6030040>
- Plasco. (2023). *Acrilico*. Plasco.
- Pordanjani, A. H., Aghakhani, S., Afrand, M., Zhang, P., Tang, R., Mahian, O., Wongwises, S., & Rashidi, M. M. (2023). Thermo-electrochemical simulation of the cooling process in a compact battery pack considering various configurations. *Journal of Power Sources*, *553*, 232112. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2022.232112>
- Rodríguez, A., Ortiz, M., & Thomas, J. (2020). *El litio en la Argentina: visiones y aportes multidisciplinarios desde la UNLP (1^ª ed.)* Universidad Nacional de La Plata.
- Sahin, R. C., Gocmen, S., & Cetkin, E. (2022). Thermal management system for air-cooled battery packs with flow-disturbing structures. *Journal of Power Sources*, *551*, 232214. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2022.232214>
- Santhanagopalan, S., Smith, K., Neubauer, J., Kim, G.-H., Keyser, M., & Pesaran, A. (2014). *Design and Analysis of Large Lithium-Ion Battery Systems (1st ed.)* Artech House Publishers.
- Saw, L., Ye, Y., & Tay, A. (2014). Electro-thermal analysis and integration issues of lithium ion battery for electric vehicles. *Applied Energy*, *131*, 97-107. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.06.016>
- Saw, L. H., Ye, Y., Tay, A. A., Chong, W. T., Kuan, S. H., & Yew, M. C. (2016). Computational fluid dynamic and thermal analysis of Lithium-ion battery pack with air cooling. *Applied Energy*, *177*, 783-792. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.05.122>
- Sharma, D. K., & Prabhakar, A. (2021). A review on air cooled and air centric hybrid thermal management techniques for Li-ion battery packs in electric vehicles. *Journal of Energy Storage*, *41*, 102885. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.est.2021.102885>
- Singh, L. K., Mishra, G., Sharma, A., & Gupta, A. K. (2021). A numerical study on thermal management of a lithium-ion battery module via forced-convective air

- cooling. *International Journal of Refrigeration*, 131, 218-234. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2021.07.031>
- Smith, J., Hinterberger, M., Hable, P., & Koehler, J. (2014). Simulative method for determining the optimal operating conditions for a cooling plate for lithium-ion battery cell modules. *Journal of Power Sources*, 267, 784-792. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.06.001>
- 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/https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.08.107>
- Sun, Y., Jin, Y., Jiang, Z., & Li, L. (2023). A review of mitigation strategies for lithium-ion battery thermal runaway. *Engineering Failure Analysis*, 149, 107259. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2023.107259>
- Team, L. C. (2012). *Estudio de convergencia e independencia de malla*. Consultado el 29 de marzo de 2023, desde <https://www.computationalfluidynamics.com.au/convergence-and-mesh-independent-study/>
- Wang, H., Tao, T., Xu, J., Mei, X., Liu, X., & Gou, P. (2020). Cooling capacity of a novel modular liquid-cooled battery thermal management system for cylindrical lithium ion batteries. *Applied Thermal Engineering*, 178, 115591. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115591>
- Wang, T., Tseng, K., & Zhao, J. (2015). Development of efficient air-cooling strategies for lithium-ion battery module based on empirical heat source model. *Applied Thermal Engineering*, 90, 521-529. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.07.033>
- Wang, T., Tseng, K., 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/https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.08.013>
- Warner, J. T. (2015). *The Handbook of Lithium-Ion Battery Pack Design: Chemistry, Components, Types and Terminology (1st ed.)* Elsevier Science.
- Widyantara, R. D., Naufal, M. A., Sambegoro, P. L., Nurprasetio, I. P., Triawan, F., Djamar, D. W., Nandiyanto, A. B. D., Budiman, B. A., & Aziz, M. (2021). Low-Cost Air-Cooling System Optimization on Battery Pack of Electric Vehicle. *Energies*, 14(23). <https://www.mdpi.com/1996-1073/14/23/7954>
- Xia, Q., Wang, Z., Ren, Y., Sun, B., Yang, D., & Feng, Q. (2018). A reliability design method for a lithium-ion battery pack considering the thermal disequilibrium in electric vehicles. *Journal of Power Sources*, 386, 10-20. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2018.03.036>

- Xu, Z., Yu, G., Zhang, T., & Wang, R. (2022). Cooling performance of battery pack as affected by inlet position and inlet air velocity in electric vehicle. *Case Studies in Thermal Engineering*, *39*, 102382. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2022.102382>
- Yeoh, G.-H., Tu, J., & Liu, C. (2018). *Computational Fluid Dynamics (3rd ed.)* Elsevier Science.
- Zhang, F., Wang, P., & Yi, M. (2021). Design optimization of forced air-cooled lithium-ion battery module based on multi-vents. *Journal of Energy Storage*, *40*, 102781. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.est.2021.102781>
- Zhang, F., Yi, M., Wang, P., & Liu, C. (2021). Optimization design for improving thermal performance of T-type air-cooled lithium-ion battery pack. *Journal of Energy Storage*, *44*, 103464. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103464>
- Zhang, X., Li, Z., Luo, L., Fan, Y., & Du, Z. (2022). A review on thermal management of lithium-ion batteries for electric vehicles. *Energy*, *238*, 121652. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121652>
- 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/https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2012.09.035>
- Zikanov, O. (2010). *Essential Computational Fluid Dynamics (1st ed.)* Wiley.

11. Anexos

Anexo 1. Especificaciones nominales de la celda LIR18650R-20

Tabla 15. Especificaciones nominales de la celda LIR18650R-20.

Parámetro	Especificación
Capacidad Nominal	2000 mAh
Voltaje Nominal	3.6 V
Máx. corriente de carga	1000 mA
Máx. corriente de descarga	20000 mAh
Dimensiones	Diámetro (máx.): 18.60 mm
	Altura (máx.): 65.5 mm
	10000 mA $-10\text{ °C} < T \leq 10\text{ °C}$
Temperatura de funcionamiento	15000 mA $0\text{ °C} < T \leq 20\text{ °C}$
	20000 mA $20\text{ °C} < T \leq 60\text{ °C}$
Resistencia Interna	Cargando 0 °C a 45 °C $200\text{ m}\Omega$

Fuente: Adaptado de *LIR18650R-20 High discharge battery*, 2023.

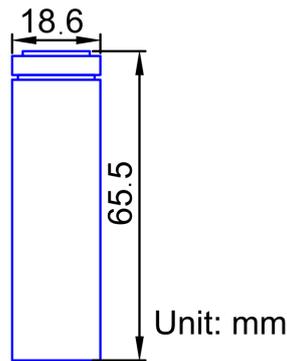


Figura 104. Dimensiones de la celda LIR18650R-20.

Fuente: Adaptado de *LIR18650R-20 High discharge battery*, 2023.

Anexo 2. Distribución de temperatura del diseño 1

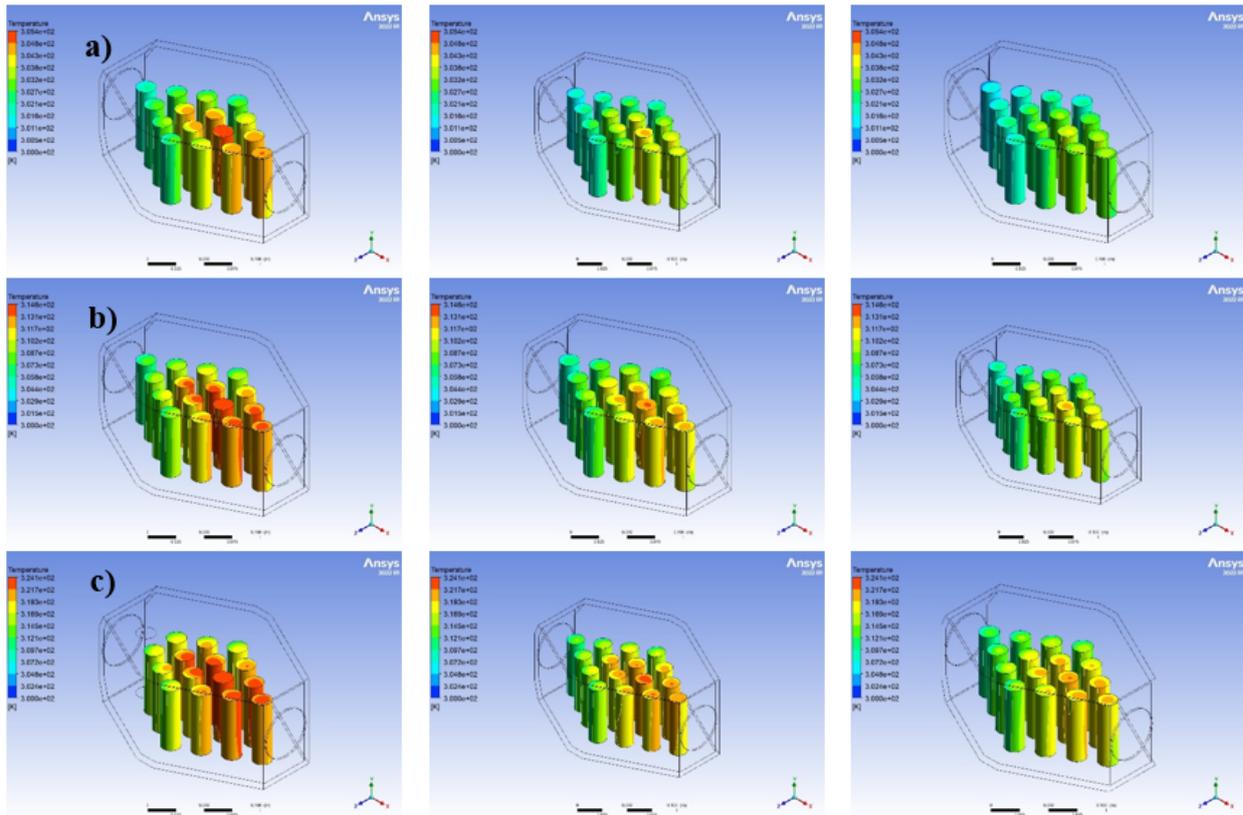


Figura 105. Distribución de temperatura y campo de velocidad del módulo de baterías. (a) Tasa 1C a 1 m/s - 1.5 m/s - 2 m/s. (b) Tasa 2C a 1 m/s - 1.5 m/s - 2 m/s. (c) Tasa 3C a 1 m/s - 1.5 m/s - 2 m/s.

Anexo 3. Distribución de temperatura del diseño 2

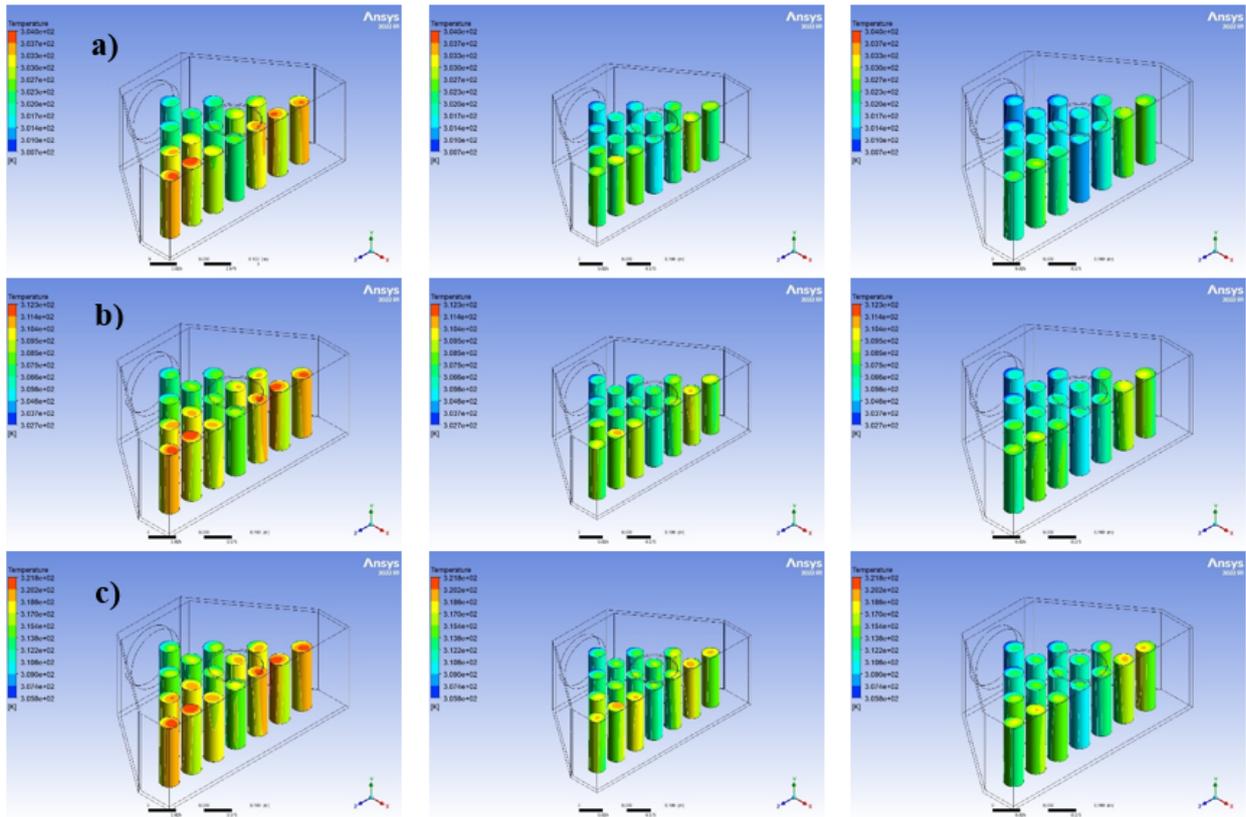


Figura 106. Distribución de temperatura y campo de velocidad del módulo de baterías. (a) Tasa 1C a 1 m/s - 1.5 m/s - 2 m/s. (b) Tasa 2C a 1 m/s - 1.5 m/s - 2 m/s. (c) Tasa 3C a 1 m/s - 1.5 m/s - 2 m/s.

Anexo 4. Distribución de temperatura del diseño 3

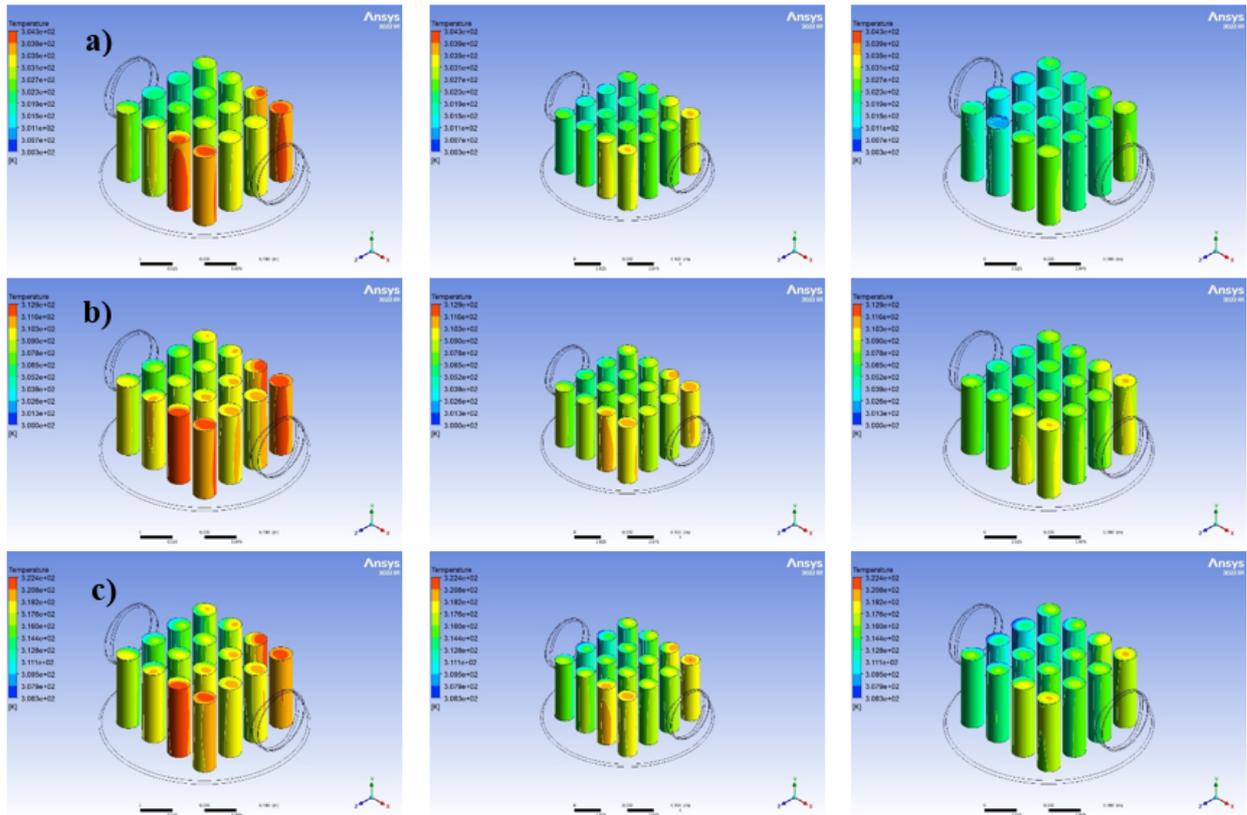


Figura 107. Distribución de temperatura y campo de velocidad del módulo de baterías. (a) Tasa 1C a 1 m/s - 1.5 m/s - 2 m/s. (b) Tasa 2C a 1 m/s - 1.5 m/s - 2 m/s. (c) Tasa 3C a 1 m/s - 1.5 m/s - 2 m/s.

Anexo 5. Distribución de temperatura a tasa de corriente variable

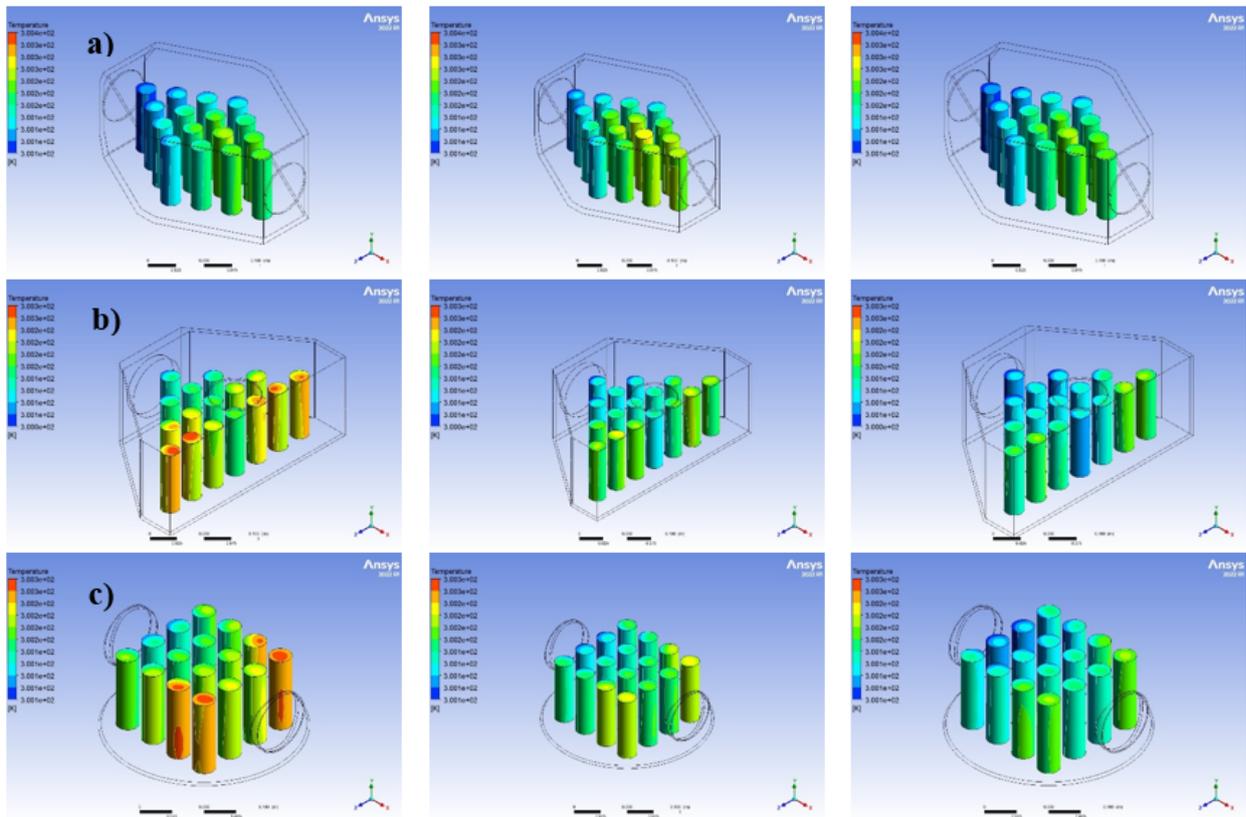


Figura 108. Distribución de temperatura y campo de velocidad del módulo de baterías. (a) Diseño 1 a 1 m/s - 1.5 m/s - 2 m/s. (b) Diseño 2 a 1 m/s - 1.5 m/s - 2 m/s. (c) Diseño 3 a 1 m/s - 1.5 m/s - 2 m/s.

Anexo 6. Certificación de traducción del resumen



093 905 5925
Catamayo.
kmpaucars@gmail.com

31 de julio del 2023

Katty Michelle Paucar Sisalima.
Licenciada en Pedagogía del Idioma Inglés.

CERTIFICA:

Haber realizado la traducción minuciosamente de español a inglés del resumen del Trabajo de Integración Curricular denominado: **“MODELAMIENTO NUMÉRICO DE UN BANCO DE BATERÍAS CON ENFRIAMIENTO POR AIRE BAJO DIVERSAS CONFIGURACIONES GEOMÉTRICAS”** autoría del Sr. Alexis Javier Medina Sisalima con cédula de identidad 1150062915, egresado en la carrera de Electromecánica, de la Facultad de la Energía, las Industrias y los Recursos Naturales no Renovables de la Universidad Nacional de Loja.

Es todo a cuanto puedo certificar en honor a la verdad, pudiendo el interesado hacer uso del presente en lo que estime conveniente.



Atentamente:

Lcda. Katty Michelle Paucar Sisalima.
Licenciada en Pedagogía del Idioma Inglés.
Registro SENESCYT: 1008-2023-2612201.
C.I. 1150010211.
