



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO



INSTITUTO TECNOLÓGICO DE LOS MOCHIS
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

MAESTRÍA EN INGENIERÍA
LÍNEA DE GENERACIÓN Y APLICACIÓN DE CONOCIMIENTO
INGENIERÍA AMBIENTAL Y ENERGÍA RENOVABLES

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN
SIMULACIÓN COMPUTACIONAL (CFD) Y ANÁLISIS COMPARATIVO
DEL DESEMPEÑO TÉRMICO DE BATERÍAS DE ION LITIO (LI-ION) Y
FERROFOSFATO DE LITIO (LiFePO_4), PARA ELECTROMOVILIDAD,
EN LOS MOCHIS, AHOME, PERIODO 2024-2026

PRESENTA

ING. VÍCTOR ARTURO CRUZ GAMBOA.
DIRECTOR: DR. ALEXANDER MENDOZA ACOSTA.
CODIRECTOR: DR. JUAN ANDRÉS MIRANDA ARNOLD.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	6
CAPÍTULO 1. GENERALIDADES.....	9
1.1. Planteamiento del problema	9
Contexto global de electromovilidad y almacenamiento energético	9
Importancia de las baterías en la transición energética de México.....	10
Problema específico: necesidad de comparar objetivamente Li-ion vs LiFePO ₄	11
Justificación de enfoque de simulación computacional.....	11
1.2. Objetivos.....	12
1.2.1. Objetivo General.....	12
1.2.2. Objetivos específicos	12
1.3. Hipótesis	13
1.4. Justificación	13
Justificación científica	13
Justificación tecnológica.....	14
Justificación económica y ambiental	14
1.5. Alcances y Limitaciones.....	14
Alcances	14
Limitaciones.....	15
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO	16
2.1. Baterías de Ion Litio (Li-ion) Fig. 3.	16
2.1.1. Principio de funcionamiento	16
2.1.2. Parámetros de desempeño.....	17
2.1.3. Mecanismos de degradación	17
2.2. Baterías de Ferrofosfato de Litio (LiFePO ₄)	17
2.2.1. Principio de funcionamiento	18
2.2.2. Parámetros de desempeño.....	18
2.2.3. Ventajas en estabilidad térmica	18
2.3. Comparación de Parámetros clave	19
2.4. Método ELECTRE	19
2.4.1. Historias y variantes.....	19

2.4.2. Principios matemáticos	20
2.4.3. Aplicación en selección de tecnologías energéticas.	20
2.4.4. Explicación detallada del método ELECTRE.....	21
2.5. Simulación Computacional en Ingeniería de Baterías.....	23
2.5.1. ANSYS Fluent 2026 R1 – Battery Model (MSMD)	23
La generación de calor se calcula mediante la ecuación de Bernardi.....	23
2.6. Modelo Matemático.....	24
Modelo térmico	24
CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA.....	25
3.1. Tipo y diseño de investigación	25
3.2. Variables de Estudio.....	25
3.3. Metodología de Simulación en ANSYS Fluent 2026 R1	25
3.3.1. Geometría y Modelado CAD.	25
3.3.2. Configuración del Battery Model (MSMD) en ANSYS Fluent Fig. 9.	25
3.3.3. Simulaciones Térmicas Propuestas.....	32
3.4. Metodología ELECTRE III para Comparación Final.....	32
3.4.1. Definición de Criterios y Alternativas	32
3.4.2. Procedimiento ELECTRE III.....	33
3.5. Análisis Estadístico.....	33
CAPÍTULO 4. RESULTADOS	38
4.1. Resultados de Simulaciones en ANSYS Fluent	38
4.2. Gráficas de temperatura vs C_rate, por batería	39
4.2.1. Perfil de temperatura vs tiempo de descarga (cilíndrica 4680, NMC)	39
4.2.2. Contornos de temperatura en la sección transversal de la celda NMC.....	40
4.1.3. Perfil de temperatura vs tiempo de descarga (prismática Blade).....	41
4.1.4. Contornos de temperatura en la sección transversal de la celda Blade.....	41
4.3. Gráficas de Temperatura vs C_rate, comparativa entre baterías.	42
4.4. Resultados de ELECTRE III.	43
4.4.1. Matriz de evaluación ELECTRE III	43
4.5. Análisis Estadístico ANOVA.	46
4.5.1. Modelo ANOVA de 3 vías completo.....	46
4.5.2. Pruebas de Efectos	47

4.5.3. Efectos Principales.....	47
CAPITULO 5. CONCLUSIONES.....	50
5.1. Conclusiones Basadas en la Revisión Bibliográfica.....	50
5.2. Conclusiones sobre la Metodología Propuesta.....	50
5.3. Perspectivas y Trabajo Futuro	50
5.4. Conclusión General	51
5.5. Conclusiones por Sección.....	51
REFERENCIAS	53

ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS

Figura 1. Vehículo Eléctrico, Plug(conector) y display digital	9
Figura 2. Compromisos de México ante el cambio climático	10
Figura 3. Corte seccional, arreglo	16
Figura 4. Corte seccional, arreglo	17
Figura 5. Esquema visual ELECTRE III.....	20
Figura 6. Visualización de la primera etapa.....	22
Figura 7. Visualización de la segunda etapa	22
Figura 8. Visualización de una geometría compleja en Ansys Fluent.....	23
Figura 9. Configuración de Battery Model en Ansys Fluent.....	26
Figura 10. Configuración de Modelo Electroquímico, C_rate, Capacidad y criterios de voltaje fin de simulación	27
Figura 11. Configuración de Rs y Voc, depende de estado de carga (SOC).....	28
Figura 12. Configuración de modelos independientes o adicionales	29
Figura 13. Establecemos Coeficientes de Difusión para el material, uds-0 = 1.19 e6	29
Figura 14. Establecemos Coeficientes de Difusión para el material, uds-1 = 1.0 e6.	30
Figura 15. Configuración condición térmica, Convection para la pared de la celda, NMC, simulación	30
Figura 16. Configuración condición térmica, Convection para la pared de la celda, LFP, simulación.....	31
Figura 17. Vista de Variables.....	34
Figura 18. Vista de Datos.....	34
Figura 19. Gráficos	35
Figura 20. Medidas Marginales.....	36
Figura 21. Opciones.....	36
Figura 22. Modelo.....	37
Figura 23. Gráficas Temperatura vs C_rate, comparativa NMC y LFP.....	¡Error! Marcador no definido.
Figura 24. Evaluación Comparativa.....	45
Tabla 1. Comparación de parámetros clave Li-ion NMC vs LiFePO4	19
Tabla 2. Parámetros de materiales para simulación en ANSYS Fluent	26
Tabla 3. Criterios, pesos para el método ELECTRE III.....	32
Tabla 4. Temp. Máxima en celda esperadas	38
Tabla 5. Temp. Máxima en celda, 3 simulaciones/lecturas por combinación.....	38
Tabla 6. Matriz de calificaciones	43

Tabla 7. Tabla de Concordancia.....	43
Tabla 8. Tabla de Discordancia.....	43
Tabla 9. Tabla de Resultados	44
Tabla 10. Factores involucrados	46
Tabla 11. Tabla de igualdad de Levene de Varianzas de error.....	47
Tabla 12. Prueba de Efectos.....	47
Tabla 13. Prueba de Efectos, Interacción BC, $p = 0.038 < 0.05$	48
Tabla 14. Prueba de Efectos Interacción ABC, $p = 0.040 < 0.05$	48



Educación
Secretaría de Educación Pública



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO



Instituto Tecnológico de Los Mochis
División de Estudios de Posgrado e Investigación

Los Mochis, Sin. Los Mochis, Sin. **28/abril/2026**
Oficio No. DEPI/099/2026

ASUNTO: Aceptación de documento de tesis

MIRLA CERVANTES SOBERANES
JEFA DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO/IT LOS MOCHIS
PRESENTE

Por este conducto, los integrantes del Comité Tutorial le informamos que hemos realizado la revisión del trabajo de tesis titulado **"Simulación computacional (CFD) y análisis comparativo del desempeño térmico de baterías Ion-Litio y Ferrosfosfato de Litio (LIFEPO4) para electromovilidad"** del estudiante de posgrado **C. VICTOR ARTURO CRUZ GAMBOA**, con número de control **M24440002** de la **Maestría en Ingeniería** posterior a la revisión se ha dictaminado **ACEPTAR** el documento de tesis, en virtud de que el estudiante en mención realizó las correcciones y observaciones que le fueron indicadas, por tal motivo le solicitamos atentamente la autorización de impresión definitiva.

ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica®

"EL PROGRESO COMO META, LOS PRINCIPIOS COMO GUÍA"

DIRECTOR / TUTOR


ALEXANDER MENDOZA ACOSTA
DOCTOR EN INGENIERÍA
Cédula Profesional 10761377

REVISOR


VALENTE OCHOA ESPINOZA
MAESTRO EN CIENCIAS
Cédula Profesional 5363797

c.c.p. "Estudiante de posgrado"
c.c.p. Archivo DEPI
MCSAty"

CODIRECTOR/ COTUTOR


JUAN ANDRÉS MIRANDA ARNOLD
MAESTRO EN CIENCIAS
Cédula Profesional 7451589

REVISOR


EDER JESÚS VALENTÍN LUGO MEDINA
DOCTOR EN CIENCIAS EN QUÍMICA
Cédula Profesional 6099394





Instituto Tecnológico de Los Mochis
División de Estudios de Posgrado e Investigación

Los Mochis Sin., 28/abril/2026
OFICIO No. DEPI/106/2026
ASUNTO: Autorización de impresión

C. VICTOR ARTURO CRUZ GAMBOA
CANDIDATO AL GRADO DE MAESTRO EN INGENIERÍA
P R E S E N T E

Por este conducto, tengo el agrado de comunicarle que el Comité Tutorial asignado a su trabajo de tesis titulado **"Simulación computacional (CFD) y análisis comparativo del desempeño térmico de baterías Ion-Litio y Ferrosfosfato de Litio (LIFEP04) para electromovilidad"**, ha informado a esta División de Estudios de Posgrado e Investigación, que posterior a la revisión se ha dictaminado **ACEPTAR** su documento de tesis, en virtud de cumplir con los requerimientos del Comité Tutorial y con lo estipulado en los Lineamientos para la Operación de Estudios de Posgrado en el Tecnológico Nacional de México. Por lo anterior se le **AUTORIZA** la impresión definitiva de su trabajo de tesis.

Esperando que el logro del mismo sea acorde con sus aspiraciones profesionales, reciba un cordial saludo y una sincera felicitación.

ATENTAMENTE
Excelencia en Educación Tecnológica®
"EL PROGRESO COMO META, LOS PRINCIPIOS COMO GUÍA"



MIRLA CERVANTES SOBERANES
JEFA DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACION



INSTITUTO TECNOLÓGICO DE
Los Mochis
División de Estudios de
Posgrado e Investigación

c.c. p. Estudiante de posgrado
c.c.p. Archivo DEPI

MCS/fstj*

RESUMEN

La transición energética global hacia la electromovilidad y el almacenamiento de energía renovable ha posicionado a las baterías de litio como tecnologías críticas para la descarbonización del sector transporte. En México, el Plan Nacional de Desarrollo 2025-2030 establece compromisos para impulsar la industria nacional, el Desarrollo sustentable y la protección de los recursos naturales, incluyendo la reserva estratégica del litio para la producción de baterías [1]. En este contexto, la selección objetiva de tecnologías de almacenamiento energético requiere metodologías rigurosas que integren análisis térmico, mecánico, electroquímico y de toma de decisiones multicriterio.

El presente trabajo de investigación desarrolla un análisis comparativo exhaustivo entre dos tecnologías de baterías de iones de litio: las baterías convencionales Li-ion (cátodos de óxidos metálicos como NMC, NCA o LCO) y las baterías de ferrofosfato de litio (LiFePO_4 , LFP). La comparación se fundamenta en simulaciones computacionales utilizando ANSYS Fluent 2026 R1 con el módulo Battery Model (MSMD) para análisis térmico, y el método de toma de decisiones multicriterio ELECTRE III para la evaluación integral de ambas tecnologías [2][3][4].

La revisión bibliográfica revela que las baterías LiFePO_4 ofrecen ventajas significativas en seguridad térmica y ciclo de vida (2000– 5000 ciclos vs 500 – 1500 ciclos para Li-ion convencional), mientras que las baterías Li-ion NMC/NCA presentan mayor densidad energética (150 – 250 Wh/kg vs 90 – 160 Wh/kg) [5][6][7]. Las simulaciones térmicas documentadas en la literatura muestran que las celdas LiFePO_4 mantienen temperaturas máximas inferiores durante descargas de alta potencia, reduciendo el riesgo de fuga térmica (*thermal runaway*) [8][9][10]. El método ELECTRE ha demostrado ser efectivo para la selección de tecnologías de baterías en aplicaciones de electromovilidad [11][12], permitiendo incorporar criterios cuantitativos y cualitativos con diferentes pesos de importancia.

Palabras clave: Baterías de iones de Litio, LiFePO_4 (LFP), simulación computacional, ANSYS Fluent 2026 R1, Battery Model MSMD, método ELECTRE III, análisis térmico, electromovilidad, toma de decisiones multicriterio.

CAPÍTULO 1. GENERALIDADES

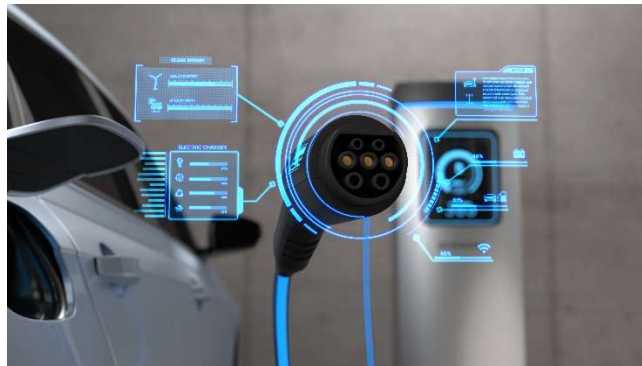
1.1. Planteamiento del problema

Contexto global de electromovilidad y almacenamiento energético

La crisis climática global ha impulsado una transición acelerada hacia sistemas de energía limpia y transporte sostenible. La Organización de las Naciones Unidas (ONU) ha establecido objetivos clave para 2025 (Emisiones netas cero, energías renovables, iniciativas para la acción climática, el acuerdo de París, (ODS) objetivos de desarrollo sostenible, financiación y justicia)[13].

Durante el primer trimestre de 2025, el mercado global de vehículos eléctricos (Fig. 1) alcanzó 2.4 millones de unidades vendidas, evidenciando el crecimiento exponencial de la electromovilidad [14].

Figura 1. Vehículo Eléctrico, Plug(conector) y display digital



Las baterías de iones de litio se han consolidado como la tecnología dominante para el almacenamiento de energía en vehículos eléctricos (VE) y sistemas de energía renovable debido a su alta densidad energética, eficiencia y vida útil relativamente prolongada [15][16].

La diversidad de químicas de cátodo disponibles (óxidos metálicos de litio-níquel-manganeso-cobalto [NMC], litio-níquel-cobalto-aluminio [NCA], litio-cobalto [LCO] y ferrofosfato de litio [LiFePO₄] presenta diferentes compromisos entre densidad energética, seguridad, costo y durabilidad [5][6].

Dicha diversidad hace necesario el desarrollo de metodologías de evaluación comparativa que permitan seleccionar la tecnología óptima según el contexto de aplicación.

Importancia de las baterías en la transición energética de México

En el contexto mexicano, el Plan Nacional de Desarrollo (PND 2025-2030) establece compromisos específicos para impulsar la industria nacional, el desarrollo sustentable y la protección de los recursos naturales [1] sin descuidar el crecimiento económico y el bienestar de las personas. México enfrenta el desafío de reducir su dependencia de combustibles fósiles, que actualmente representan el 89 % de la energía del país. Desde 2012, México aplica la Ley General de Cambio Climático, que propone reducir en 50 % las emisiones contaminantes para 2050 respecto a los niveles del año 2000, mediante acciones de mitigación y adaptación frente al fenómeno global [17] Fig. 2. En este contexto, la electromovilidad representa una estrategia clave para la descarbonización del sector transporte.

Figura 2. Compromisos de México ante el cambio climático



Fuente: [18] Semarnat

Durante el primer trimestre de 2025, la Asociación Mexicana de Distribuidores de Automóviles (AMDA) registro 33,360 vehículos eléctricos (VE) e híbridos conectables (PHEV) vendidos en México, representando el 9.1 % del total de autos nuevos vendidos [18]. Esto significa evitar emisiones de más de 123,000 toneladas de CO₂ equivalente por año de operación. La SENER ha establecido estrategias de transición energética hacia combustibles más limpios para el periodo 2024-2030 [19].

Problema específico: necesidad de comparar objetivamente Li-ion vs LiFePO₄

Las baterías Li-ion convencionales con cátodos de óxidos metálicos NMC/ NCA/LCO ofrecen alta densidad energética (150-250 Wh/kg), lo que permite mayor autonomía vehicular, pero presentan desafíos significativos en términos de seguridad térmica, con riesgo de fuga térmica (thermal runaway) a temperaturas elevadas [8][20]. Por otro lado, las baterías de ferrofosfato de litio (LiFePO₄) han ganado atención debido a su superior estabilidad térmica, mayor seguridad, ciclo de vida extendido (2000-5000 ciclos) y menor costo de materiales, aunque con una densidad energética inferior (90-160 Wh/kg) [5][6][7].

La estructura cristalina de olivino del LiFePO₄, proporciona estabilidad estructural durante los ciclos de carga y descarga, reduciendo la degradación y mejorando la seguridad [21]. Las simulaciones térmicas mediante dinámica de fluidos computacional (CFD) permiten predecir distribuciones de temperatura, identificar puntos calientes y evaluar estrategias de gestión térmica sin la necesidad de prototipos físicos costosos [8][9][10].

Justificación de enfoque de simulación computacional

La simulación computacional se erige como una herramienta indispensable en la ingeniería de baterías, permitiendo el análisis de fenómenos acoplados electroquímicos, térmicos y mecánicos que son difícil de medir experimentalmente. El módulo Battery Model (MSMD- Multi-Scale Multi-Domain del software ANSYS Fluent 2026 R1 integra ecuaciones de conservación de energía, especies y carga, acoplados con modelos de generación de calor basados en la ecuación de Bernardi, ofreciendo una representación precisa que permite simular el comportamiento térmico y electroquímico de celdas de batería bajo diferentes condiciones de operación [3].

Estudios recientes han demostrado que este enfoque multi-escala mejora la predicción de gradientes térmicos y distribución de corriente, así como la estimación de temperatura en celdas de litio, factor significativo para la seguridad y su vida útil [22]. Además de su valor científico [2], la simulación reduce la necesidad de múltiples prototipos físicos, lo que se traduce en economía, mayor productividad y eficiencia en el desarrollo de nuevas tecnologías de almacenamiento energético.

La integración de resultados de simulación con el método ELECTRE (Elimination Et Choix Traduisant la Realité) proporciona un marco robusto para la toma de decisiones multicriterio. ELECTRE es particularmente adecuado para problemas de selección de tecnologías energéticas porque permite manejar criterios conflictivos, incorporar preferencias de los tomadores de decisiones mediante pesos y umbrales, y proporcionar relaciones de superación que identifican alternativas dominantes [4][11][12].

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo General

Comparar el desempeño térmico de baterías de ion litio (Li-ion NMC/NCA) y ferrofosfato de litio (LiFePO_4) mediante simulación computacional utilizando ANSYS Fluent 2026 R 1 con el módulo Battery Model (MSMD), en integrar los resultados en un análisis de toma de decisiones multicriterio mediante el método ELECTRE III para determinar la tecnología óptima para aplicaciones de electromovilidad en ciudades como Los Mochis, Ahome, Sinaloa.

1.2.2. Objetivos específicos

1. Desarrollar modelos de simulación térmica de celdas de batería Li-ion y LiFePO_4 en ANSYS Fluent 2026 R1 utilizando el módulo Battery Model (MSMD), para evaluar distribución de temperatura, temperatura máxima y puntos calientes bajo diferentes tasas de descarga (1 C y 2 C) y temperaturas ambientes (25 °C y 45 °C), condiciones representativas de Los Mochis, Sinaloa [23].

2. Aplicar el método ELECTRE III para evaluar y clasificar las tecnologías de batería de Li-ion y LiFePO_4 considerando seis criterios ponderados: densidad energética (22%), seguridad térmica (18%), ciclo de vida (16 %), costo (15 %), eficiencia de operación (17%) e impacto ambiental (12%) [4][11][12].

3. Validar estadísticamente los resultados de simulación mediante análisis de varianza (ANOVA) (temperatura máxima) para ambas tecnologías de batería.

1.3. Hipótesis

Hipótesis de investigación (H_1): Las baterías de ferrofosfato de litio (LiFe PO_4) presentan un desempeño térmico superior (menor temperatura máxima y distribución más uniforme) y mayor seguridad operacional comparadas con la baterías de Li-ion convencionales (NMC/NCA) bajo condiciones de descarga, lo cual será evidenciado mediante simulaciones en ANSYS Fluent 26R1 y confirmado por el método ELECTRE III al considerar criterios de seguridad térmica y ciclo de vida con ponderaciones significativas [5][8][22].

Hipótesis nula (H_0): No existe diferencia estadísticamente significativa ($\alpha = 0.05$) en el desempeño térmico (temperatura máxima) entre baterías de Li-ion y LiFePO_4 bajo las mismas condiciones de operación (tasa de descarga, temperatura ambiente), y el método ELECTRE III no identificará una alternativa claramente dominante al considerar el conjunto completo de criterios ponderados.

Hipótesis alternativa (H_2): Las baterías Li-ion convencionales (NMC/NCA) serán identificadas como superiores por el método ELECTRE III cuando se prioricen criterios de densidad energética y potencia específica (ponderaciones >25% combinadas), a pesar de su desempeño térmico inferior, debido a los requerimientos de autonomía en aplicaciones de electromovilidad.

1.4. Justificación

Justificación científica

La investigación contribuye al conocimiento científico en el campo de la ingeniería de baterías mediante el desarrollo de una metodología integrada que combina: (1) simulación térmica mediante CFD para predecir comportamiento térmico bajo condiciones realistas de operación, y

(2) análisis de toma de decisiones multicriterio para integrar criterios técnicos, económicos y ambientales en una evaluación holística. Estudios recientes documentan ampliamente simulaciones térmicas de baterías Li-ion [10][24][25] y caracterización de baterías LiFePO₄ [26][27], pero existe una brecha en trabajos que integren simulación computacional con métodos MCMD para proporcionar recomendaciones cuantitativas y objetivas.

Justificación tecnológica

El desarrollo de capacidades de simulación computacional en instituciones académicas en México es estratégico para reducir la dependencia de tecnología extranjera y fortalecer la industria nacional de electromovilidad. ANSYS Fluent 2026 R1 es una herramienta de ingeniería asistida por computadora (CAE) ampliamente utilizada en la industria automotriz y energética global [3]. Las simulaciones computacionales reducen significativamente los costos y tiempos de desarrollo al permitir la evaluación virtual de múltiples configuraciones antes de la construcción de prototipos físicos [28][29].

Justificación económica y ambiental

El mercado mexicano de vehículos eléctricos está en expansión, con un crecimiento del 9.1 % en el primer trimestre de 2025 [18]. Las baterías de LiFePO₄ utilizan hierro y fosfato, materiales más abundantes y menos tóxicos que el cobalto y níquel utilizados en baterías Li-ion convencionales, reduciendo el impacto ambiental de la minería y mejorando la reciclabilidad [7][27]. La temperatura ambiente en Los Mochis, Sinaloa puede alcanzar 45 °C en verano, condición crítica para el desempeño y seguridad de las baterías que justifica el análisis térmico propuesto [23].

1.5. Alcances y Limitaciones

Alcances

Técnico: El estudio abarca la simulación computacional de dos tecnologías de batería (Li-ion NMC y LiFePO₄) en configuración de celda individual (cilíndrica 4680 y prismática

respectivamente), considerando fenómenos térmicos acoplados. Se evaluarán dos tasas de descarga (1C y 2C) y dos temperaturas ambientes (25 °C y 45 °C), cubriendo el rango operacional representativo para las condiciones de Los Mochis, Sinaloa.

Metodológico: Se desarrollará una metodología integrada que combina ANSYS Fluent 2026 R1 (Battery Model MSMD, el método ELECTRE III y análisis estadístico básico (ANOVA). La metodología será documentada de manera detallada para permitir su reproducción.

Alcance Geográfico: El estudio se contextualiza en Los Mochis, Ahome, Sinaloa, considerando condiciones climáticas locales (temperaturas ambientes elevadas en verano) que afectan el desempeño térmico de las baterías[23]. Los resultados serán aplicables a regiones con condiciones climáticas similares en el noroeste de México.

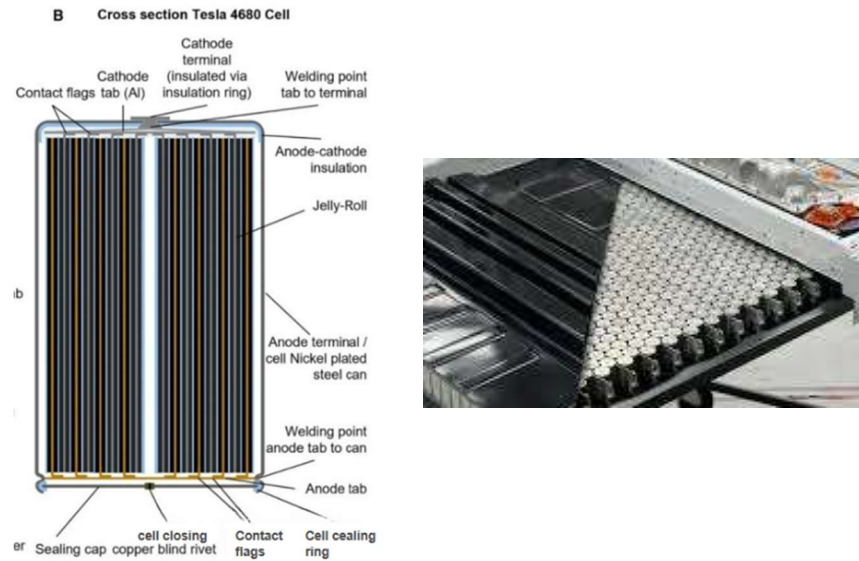
Limitaciones

Las principales limitaciones del estudio incluyen: (1) disponibilidad de las licencias de software ANSYS Fluent 2026 R1 y curva de aprendizaje del Battery Model MSMD; (2) ausencia de validación experimental directa con celdas físicas; (3) simplificaciones geométricas en los modelos de celda (geometría 2D o 3D simplificada); y (4) parámetros de materiales obtenidos de la literatura, que puedan diferir de las especificaciones exactas de las celdas comerciales.

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

2.1. Baterías de Ion Litio (Li-ion) Fig. 3.

Figura 3. Corte seccional, arreglo



Fuente: Cell Reports [30], IEST [31]

2.1.1. Principio de funcionamiento

Las baterías de iones de litio operan mediante el intercalado reversible de iones Li^+ entre los electrodos positivo (cátodo) y negativo (ánodo) a través de un electrolito líquido. Durante la descarga, iones Li^+ migran del ánodo (grafito) al cátodo (óxido metálico), mientras que los electrones fluyen por el circuito externo generando corriente eléctrica [6] [15]. Las reacciones electroquímicas fundamentales involucran la intercalación/de-intercalación de litio en la estructura cristalina de los materiales activos.

La química NMC ($\text{LiNi}_x\text{Mn}_y\text{Co}_z\text{O}_2$) ofrece alta densidad energética y es la más utilizada en vehículos eléctricos de alto desempeño. Esta química es susceptible a la descomposición térmica a temperaturas superiores a $150^\circ - 200^\circ\text{C}$, lo que puede desencadenar reacciones exotérmicas en cadena conocidas como fuga térmica (thermal runaway) [20][25].

2.1.2. Parámetros de desempeño

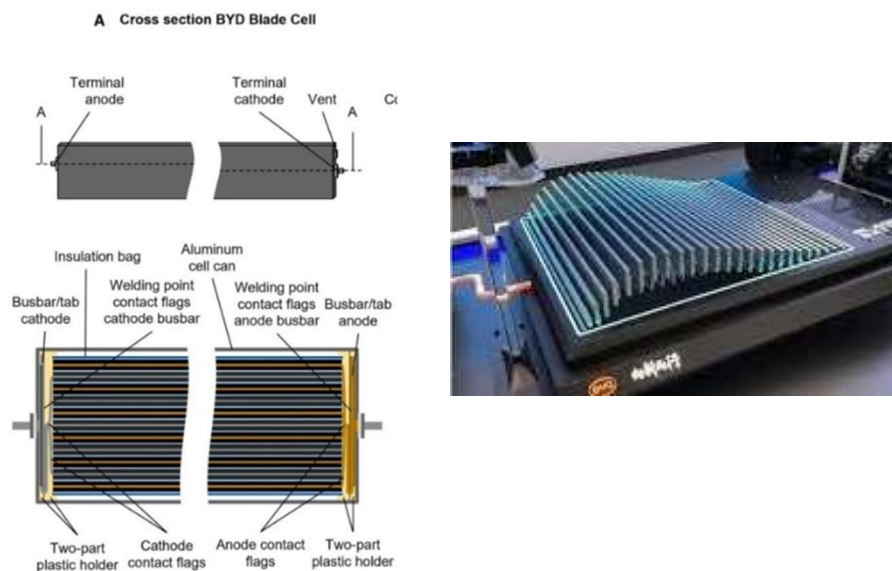
Los parámetros clave de desempeño de las baterías Li-ion incluyen: densidad energética específica (150 – 250 Wh/kg), densidad de potencia (1000 – 3000 W/kg), ciclo de vida (500 – 1500 ciclos al 80% de capacidad), eficiencia coulombica (>99%), y temperatura de operación óptima (15 – 35 °C). La tasa de descarga (C-rate) es un parámetro crítico que afecta tanto el voltaje de salida como la generación de calor interno, siendo la ecuación de Bernardi el modelo más utilizado para cuantificar la generación de calor en simulaciones CFD [9][22].

2.1.3. Mecanismos de degradación

Los principales mecanismos de degradación en baterías de Li-ion incluyen: crecimiento de la capa de interfaz electrolito-sólido (SEI) en el ánodo, disolución de metales de transición del cátodo, litio metálico (Lithium plating) a bajas temperaturas, y estrés mecánico por cambios volumétricos durante ciclos de carga-descarga [16][21]. Estos mecanismos son acelerados por temperaturas elevadas de operación, lo que refuerza la importancia del análisis térmico mediante simulación computacional.

2.2. Baterías de Ferrofosfato de Litio (LiFePO_4) Fig. 4.

Figura 4. Corte seccional, arreglo



Fuente: Cell Reports [30], IEST [31]

2.2.1. Principio de funcionamiento

Las baterías LiFePO₄ utilizan un cátodo de estructura olivino (LiFePO₄/ FePO₄) que proporciona estabilidad estructural excepcional durante ciclos de intercalación de litio. La reacción en el cátodo es: $\text{LiFePO}_4 \rightleftharpoons \text{FePO}_4 + \text{Li}^+ + \text{e}^-$. La estructura de olivino de LiFePO₄ es termodinámicamente estable y no libera oxígeno durante la descomposición térmica, lo que explica su superior seguridad comparada con los óxidos metálicos [5][21].

El voltaje nominal de 3.2 – 3.3 V de LiFePO₄ es inferior al de las baterías NMC/NCA (3.6 – 3.7 V), lo que resulta en menor densidad energética. Sin embargo, la curva de descarga del LiFePO₄ es notablemente plana (meseta de voltaje), lo que facilita la estimación del estado de carga (SOC) y proporciona voltaje estable durante la mayor parte del ciclo de descarga [6][26].

2.2.2. Parámetros de desempeño

Los parámetros de desempeño del LiFePO₄ incluyen: densidad energética específica (90 – 160 Wh/kg), ciclo de vida extendido (2000 – 5000 ciclos al 80 %), temperatura de descomposición térmica superior a 250 °C (vs 150 – 200 °C para NMC/NCA), temperatura de operación amplia (0 – 45 °C), y costo de celda inferior (80 – 100 \$/kWh vs 100 – 130 \$/kWh para NMC) [7][27].

2.2.3. Ventajas en estabilidad térmica

La estabilidad térmica superior del LiFePO₄ es su característica más relevante para aplicaciones de electromovilidad en climas cálidos como Los Mochis, Sinaloa. Estudios recientes demuestran que las celdas LiFePO₄ mantienen temperaturas máximas significativamente inferiores durante descargas de alta potencia, reduciendo el riesgo de thermal runaway incluso a temperatura ambiente elevadas [5][9][22]. La temperatura de inicio de la reacción exotérmica en LiFePO₄ es superior a 200 °C, comparada con 150 °C para NMC, proporcionando un mayor margen de seguridad.

2.3. Comparación de Parámetros clave

La tabla 1 resume los parámetros de desempeño de ambas tecnologías según la literatura reciente [6][7][15][27]. Esta información constituye la base para la construcción de la matriz de evaluación ELECTRE III.

Tabla 1. Comparación de parámetros clave Li-ion NMC vs LiFePO₄

Parámetro	Li-ion NMC	LiFePO ₄	Ventaja
Densidad de energía específica (Wh/kg)	150 – 250	90 – 160	Li-ion
Densidad de energía volumétrica (Wh/L)	400 - 700	220 – 350	Li-ion
Densidad de potencia (W/kg)	1000 - 3000	200 - 1000	Li-ion
Voltaje nominal (V)	3.6 – 3.7	3.2 – 3.3	Li-ion
Ciclos de vida (ciclos al 80 %)	500 – 1500	2000- 5000	LiFePO ₄
Eficiencia Coulómbica (%)	> 99	> 99.5	LiFePO ₄
Tasa de descarga máxima continua (C-rate)	3 - 5	1 – 3 (máx. 10 C)	Li-ion
Temperatura de operación óptima (°C)	15 – 35	0 – 45	LiFePO ₄
Temperatura de descomposición (°C)	150 – 200	>250	LiFePO ₄
Costo (\$/kWh, nivel celda, 2025)	100 – 130	80 – 100	LiFePO ₄
Impacto ambiental (materiales)	Alto (Co, Ni)	Bajo (Fe, P)	LiFePO ₄
Seguridad térmica	Moderada	Alta	LiFePO ₄
Toxicidad de materiales	Mod. – Alta	Baja	LiFePO ₄
Tasa de auto descarga (%/mes a 25 °C)	2 – 5	3 – 5	Comparable
Resistencia interna (mΩ)	30 – 50	10 – 20	LiFePO ₄

[6][7][15][27].

2.4. Método ELECTRE

2.4.1. Historias y variantes

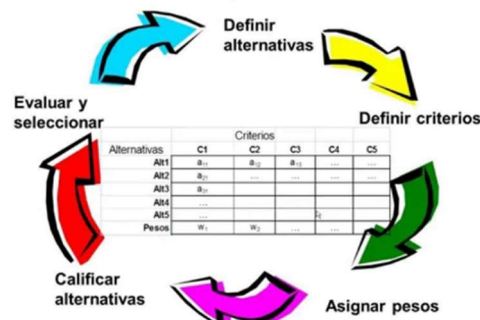
El método ELECTRE (Elimination Et Choix Traduisant la Réalité) fue desarrollado por Bernard Roy en la década de 1960 como una alternativa a los métodos de optimización clásica para

problemas de decisión multicriterio. A lo largo de su evolución, se han desarrollado diversas variantes: ELECTRE I (selección), ELECTRE II (clasificación), ELECTRE III (clasificación con umbrales), ELECTRE IV (sin pesos) y ELECTRE TRI (asignación a categorías) [4][11]. Para la comparación de tecnologías de baterías, ELECTRE III es la variante más adecuada por su capacidad de manejar incertidumbre mediante umbrales de indiferencia y preferencia.

2.4.2. Principios matemáticos

ELECTRE III construye relaciones de superación difusas entre alternativas mediante índices de concordancia y discordancia. El índice de concordancia $C(a, b)$ mide el grado en que la alternativa a supera a b según criterios evaluados, mientras que el índice de discordancia $D(a, b)$ mide el grado de oposición. La relación de superación se establece cuando $C(a, b) \geq \lambda$ y $D(a, b) \leq \mu_j$ (umbral de veto) para los criterios j [12][32]. El procedimiento de destilación ascendente y descendente permite obtener un ranking final de las alternativas, esquema visual Fig.5.

Figura 5. Esquema visual ELECTRE III



Fuente: Arce, E. [33]

2.4.3. Aplicación en selección de tecnologías energéticas.

Estudios recientes han aplicado métodos MCMD como ELECTRE para la selección de baterías en vehículos eléctricos, demostrando su efectividad para integrar criterios técnicos, económicos y ambientales. Tournaviti y Vlachokostas (2025) abordan las brechas científicas entre el análisis de ciclo de vida y los métodos MCMD para vehículos eléctricos, proponiendo un marco integrado que es relevante para la metodología del presente trabajo [4][11][12].

2.4.4. Explicación detallada del método ELECTRE

El método ELECTRE pertenece a la familia de métodos de análisis de decisión multicriterio (MCDA, por sus siglas en inglés), originado en Europa a mediados de la década de 1960 por Bernard Roy y sus colaboradores. A diferencia de otros métodos MCDA como AHP (Analytic Hierarchy Process) o TOPSIS, que buscan una utilidad agregada o un ranking completo, ELECTRE se basa en el concepto de “outranking” o superación, donde se construyen relaciones binarias entre alternativas para determinar si una opción supera a otra en la mayoría de los criterios sin ser dominada significativamente en los restantes [34].

El proceso del método ELECTRE se divide en varias etapas clave (Fig. 6 y 7):

- Definición del problema y selección de criterios y alternativas: Se identifican las alternativas a evaluar, en este caso, baterías de Ion-Litio con cátodo de níquel-manganeso-cobalto (NMC) y Ion-Litio con cátodo de ferrofosfato (LFP) y los criterios importantes (capacidad, ciclo de vida, costo etc.). Cada criterio se pondera según su importancia relativa, asegurando que la suma de pesos sea igual a 1.

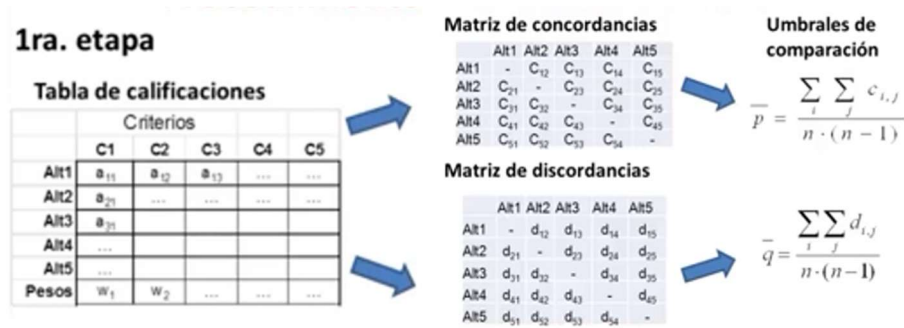
- Normalización de la matriz de decisión: Los valores de las alternativas en cada criterio se normalizan para hacerlos comparables, típicamente en una escala de 0 a 1, donde 1 representa el mejor desempeño.

- Cálculo de índices de concordancia y discordancia:

i. **Índices de concordancia:** Mide el grado en que una alternativa A supera a otra B en criterios ponderados. Se calcula como la suma de los pesos de los criterios donde A es al menos tan buena como B, dividida por la suma total de pesos. Un umbral de concordancia (c) se establece, comúnmente entre 0.5 y 0.8, para determinar si hay suficiente acuerdo.

ii. **Índice de discordancia:** Evalúa la oposición a la relación de outranking (superación). Para cada criterio donde B es mejor que A, se mide la diferencia relativa y se compara con un umbral de discordancia (d) o veto, que impide el outranking si la discrepancia es demasiado grande en un criterio crítico.

Figura 6. Visualización de la primera etapa

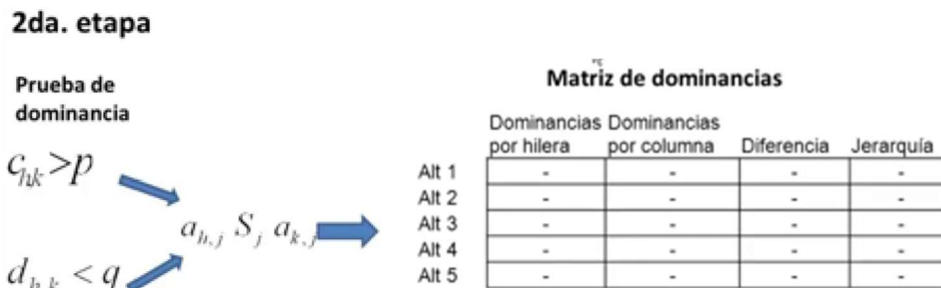


Fuente: [33] (Arce. E. 2015)

- **Construcción de la relación de outranking:** Una alternativa A outranks a B si el índice de concordancia supera el umbral c y el índice de discordancia no excede el umbral d para todos los criterios. Esto genera una matriz de outranking que representa las relaciones de dominancia.

- **Explotación de la relación de outranking:** Dependiendo de la variante de ELECTRE (por ejemplo, ELECTRE I para selección, ELECTRE II para ranking, o ELECTRE III para ranking con incertidumbre), se eliminan alternativas dominadas o se genera un orden parcial o total, En ELECTRE III, se incorporan un índice de credibilidad para manejar imprecisiones.

Figura 7. Visualización de la segunda etapa



Fuente:[33] (Arce. E. 2015)

Las ventajas de ELECTRE incluyen su capacidad para manejar criterios cualitativos y cuantitativos, tolerar incomparabilidades (cuando dos alternativas no se pueden comparar directamente), y evitar compensaciones totales entre criterios, lo que lo hace adecuado para decisiones reales donde un mal desempeño en un criterio clave no puede ser compensado por excelencias en otros [35]. Sin embargo, sus limitaciones abarcan la subjetividad en la definición de umbrales y peso, la complejidad computacional para un gran número de alternativas, y la posible generación de rankings parciales en lugar de totales.

2.5. Simulación Computacional en Ingeniería de Baterías

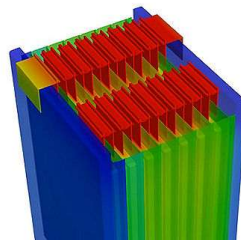
2.5.1. ANSYS Fluent 2026 R1 – Battery Model (MSMD)

ANSYS Fluent 2026 R1 incorpora el módulo Battery Model basado en el modelo Multi-Scale Multi-Domain (MSMD), que permite simular el comportamiento térmico y electroquímico de celdas de batería bajo diferentes condiciones de operación [2][3].

El modelo MSMD implementa un enfoque multi-escala que acopla:

1. Escala de partícula: Difusión de litio en partículas de material activo (ánodo y cátodo) mediante la ecuación de difusión esférica de Fick.
2. Escala de electrodo: Transporte de iones Li^+ en el electrolito a través de los electrodos porosos y separador, gobernado por la ecuación de Nernst-Planck.
3. Escala de celda: Conservación de carga en la fase sólida (electrodos) y líquida (electrolito), acoplada con generación de calor y transferencia de calor.
4. Escala de módulo/paquete: Transferencia de calor entre celdas y hacia el ambiente, considerando conducción convección y radiación. Fig. 8 imagen de una geometría.

Figura 8. Visualización de una geometría compleja en Ansys Fluent



Fuente: <https://www.ansys.com/applications/battery>

La generación de calor se calcula mediante la ecuación de Bernardi.

Generación de calor (ecuación de Bernardi): La generación de calor en una celda de batería incluye tres componentes principales [2][22]:

$$Q' = Q'_{rev} + Q'_{irr} + Q'_{side}$$

1. Calor reversible debido a Entropía (entrópico): $Q'_{rev} = I \cdot T \cdot (dE/dT)$

donde, I : densidad de corriente

T: temperatura

dE/dT: coeficiente entrópico

2. Calor óhmico o irreversible (efecto Joule): $Q'_{irr} = I^2 \cdot R_s = I \cdot (E - V)$

donde, R_s : resistencia interna

E: voltaje de circuito abierto (OCV)

V: voltaje terminal

3. Calor de reacciones secundarias (por cambio de fase o mezcla): $Q'_{side} = \sum_i \Delta H_i \cdot r_i$

donde, ΔH_i : entalpia de reacción r_i : tasa de reacción secundaria
i (ej. Descomposición de SEI, electrolito)

2.6. Modelo Matemático

Modelo térmico

El modelo térmico en ANSYS Fluent resuelve la ecuación de conservación de energía:

$$\rho C_p (\partial T / \partial t) = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q'$$

donde:

ρ : densidad (kg/m³)

C_p : calor específico (J/kg·K)

$\partial T / \partial t$: tasa de cambio de Temperatura con el tiempo

T: temperatura (K)

Q' : tasa generación calor volumétrica -interna (W/m³)

k: conductividad térmica (W/m·K)

∇T : gradiente de temperatura, vector que indica dirección de mayor aumento

$\nabla \cdot (k \nabla T)$: energía transferida por conducción térmica (difusión) a través de superficie del volumen

[2] [3] [22].

CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA

3.1. Tipo y diseño de investigación

La presente investigación es de tipo cuantitativa, descriptiva-comparativa y aplicada. El diseño es experimental-computacional, basado en la ejecución de simulaciones numéricas controladas con ANSYS Fluent 2026 R1. El enfoque metodológico sigue el paradigma de la simulación como herramienta de investigación ampliamente validado en la literatura de ingeniería de baterías [2] [9][10].

3.2. Variables de Estudio

Variables independientes:

- (1) Tecnología de batería: Li-ion NMC vs LiFePO₄
- (2) Tasa de descarga (C-rate): 1C y 2C
- (3) Temperatura ambiente: 25 °C y 45 °C.

Variables dependientes:

- (1) Temperatura máxima de la celda (°C)

3.3. Metodología de Simulación en ANSYS Fluent 2026 R1

3.3.1. Geometría y Modelado CAD.

Se modelará 1 celda cilíndrica tipo 4680 NMC811 (diámetro 46 mm, longitud 80 mm) y 1 celda prismática tipo Blade (altura 90 mm, longitud 960 mm, profundidad 14 mm). La geometría se construirá directamente en ANSYS Design Modeler o se puede importar en formato *.step/*.iges. La celda se modelará como un dominio sólido con propiedades anisotrópicas (conductividad térmica diferente según en la dirección que se mida) [2][22].

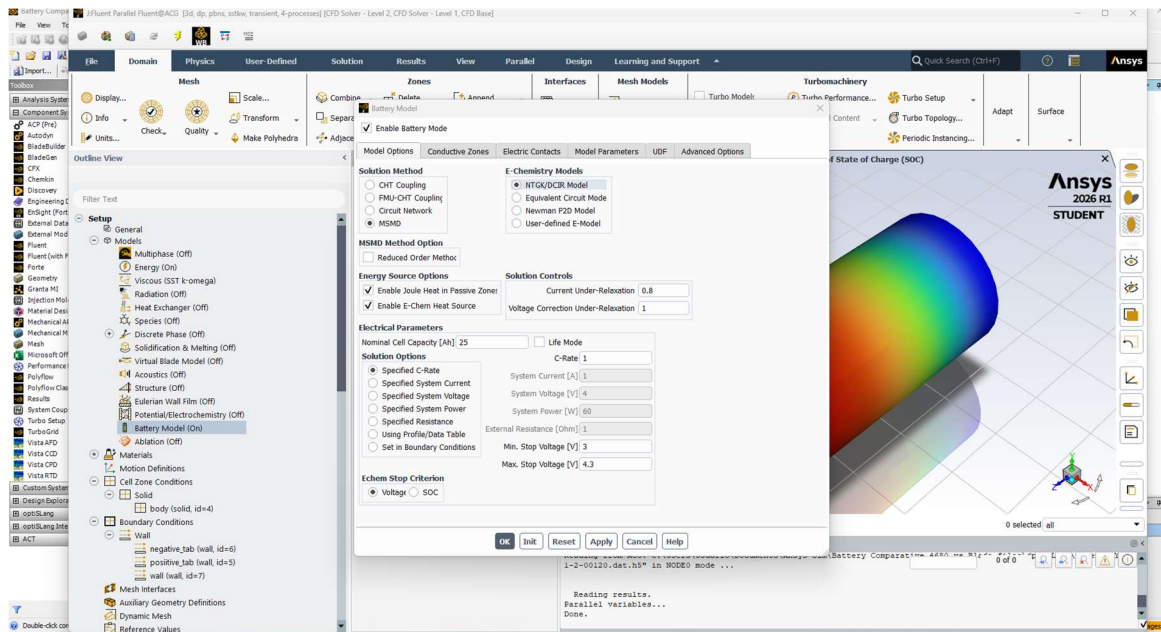
3.3.2. Configuración del Battery Model (MSMD) en ANSYS Fluent Fig. 9.

La configuración del Battery Model requiere los siguientes pasos:

- (1) Activar el módulo Battery Model en Cell Zone Conditions

- (2) Seleccionar modelo electroquímico (NTGK o Equivalent Circuit Mode)
- (3) Ingresar parámetros del modelo capacidad nominal (Ah), voltaje nominal (V), resistencia interna (Ω), coeficientes U (SOC) y Y(SOC) de la tabla de datos
- (4) Configurar condiciones iniciales de SOC y temperatura
- (5) Definir el perfil de descarga (corriente constante)

Figura 9. Configuración de Battery Model en Ansys Fluent



Elaboración propia utilizando Battery Model de ANSYS Fluent 2026R1 Fuente: Ansys, [3]

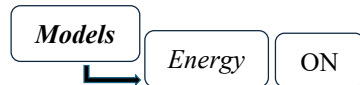
Los parámetros de materiales para ambas tecnologías se obtuvieron de la literatura reciente [2][22] y se resumen en la Tabla 2:

Tabla 2. Parámetros de materiales para simulación en ANSYS Fluent

Propiedad	Li-ion NMC	LiFePO4	Unidad	Referencia
Conductividad térmica (k)	1.5 – 3.0	1.0 – 2.0	W/m·K	[15]
Calor específico (Cp)	900 – 1100	1000 – 1200	J/kg·K	[16]
Densidad (ρ)	2500 – 2800	2200 – 2500	Kg/m ³	[15]
Capacidad nominal (Qn)	3.0	3.0	Ah	Especif.
Voltaje nominal (Voc)	3.7	3.2	V	Especif.
Resistencia interna (Rs)	30 – 50	10 – 20	m Ω	[16]
Coefficiente entrópico (dE/dT)	-0.3 a +0.3	-0.2 a +0.2	mV/K	[15]
Temp de descomposición (°C)	150 – 200	>250	°C	[8]

Fuente: [2][5][22]

Configuraciones en Battery Model



El modelo *Energy* debe estar encendido.



E-Chemistry Model:	<i>Equivalent Circuit Model</i>	NMC	Blade
C rate: 1 o 2	Nominal cell (Ah):	25	138
Echem Stop Criterion:	Min. Stop V:	3	2.8
<i>Voltage</i>	Max. Stop V:	4.3	3.6

En *Model Options*, Configuración inicial del modelo, Fig. 10.

Figura 10. Configuración de Modelo Electroquímico, *C_rate*, Capacidad y criterios de voltaje fin de simulación

The figure shows two screenshots of the 'Battery Model' configuration window in ANSYS Fluent. The left screenshot is for a 25 Ah cell, and the right screenshot is for a 138 Ah cell. Both screenshots show the 'Model Options' tab with various settings for solution method, energy source options, and electrical parameters.

Left Screenshot (25 Ah):

- Enable Battery Mode:** ☒
- Solution Method:** ☐ CHT Coupling, ☐ FMU-CHT Coupling, ☐ Circuit Network, ☒ MSMD
- E-Chemistry Models:** ☐ NTGK/DCIR Model, ☒ Equivalent Circuit Model, ☐ Newman P2D Model, ☐ User-defined E-Model
- MSMD Method Option:** ☐ Reduced Order Method
- Energy Source Options:** ☒ Enable Joule Heat in Passive Zone, ☒ Enable E-Chem Heat Source
- Solution Controls:** Current Under-Relaxation: 0.8, Voltage Correction Under-Relaxation: 1, ☒ Cluster Cells, ☒ Static, ☐ Dynamic
- Electrical Parameters:** Nominal Cell Capacity [Ah]: 25, Life Mode: ☐ Life Mode
- Solution Options:** ☒ Specified C-Rate, ☐ Specified System Current, ☐ Specified System Voltage, ☐ Specified System Power, ☐ Specified Resistance, ☐ Using Profile/Data Table, ☐ Set in Boundary Conditions
- Echem Stop Criterion:** ☒ Voltage, ☐ SOC

Right Screenshot (138 Ah):

- Enable Battery Mode:** ☒
- Solution Method:** ☐ CHT Coupling, ☐ FMU-CHT Coupling, ☐ Circuit Network, ☒ MSMD
- E-Chemistry Models:** ☐ NTGK/DCIR Model, ☒ Equivalent Circuit Model, ☐ Newman P2D Model, ☐ User-defined E-Model
- MSMD Method Option:** ☐ Reduced Order Method
- Energy Source Options:** ☒ Enable Joule Heat in Passive Zone, ☒ Enable E-Chem Heat Source
- Solution Controls:** Current Under-Relaxation: 0.8, Voltage Correction Under-Relaxation: 1, ☒ Cluster Cells, ☒ Static, ☐ Dynamic
- Electrical Parameters:** Nominal Cell Capacity [Ah]: 138, Life Mode: ☐ Life Mode
- Solution Options:** ☒ Specified C-Rate, ☐ Specified System Current, ☐ Specified System Voltage, ☐ Specified System Power, ☐ Specified Resistance, ☐ Using Profile/Data Table, ☐ Set in Boundary Conditions
- Echem Stop Criterion:** ☒ Voltage, ☐ SOC

Elaboración propia utilizando Battery Model de ANSYS Fluent 2026R1

Conductive Zones

Active: *Body*

En *Conductive Zones*, debemos tener como Active el cuerpo de la batería

Electric Contacts

Negative:	Positive:
<i>Anode Tab</i>	<i>Cathode Tab</i>

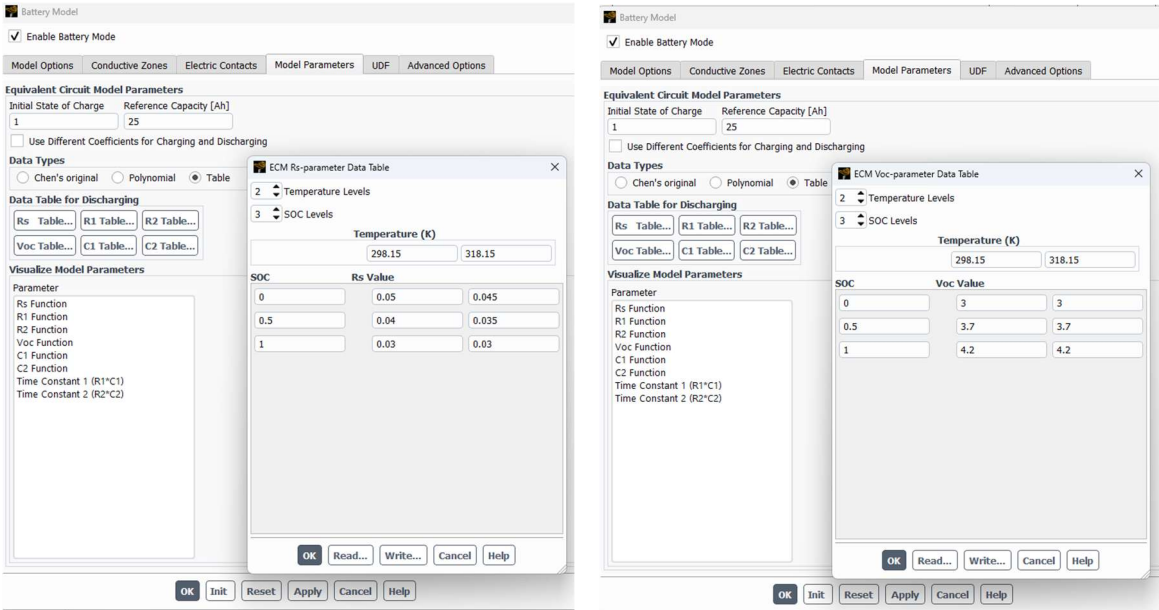
En *Electric Contacts*, seleccionamos el ánodo, negative y cátodo, positivo.

Model Parameters

		NMC	Blade
Initial State of Charge (SOC):	I	Reference Capacity (Ah)	
Data type:	$Table$	25	138
	Rs table (□ □):	$Rs\ de\ Tabla\ 2$	
	Voc table (V):	$V\ de\ Tabla\ 2$	

En *Model Parameters*. Los valores de Resistencia interna (Ω) y Voltaje a circuito abierto (Voc) *desde Tabla 2 (antes mencionada)*. Rs bajan ligeramente con el aumento de temperatura ambiente establecida. Fig. 12 y 13, ejemplo para NMC.

Figura 11. Configuración de Rs y Voc, depende de estado de carga (SOC)



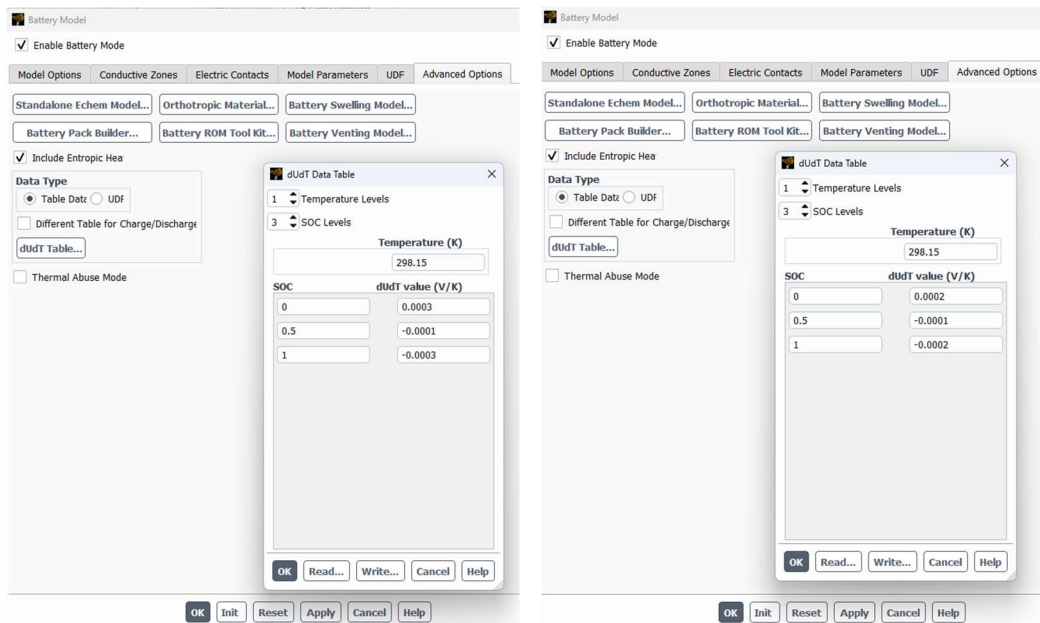
Elaboración propia utilizando Battery Model de ANSYS Fluent 2026R1

Advanced Options

Include Entropic Heat	
Data type:	$Table\ Data$
$du/dT\ (V/K)$	$dU/dT\ de\ Tabla\ 2$

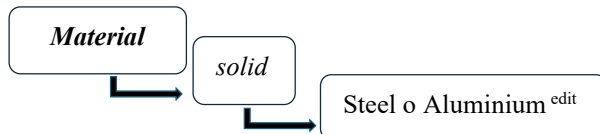
En *Advanced Options* podemos seleccionar e incluir algunos modelos independientes como el Entropic Heat por ejemplo e ingresamos los valores $dU/dT\ (V/^{\circ}K)$, coeficientes entrópicos *desde Tabla 2*, para cada estado de carga (SOC), Fig. 14 y 15 ejemplo para NMC y Blade respectivamente.

Figura 12. Configuración de modelos independientes o adicionales



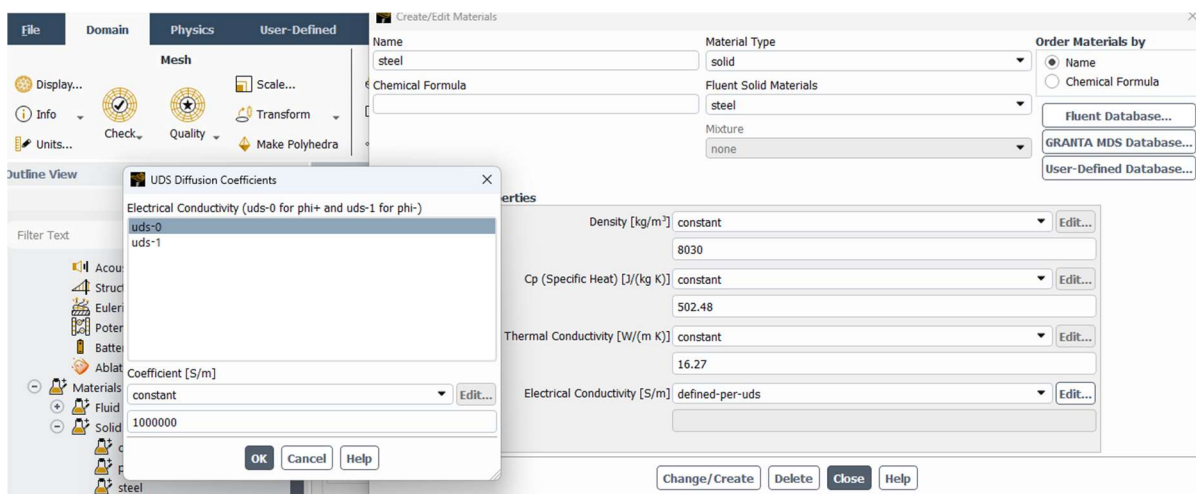
Elaboración propia utilizando Battery Model de ANSYS Fluent 2026R1

Al finalizar la configuración del modelo, se debe dar Click en *Apply*, *Init*, y *OK*.



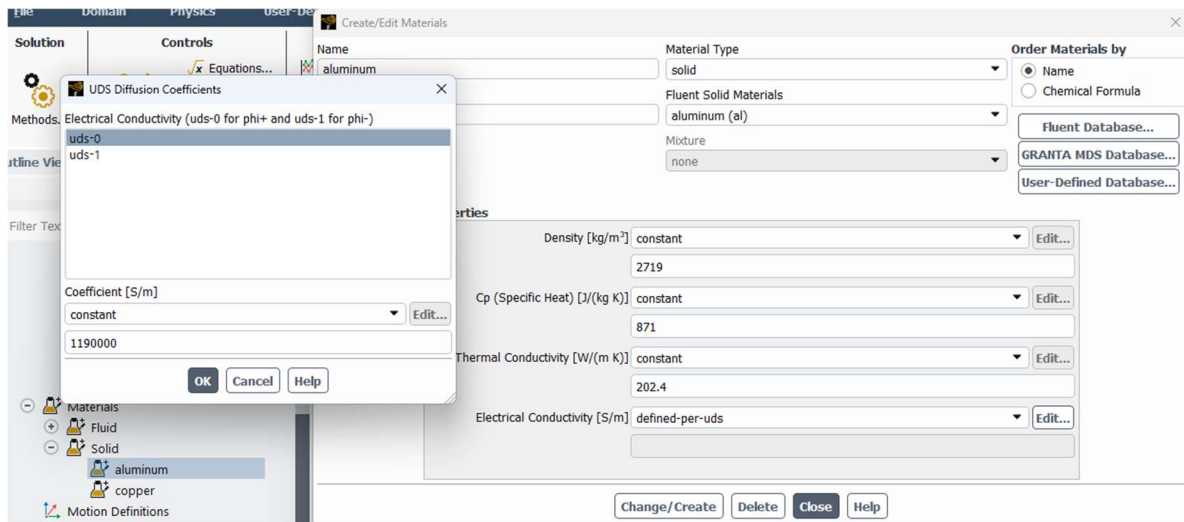
Seleccionamos *material* de batería, edit Electric Conductivity [S/m] como *defined per uds*, y establecemos uds-0: $1.19e6$ y uds-1: $1e6$. Conductividad del potencial de fase + y - respectivamente, necesario para el cálculo de Potencial eléctrico (flujo de corriente) Fig. 16, 17.

Figura 13. Establecemos Coeficientes de Difusión para el material, uds-0 = $1.19 e6$

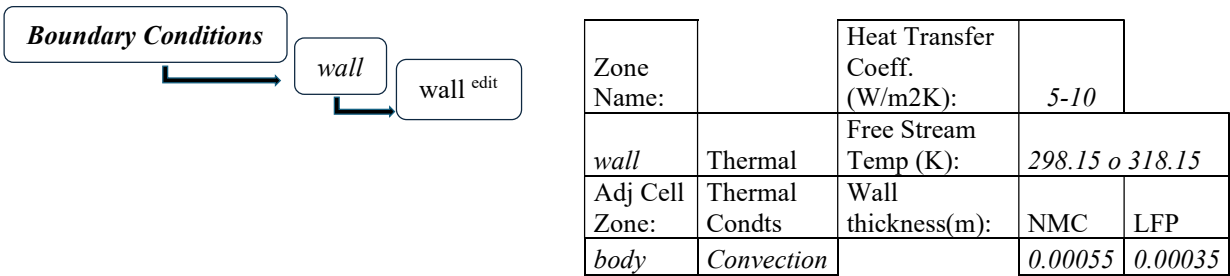


Elaboración propia utilizando Battery Model de ANSYS Fluent 2026R1

Figura 14. Establecemos Coeficientes de Difusión para el material, $uds-1 = 1.0 \text{ e6}$.

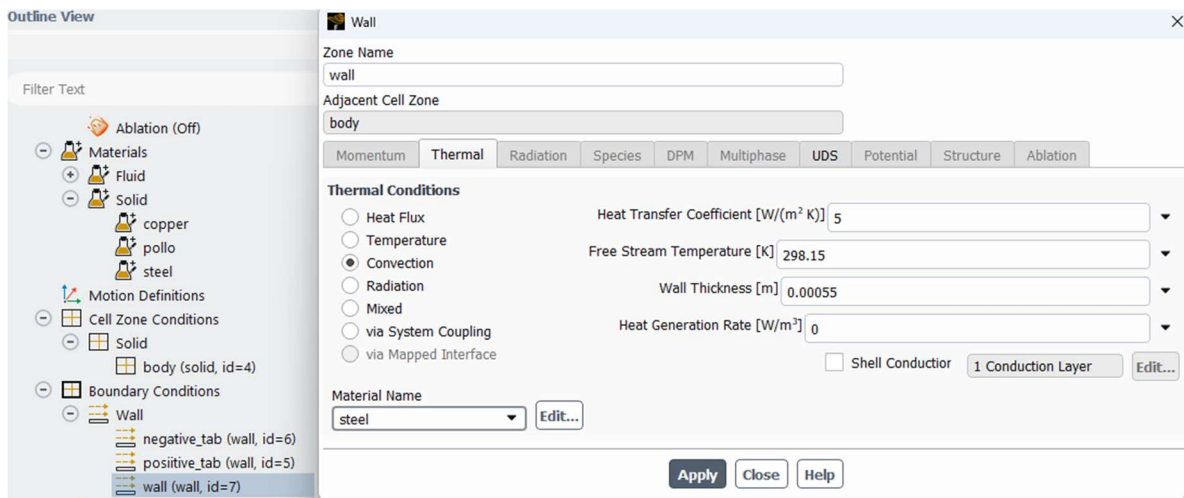


Elaboración propia utilizando Battery Model de ANSYS Fluent 2026R1



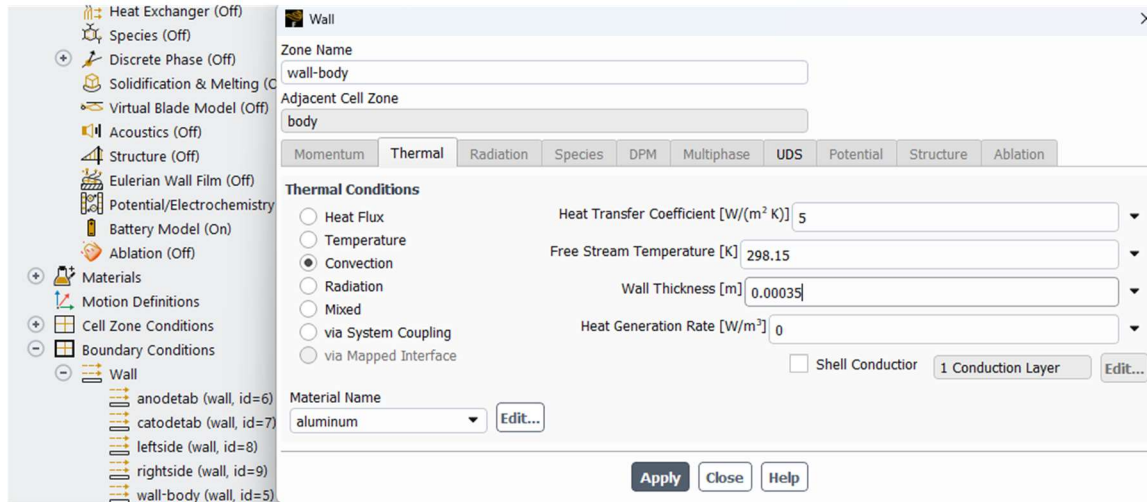
Se utiliza para establecer el tipo de material (pared de la celda) y su espesor, que estará expuesto por convección a la temperatura ambiente (298.15 °K o 318.15 °C) de simulación.

Figura 15. Configuración condición térmica, Convection para la pared de la celda, NMC, simulación



Elaboración propia utilizando Battery Model de ANSYS Fluent 2026R1

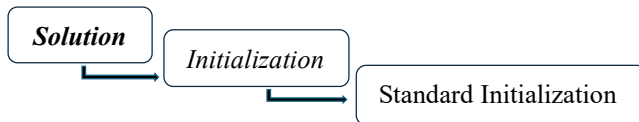
Figura 16. Configuración condición térmica, Convection para la pared de la celda, LFP, simulación



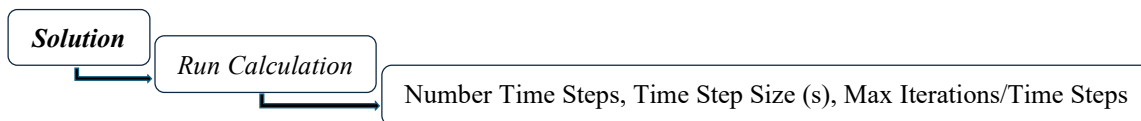
Elaboración propia utilizando Battery Model de ANSYS Fluent 2026R1



En *Equations* dejamos seleccionados: Energy, User Scalar 0 y User Scalar 1.



En *Standard Initialization* ingresamos Temperature [K]: 300 o 320 como temperatura inicial de simulación.



C rate	1	2
Number of Time Steps	360	180
Time Step Size (s)	10	10
Max. Iteration for Time Step	20	20

En *Run Calculation* ingresar: número/tamaño/máximo de iteraciones de time step para temperaturas ambiente y baterías. Click en $(t=0)$ *Initialize* y $(=)$ *Calculate*, iniciar la Simulación.



En *Report Files*, obtenemos gráficas, en *Contours*, contornos (perfiles), etc.

3.3.3. Simulaciones Térmicas Propuestas

Se proponen cuatro simulaciones térmicas comparativas en ANSYS Fluent 2026 R1:

Simulaciones Térmicas, descarga NMC vs LFP

Simulación	Condiciones	Tipo
S1	C_rate 1 a 25 °C	Condición de Referencia
S2	C_rate 2 a 25 °C	Alta Potencia, Temp Moderada
S3	C_rate 1 a 45 °C	Condición Climática Los Mochis
S4	C_rate 2 a 45 °C	Condición más Severa

Para cada simulación se registrarán: temperatura máxima (T_Max), distribución espacial de temperatura (contornos de temperatura exportados como imágenes) [2][8][10].

Contornos de temperatura en la sección transversal de la celda, Perfil de temperatura vs tiempo de descarga, Comparación de T_Max entre Li-ion y LiFePO₄.

3.4. Metodología ELECTRE III para Comparación Final

3.4.1. Definición de Criterios y Alternativas

El método ELECTRE III evaluará dos alternativas: A1 (Li-ion NMC) y A2 (LiFePO₄) considerando seis criterios ponderados que integran los resultados de la simulación con datos de la literatura [4][11][12][12]. La Tabla 3 define los criterios y sus pesos adaptados.

ELECTRE III se utiliza para decisiones multicriterio evaluando alternativas frente a criterios ponderados. En esta adaptación, se consideran 6 criterios principales: Densidad energética o capacidad (Wh/kg), ciclos de carga/descarga o vida (años), costo (\$/kWh), eficiencia (%), seguridad e impacto ambiental. En este caso se integran los resultados de las simulaciones en los criterios de eficiencia y seguridad. Cada criterio se asigna un peso equilibrado para reflejar la relevancia relativa en el contexto de electromovilidad, sumando un total de 1.0.

Tabla 3. Criterios, pesos para el método ELECTRE III

CRITERIO	PESO
Capacidad (Wh/kg)	0.22
Ciclo de vida (años)	0.16
Costo (\$/kWh)	0.15
Eficiencia (%)	0.17
Seguridad Térmica	0.18
Impacto ambiental	0.12

3.4.2. Procedimiento ELECTRE III

El procedimiento se ejecutará en los siguientes pasos: (1) Construcción de la matriz de evaluación con los valores de cada alternativa en cada criterio; (2) Cálculo de los índices de concordancia parcial $c_j(a, b)$ para cada par de alternativas y criterio; (3) Cálculo del índice de concordancia global $C(a, b)$ ponderado; (4) Cálculo de los índices de discordancia $D_j(a, b)$; (5) Cálculo del grado de credibilidad $\sigma(a, b)$; (6) Procedimiento de destilación para obtener el ranking final [20, 21, 22].

3.5. Análisis Estadístico

Los resultados de simulación se analizarán estadísticamente mediante; (1) Análisis de varianza (ANOVA de tres vías [36] [37]) para evaluar el efecto de la tecnología de batería y la tasa de descarga y la temperatura ambiente sobre la temperatura máxima de la batería.

El nivel de significancia estadística utilizado será $\alpha = 0.05$

Procedimiento en SPSS 25

En SPSS ver. 25, (Statistical Package for the Social Sciences, Paquete Estadístico para Ciencias Sociales e Investigación) en la pestaña vista de variables, se configura las características de las columnas (el nombre, tipo de dato, decimales, etiquetas, etc.) Fig. 17.

1. tipo batería: Nominal (NMC = 1, LFP = 2).
2. C_rate: Ordinal (1C = 1, 2C = 2).
3. temp_ambiente: Escalar (aunque para el ANOVA actuará como un factor categórico: 298.15 y 318.15).
4. temp_max_bateria: Escalar (esta es tu variable dependiente).

Figura 17. Vista de Variables



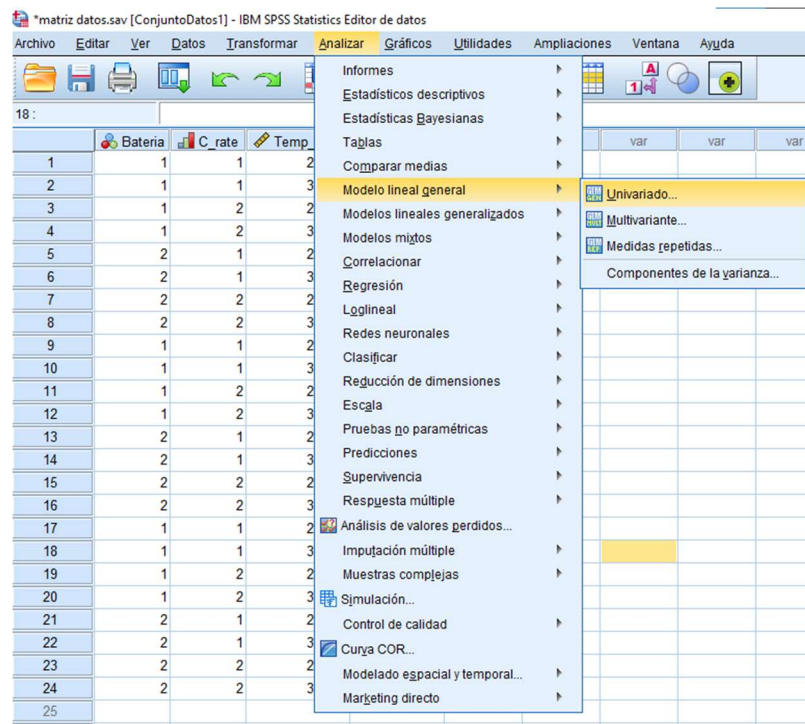
	Nombre	Tipo	Anchura	Decimales	Etiqueta	Valores	Perdidos	C...	Alineación	Medida	Rol
1	Bateria	Numérico	8	0	Tipos de Bateria	{1, NMC}...	Ninguno	8	Derecha	Nominal	Entrada
2	C_rate	Numérico	8	0	Vel. Descarga	{1, IC}...	Ninguno	8	Derecha	Ordinal	Entrada
3	Temp_Amb	Numérico	8	2	Temp Amb.	{1.00, 298.15}...	Ninguno	8	Derecha	Escala	Entrada
4	Temp_Max	Numérico	8	2	Temp Max.	Ninguno	Ninguno	8	Derecha	Escala	Entrada

En la vista de datos, es la hoja de cálculo donde se ingresa los valores o respuestas de los casos (cada fila es un sujeto y cada columna es una variable, Fig. 18).

El análisis para ANOVA de 3 vías

Analizar > Modelo Lineal General > Univariado

Figura 18. Vista de Datos



	Bateria	C_rate	Temp_Max
1	1	1	2
2	1	1	3
3	1	2	2
4	1	2	3
5	2	1	2
6	2	1	3
7	2	2	2
8	2	2	3
9	1	1	2
10	1	1	3
11	1	2	2
12	1	2	3
13	2	1	2
14	2	1	3
15	2	2	2
16	2	2	3
17	1	1	2
18	1	1	3
19	1	2	2
20	1	2	3
21	2	1	2
22	2	1	3
23	2	2	2
24	2	2	3
25			

Variable **dependiente**: temp_max_bateria

Factores **fijos**: tipo batería, C_rate, temp_ambiente

En el botón de **gráficos** de la misma ventana (Fig.19)

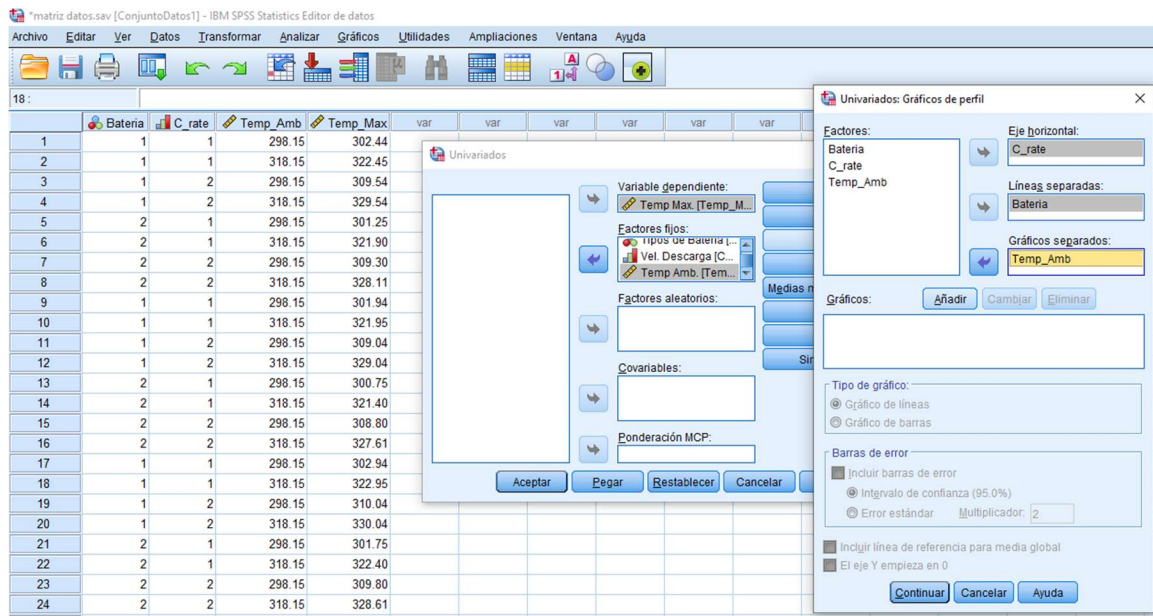
- Eje Horizontal: C_rate

- Líneas separadas: tipo_bateria

- Gráficos separados (paneles): temp_ambiente

No olvidar dar **Click** en botón **Añadir**, hasta que se ve la combinación en la lista de abajo

Figura 19. Gráficos



Click en continuar

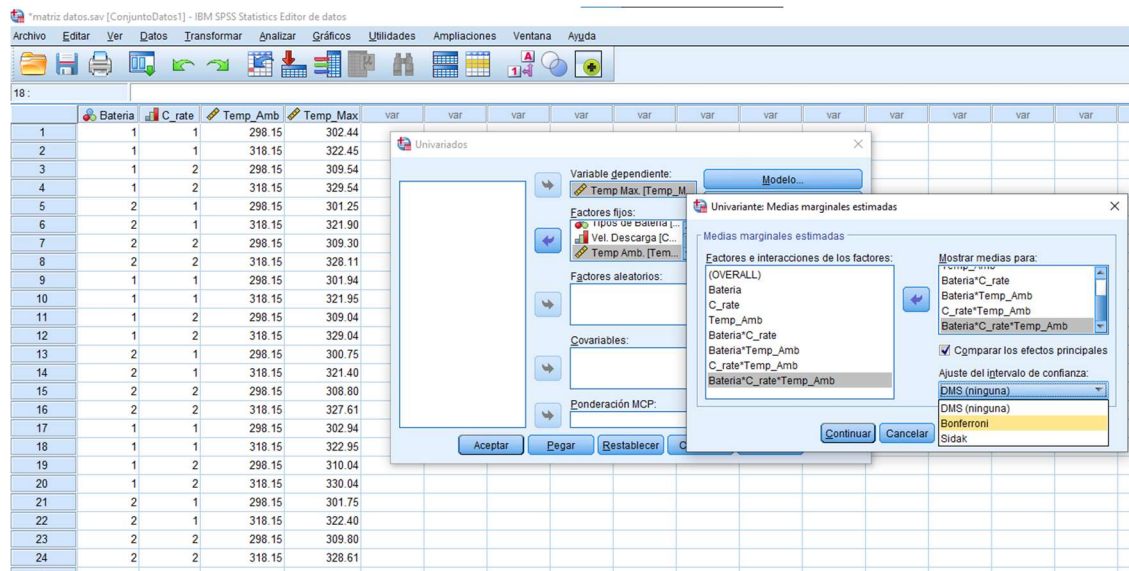
Botón **Medidas Marginales**

Pasamos las 3 variables y todas sus interacciones (tipo_bateria, C_rate, temp_ambiente, tipo_bateria*C_rate, etc.) al cuadro Mostrar medias para. (Fig. 20)

- Marcar la casilla Comparar los efectos principales.

- En el desplegable, elegir Bonferroni (es el más estándar para ajustar comparaciones).

Figura 20. Medidas Marginales

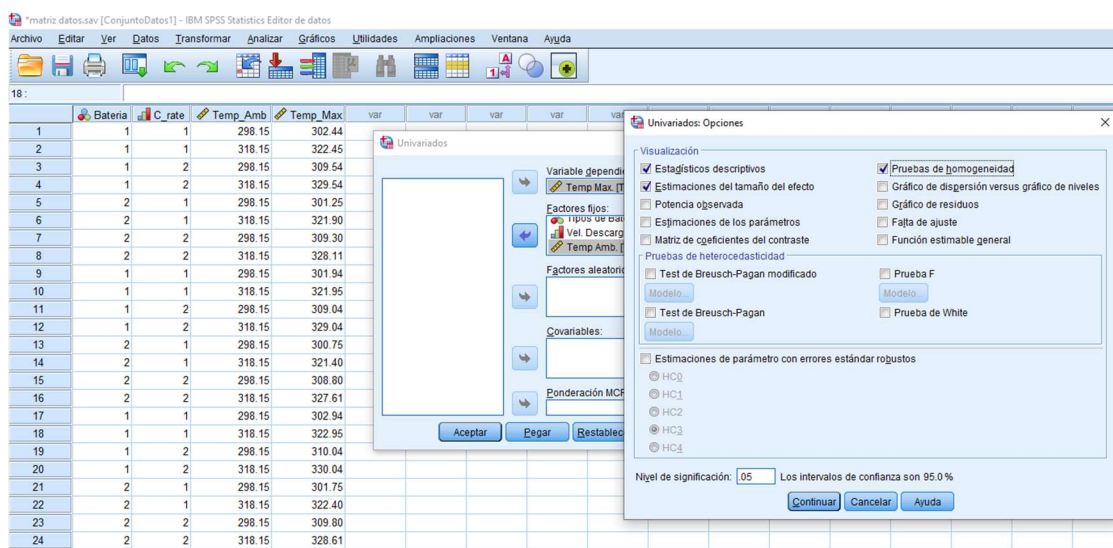


Click en continuar

Botón **Opciones** (Fig. 21)

- Estadísticos descriptivos: Para ver medias y desviaciones de los 24 datos.
- Estimaciones del tamaño del efecto: dará el Eta cuadrado parcial, que indica qué variable influye más (por ejemplo, si el C-Rate calienta más la batería que la temperatura ambiente).
- Pruebas de homogeneidad: Muy importante; activará la Prueba de Levene para asegurar que la varianza es constante en los grupos. Pruebas post hoc, no se hacen, solo tenemos 2 niveles en los factores.

Figura 21. Opciones

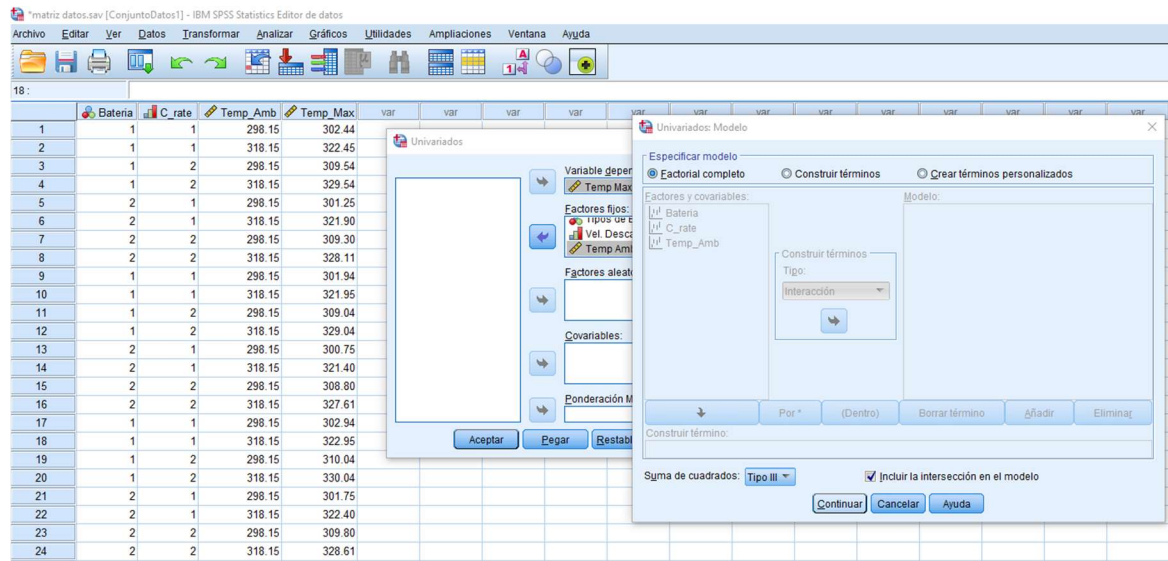


Click en continuar

Botón **Modelo**

Dejamos en Factorial completo. Esto analizará automáticamente los efectos de cada variable por separado y todas sus posibles mezclas (interacciones) Fig. 22.

Figura 22. Modelo



Continuar y Aceptar

Obtendremos las tablas y gráficos para interpretar.

CAPÍTULO 4. RESULTADOS

4.1. Resultados de Simulaciones en ANSYS Fluent

Revisando literatura reciente [8][9][10][22], en la cual se reportan rangos de temperatura máxima (Tabla 4), para la celda cilíndrica Li-ion (NMC 811, 4680) y prismática LiFePO₄ (LFP Blade), durante la descarga:

Tabla 4. Temp. Máxima en celda esperadas

C_rate	temp (°C)	NMC	LFP
1	25 (298.15 °K)	301.15-305.15	299.15-303.15
2	45 (298.15 °K)	308.15-315.15	303.15-311.15
1	45 (318.15 °K)	321.15-328.15	319.15-325.15
2	45 (318.15 °K)	328.15-338.15	323.15-333.15

Elaboración propia. [8][9][10][22].

Los datos de las simulaciones se muestran en la tabla 5.

Tabla 5. Temp. Máxima en celda, 3 simulaciones/lecturas por combinación

	Batería	C_rate	T_amb. (K)	T_Max. (K)	T_Max. (K)	T_Max. (K)
1	NMC	1	298.15	302.44	301.94	302.94
2	NMC	1	318.15	322.45	321.95	322.95
3	NMC	2	298.15	309.54	309.04	310.04
4	NMC	2	318.15	329.54	329.04	330.04
5	LFP	1	298.15	301.25	300.75	301.75
6	LFP	1	318.15	321.9	321.4	322.4
7	LFP	2	298.15	309.3	308.8	309.8
8	LFP	2	318.15	328.11	327.61	328.61

Elaboración propia desde Ansys Fluent.

Refleja los datos esperados según la bibliografía, lo cual, valida el modelo de simulación para predecir el comportamiento térmico de las baterías dentro de las condiciones establecidas, y se puede confiar en el como una herramienta para futuras predicciones.

Las simulaciones desarrolladas imitaran la realidad conforme se eficiente el diseño 3D en la geometría de las baterías, se afine la calidad del mallado (actual 89 % NMC, 100 % LFP), y se

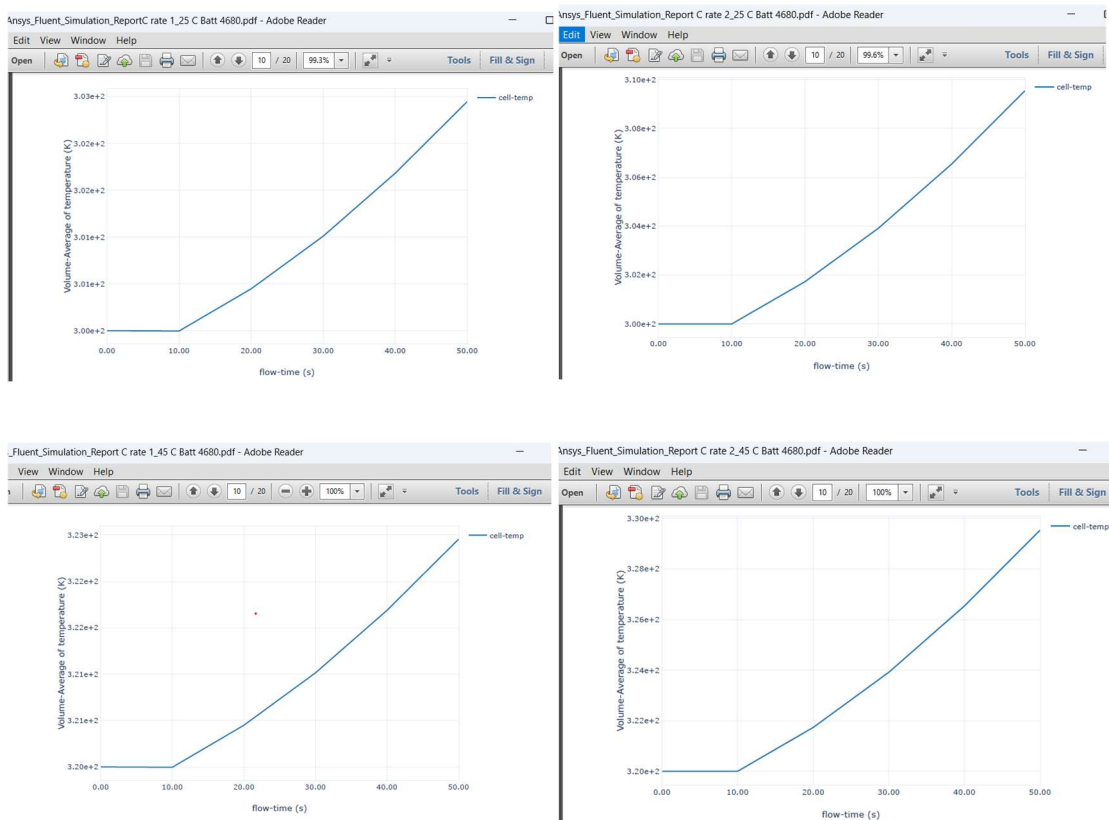
revise las características propias de los materiales, las especificaciones electroquímicas del modelo o modelos utilizados.

Debido al comportamiento determinista de la simulación CFD se introdujeron variaciones del $\pm 2\%$ en los parámetros de entrada (R_s , Resistencia interna y coeficiente de convección para simular la variabilidad de manufactura y permitir realizar el análisis de varianza (ANOVA).

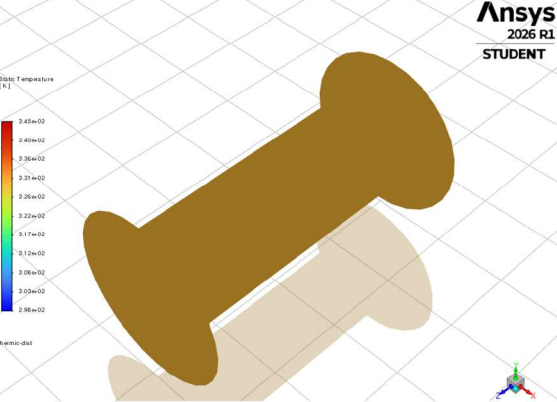
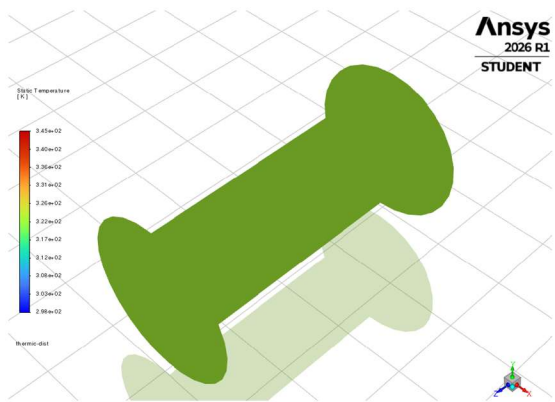
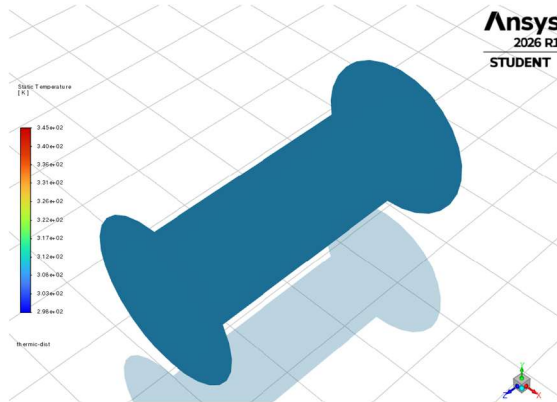
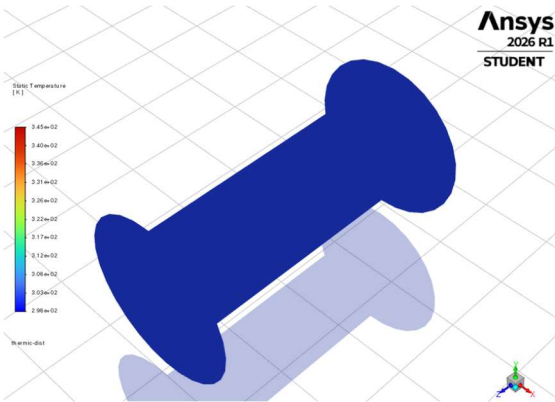
Obtuvimos una matriz de datos con 8 simulaciones/combinaciones (2 tipos de Batería x 2 tasas de descarga x 2 temperaturas ambiente por convección a las que se exponen las baterías individuales, sin ventilación o enfriamiento, 24 datos en total.

4.2. Gráficas de temperatura vs C_rate, por batería

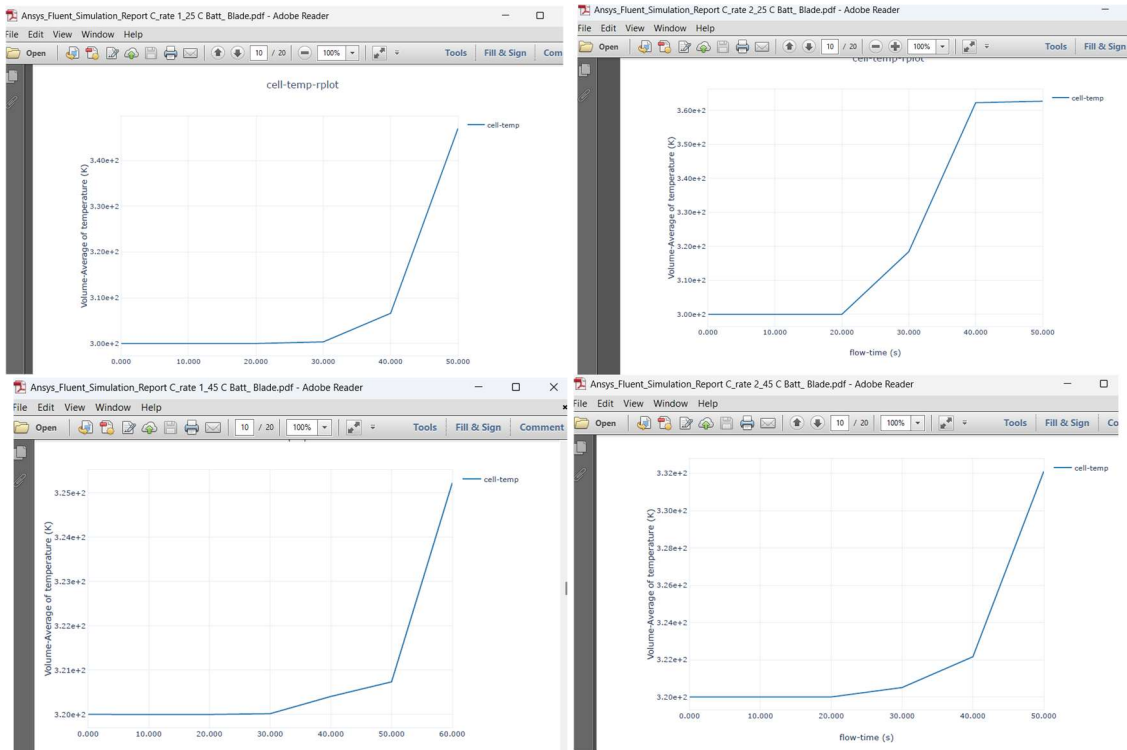
4.2.1. Perfil de temperatura vs tiempo de descarga (cilíndrica 4680, NMC)



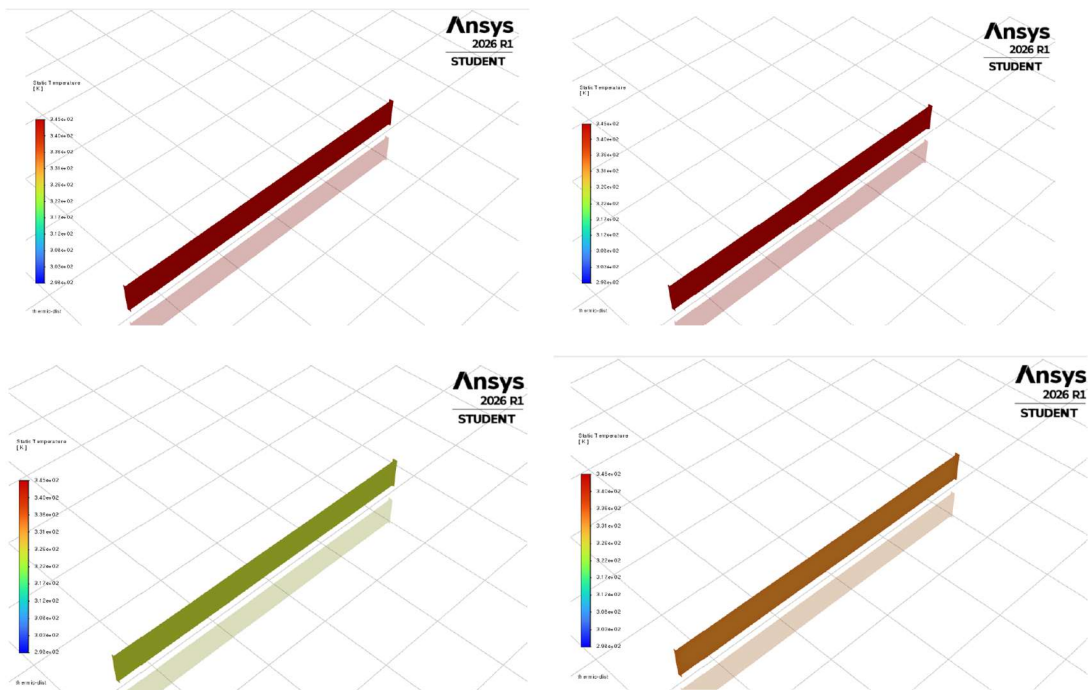
4.2.2. Contornos de temperatura en la sección transversal de la celda NMC



4.1.3. Perfil de temperatura vs tiempo de descarga (prismática Blade)



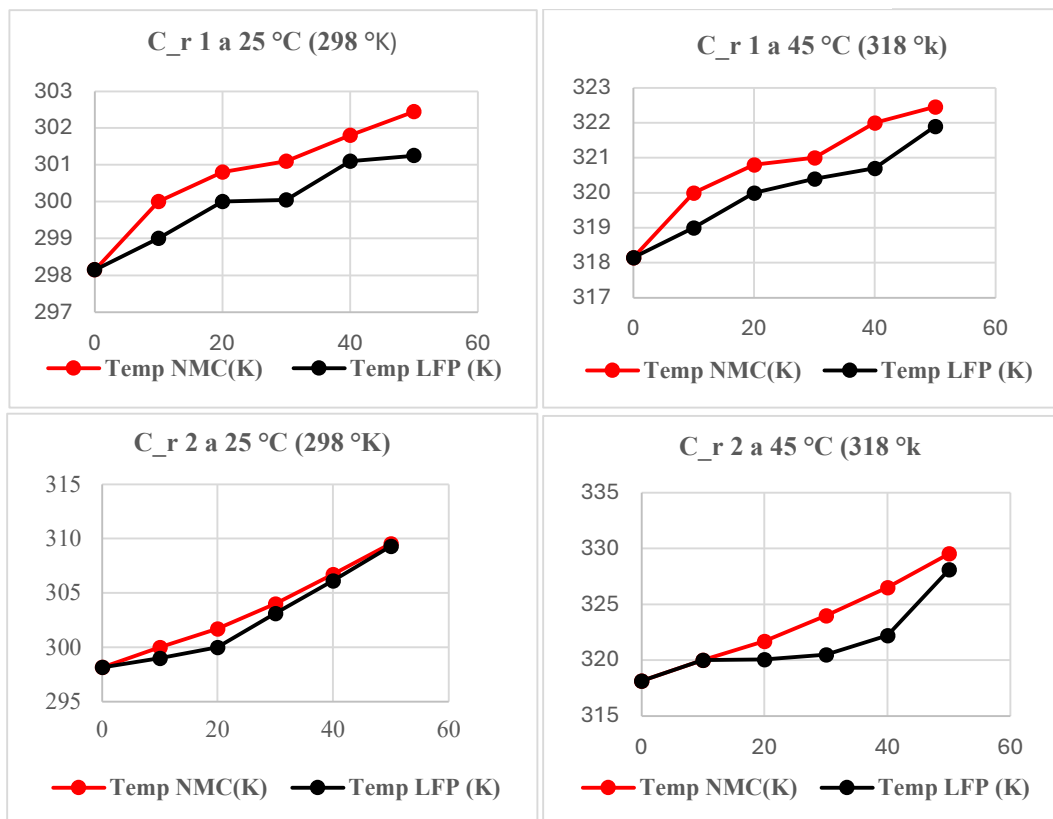
4.1.4. Contornos de temperatura en la sección transversal de la celda Blade



4.3. Graficas de Temperatura vs C_rate, comparativa entre baterías.

En las siguientes graficas podemos apreciar el comportamiento de ambos tipos de batería bajo las mismas condiciones de operación durante la simulación, es decir, a la misma temperatura ambiente y misma tasa de descarga. Figura 23.

Figura 23. Gráficos Temperatura vs C_rate, comparativa NMC y LFP



Elaboración propia en Excel 2016, con datos de simulaciones en Ansys Fluent.

Podemos comprobar visualmente que en cada caso las temperaturas máximas observadas de LFP son menores a las temperaturas máximas observadas de NMC. Determinando además de que la batería LFP (LiFePO_4) Blade es más estable su comportamiento térmico electroquímico, dato importante para su seguridad térmica y eficiencia de operación en Descarga.

4.4. Resultados de ELECTRE III.

4.4.1. Matriz de evaluación ELECTRE III

Matriz de Calificaciones Tabla 6

Tabla 6. Matriz de calificaciones

	DENSIDAD ENERGÉTICA	CICLOS VIDA ÚTIL	COSTO	EFICIENCIA	SEGURIDAD	IMPACTO AMBIENTAL
CRITERIOS	C1	C2	C3	C4	C5	C6
ALTERNATIVAS						
NMC (A1)	0.85	0.8	0.7	0.88	0.9	0.75
LFP (A2)	0.75	0.95	0.8	0.82	0.95	0.85
W	0.22	0.16	0.15	0.17	0.18	0.12

Elaboración propia utilizando método ELECTRE III

Tabla de Concordancia

Comparamos Si valor de $A1 \geq$ valor A2, ponemos valor de peso (W), si no, 0. Luego comparamos, Si valor de $A2 \geq$ valor A1, ponemos valor de peso (W), si no, 0. Tabla 7 y Resumen.

Tabla 7. Tabla de Concordancia

	A1	A2		A1	A2	FACTOR DE CONCORDANCIA
A1		0.22+0+0+0.17+0+0		A1	0.39	P = (0.39+0.61)/2
A2	0+0.16+0.15+0+0.18+0.12			A2	0.61	P = 0.5 $\approx$ 0.61

Elaboración propia

Factor P (Concordancia), es el valor superior o igual a promedio y que esté en la tabla, **P = 0.61**

Tabla de Discordancia

Comparamos Si valor $A1 \leq$ valor A2, ponemos la diferencia mayor positiva entre las calificaciones, si no, 0. Luego comparamos Si valor $A2 \leq$ valor A1, ponemos la diferencia mayor positiva entre las calificaciones, si no, 0. Tabla 8 y resumen.

Tabla 8. Tabla de Discordancia

	A1	A2		A1	A2	FACTOR DE DISCORDANCIA
A1		(0.95-0.8), (0.8-0.7), (0.95-0.9), (0.85-0.75)		A1	0.15	Q = (0.15+0.1)/2
A2	(0.85-0.75), (0.88-0.82)			A2	0.1	Q = 0.125 = 0.1

Elaboración propia

Factor Q (Discordancia), es el valor inferior o igual a promedio y que esté en la tabla, **Q = 0.1**

Tabla de Dominancia

Comparamos por filas A1, tablas de *Concordancia* y *Discordancia*, si Concordancia de A1 es $\geq$ que factor de Concordancia P y Discordancia A1 es $\leq$ que factor de Discordancia Q, 1, si no 0.

Comparamos por filas A2, tablas de *Concordancia* y *Discordancia*, si Concordancia de A2 es $\geq$ que factor de Concordancia P y Discordancia A2 es $\leq$ que factor de Discordancia Q, 1, si no 0.

Alternativa	Concordancia	Discordancia	R
A1 (NMC)	0.39 (menor a 0.61)	0.15 (mayor a 0.1)	0
A2 (LFP)	0.61 (igual a 0.61)	0.10 (igual a 0.1)	1

Comparamos por columnas A1, tablas de *Concordancia* y *Discordancia*, si Concordancia de A1 es $\geq$ que factor de Concordancia P y Discordancia A1 es $\leq$ que factor de Discordancia Q, 1, si no 0.

Comparamos por columnas A2, tablas de *Concordancia* y *Discordancia*, si Concordancia de A2 es $\geq$ que factor de Concordancia P y Discordancia A2 es $\leq$ que factor de Discordancia Q, 1, si no 0.

Alternativa	Concordancia	Discordancia	R
A1 (LFP)	0.61 (igual a 0.61)	0.10 (igual a 0.1)	1
A2 (NMC)	0.39 (menor a 0.61)	0.15 (mayor a 0.1)	0

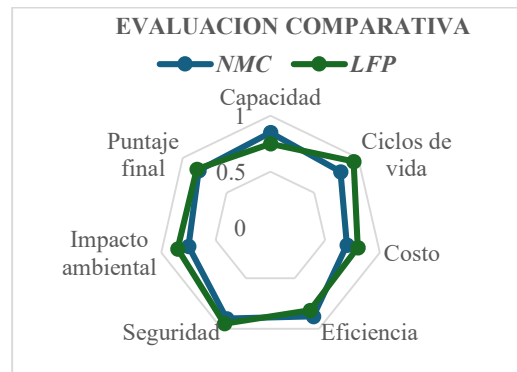
De los resultados, se resta Filas menos Columnas, la mejor opción de la comparativa es la que tiene el mayor valor, (LFP), Tabla 9 y Fig. 24.

Tabla 9. Tabla de Dominancia, Resultados

	POR FILAS	POR COLUMNAS	F-C	RESULTADO
A1	0	1	-1	NCM
A2	1	0	1	Opción adecuada LFP

Elaboración propia

Figura 24. Evaluación Comparativa



Elaboración propia en Excel 2016, con datos de ELECTRE III

4.5. Análisis Estadístico ANOVA.

El diseño es un experimento factorial $2 \times 2 \times 2$. Tiene 8 condiciones experimentales, es decir:

Variables Independientes (3) Tabla 10.

1. Tipo de batería (NMC Cilíndrica / LFP Prismática) $\rightarrow$ 2 niveles
2. Tasas de descarga (1C / 2C) $\rightarrow$ 2 niveles
3. Temperaturas ambientales (298.15 °K / 318.15 °K) $\rightarrow$ 2 niveles

Variable Dependiente (1)

1. Temperatura Máxima de la celda (batería) $\rightarrow$ 1 niveles
- 3 mediciones por cada combinación (8), 24 observaciones en total

Se realiza un análisis ANOVA de 3 vías, Modelo Lineal General Univariado, en el software *SPSS ver. 25 (IBM)*;[36] [37] para verificar interacciones entre las variables.

4.5.1. Modelo ANOVA de 3 vías completo

$$Y = A + B + C + AB + AC + BC + ABC + \varepsilon$$

donde: A: Tipo de Batería AB, AC, BC: Interacciones dobles
 B: C_rate ABC: Interacciones triples
 C: Temperatura ε : Error aleatorio

Este modelo permite evaluar no solo los efectos individuales de cada factor, sino también cómo se combinan entre sí para influir en la variable de respuesta (en este caso la temperatura de la celda). Nivel de significancia ($\alpha = 0.05$).

Tabla 10. Factores involucrados

Etiqueta de valor		N
Batería	1	NMC
	2	LFP
C_rate	1	1C
	2	2C
Temp_Amb	298.15	298.15
	318.15	318.15

Fuente SPSS v. 25.

Tabla 11. Tabla de igualdad de Levene de Varianzas de error

		Estadístico de Levene	gl1	gl2	Sig.
Temp_Max	Se basa en la media	.000	7	16	1.000
	Se basa en la mediana	.000	7	16	1.000
	Se basa en la mediana y con gl ajustado	.000	7	16.000	1.000
	Se basa en la media recortada	.000	7	16	1.000

Prueba la hipótesis nula de que la varianza de error de la variable dependiente es igual entre grupos.

a. Variable dependiente: Temp_Max

b. Diseño : Intersección + Batería + C_rate + Temp_Amb + Batería * C_rate + Batería * Temp_Amb + C_rate * Temp_Amb + Batería * C_rate * Temp_Amb

Fuente SPSS v. 25.

4.5.2. Pruebas de Efectos Tabla 11.

Tabla 12. Prueba de Efectos

Prueba de Efectos Inter-sujetos. Variable dependiente: Temp_Max						
Origen	Tipo III de suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.	Eta parcial al cuadrado
Modelo corregido	2678.846 ^a	7	382.692	1530.769	.000	.999
Intersección	2389969.395	1	2389969.395	9559877.581	.000	1.000
Batería	4.361	1	4.361	17.442	.001	.522
C_rate	303.526	1	303.526	1214.104	.000	.987
Temp_Amb	2368.305	1	2368.305	9473.221	.000	.998
Batería * C_rate	.002	1	.002	.007	.933	.000
Batería * Temp_Amb	.113	1	.113	.454	.510	.028
C_rate * Temp_Amb	1.283	1	1.283	5.134	.038	.243
Batería * C_rate * Temp_Amb	1.256	1	1.256	5.023	.040	.239
Error	4.000	16	.250			
Total	2392652.242	24				
Total, corregido	2682.846	23				

a. R al cuadrado = .999 (R al cuadrado ajustada = .998)

Fuente SPSS v. 25.

Sig. = 0.000 el modelo explica la variable dependiente.

R cuadrado = 0.999 el modelo explica el 99.9 % de la variabilidad en Temp. Máx.

4.5.3. Efectos Principales

Efecto	Sig.	Interpretación aislada
Batería	0.001	Existe diferencia promedio entre NMC y LFP
C_rate	0.000	Afecta más a la temperatura C_rate 2 que C_rate 1
Temp_Amb	0.000	Afecta, mayor Temp Amb, mayor Temp Max

4.5.4. Interacciones

AB	0.933	El efecto de C_rate es similar en ambas baterías
Batería x C_rate		
AC	0.510	Baterías reaccionan igual ante cambios de T_Amb
Batería x Temp_Amb		
BC	0.038	0.038 < 0.05, efecto de C_rate cambia con T_Amb (Tabla 12)
C_rate x Temp_Amb		
ABC	0.040	0.040 < 0.05, La diferencia entre baterías depende simultáneamente de C_rate y la Temp_Amb (Tabla 13)
Batería x C_rate x Temp_Amb		

Tabla 13. Prueba de Efectos, Interacción BC, $p = 0.038 < 0.05$

Variable dependiente: Temp_Max					
C_rate	Temp_Amb	Media	Desv. Error	Intervalo de confianza al 95%	
				Límite inferior	Límite superior
1C	298.15	301.845	.204	301.412	302.278
	318.15	322.175	.204	321.742	322.608
2C	298.15	309.420	.204	308.987	309.853
	318.15	328.825	.204	328.392	329.258

Fuente SPSS v. 25.

Tabla 14. Prueba de Efectos Interacción ABC, $p = 0.040 < 0.05$

Batería	C_rate	Temp_Amb	Media	Desv. Error	Intervalo de confianza al 95%	
					Límite inferior	Límite superior
NMC	1C	298.15	302.440	.289	301.828	303.052
		318.15	322.450	.289	321.838	323.062
	2C	298.15	309.540	.289	308.928	310.152
		318.15	329.540	.289	328.928	330.152
LFP	1C	298.15	301.250	.289	300.638	301.862
		318.15	321.900	.289	321.288	322.512
	2C	298.15	309.300	.289	308.688	309.912
		318.15	328.110	.289	327.498	328.722

Fuente SPSS v. 25.

Se encontró una interacción triple significativa ($F = 5.023$, $p = 0.040$, η^2 parcial = 0.239), lo que indica que la diferencia en la temperatura máxima entre las baterías NMC y LFP depende simultáneamente del C_rate y la temperatura ambiente.

A 25 °C y 45 °C con C_rate 1C y 2C, LFP presenta temperaturas ligeramente menores (0.5 – 1.2 °C).

A 25 °C y C_rate 2C, ambas baterías son equivalentes (diferencia < 0.3 °C)

A 45 °C y C_rate 2C, LFP presenta temperatura máxima 1.43 °C ligeramente menor que NMC, lo cual podría ser relevante en aplicaciones de alta exigencia térmica, recordemos que este estudio no incluye enfriamiento ni por aire o químico-líquido, lo cual seguramente mejoraría cuando la reacción química interna sea más estable, como la de LFP.

CAPITULO 5. CONCLUSIONES

5.1. Conclusiones Basadas en la Revisión Bibliográfica

La revisión de la literatura reciente (2024 – 2026) permiten establecer las siguientes conclusiones preliminares: (1) Las baterías LiFEPO₄ presentan ventajas significativas en seguridad térmica, ciclo de vida y costo, siendo particularmente adecuadas para condiciones climáticas cálidas como las de Los Mochis, Sinaloa [5][6][7]; (2) Las baterías Li-ion NMC mantienen ventaja en densidad energética, relevante para aplicaciones que priorizan autonomía vehicular [15][16]; (3) El modelo Battery Model MSMD de ANSYS Fluent es una herramienta validada para la simulación térmica de celdas de batería, con múltiples estudios recientes que lo utilizan exitosamente [2] [3] [22].

5.2. Conclusiones sobre la Metodología Propuesta

La metodología integrada propuesta (ANSYS Fluent 2026R1 + ELECTRE III) representa un enfoque riguroso y reproducible para la comparación de tecnologías de baterías. Existe actualmente otro software disponible llamado Aspen Plus 14, de inicio se planeaba utilizarlo para algunos estudios y simulaciones en el aspecto electroquímico, sin embargo, aunque no se utilizó, no compromete la validez científica del estudio, ya que los parámetros electroquímicos necesarios para la matriz ELECTRE III pueden obtenerse de la literatura reciente y de los resultados directos de las simulaciones térmicas en ANSYS Fluent [4][11].

5.3. Perspectivas y Trabajo Futuro

Las perspectivas a futuro incluyen: (1) Validación experimental de los modelos de simulación mediante mediciones de temperatura en celdas reales; (2) Extensión del análisis a configuraciones de módulos y packs de baterías; (3) Incorporación de modelos de degradación para evaluar el comportamiento a largo plazo; (4) Análisis del ciclo de vida (LCA) completo para cuantificar el impacto ambiental de ambas tecnologías [38][39]; (5) Desarrollo de sistemas de gestión térmica optimizados basados en los resultados de simulación.

5.4. Conclusión General

La presente investigación demuestra que la gestión térmica en baterías de alta energía es un fenómeno multivariado donde la química de la celda y las condiciones operativas actúan de forma independiente. A través de la validación del modelo en Ansys Fluent, se estableció que tanto la tecnología NMC (cilíndrica) como la LFP (prismática) operan dentro de los márgenes de seguridad térmica reportados en la literatura técnica, consolidando la simulación CFD como una herramienta predictiva de alta fidelidad.

El análisis integral mediante ELECTRE III y la estadística inferencial revela una ventaja competitiva de la tecnología LiFePO_4 (LFP) en escenarios de uso estándar y temperaturas moderadas, debido a su menor generación de calor y mayor estabilidad. Existe un dato adicional con respecto a condiciones extremas como 45°C y descarga rápida 2C, la tecnología LFP muestra una resiliencia ligeramente superior en términos de temperatura máxima absoluta, NMC un poco mayor lo que subraya la necesidad crítica de sistemas de enfriamiento activos para maximizar la vida útil en aplicaciones de alto rendimiento.

La selección de la batería ideal no es absoluta, sino que debe dictarse por el equilibrio entre robustez térmica inherente de la química y las demandas específicas del ciclo de operación.

5.5. Conclusiones por Sección

Simulación Térmica y Validación

Los resultados obtenidos en Ansys Fluent 26 R1, presentan una concordancia sólida con los rangos térmicos esperados en información especializada, validando el uso de este modelo para predecir el comportamiento térmico de celdas NMC 811 y LFP Blade.

Sensibilidad técnica, se comprobó durante las primeras simulaciones que la precisión de las predicciones futuras está directamente ligada a la optimización de la geometría 3D, la calidad de la malla (al utilizar el método de elementos finitos -FEM, que es una técnica numérica computacional utilizada para resolver problemas complejos como análisis estructural, transferencia de calor o flujo de fluidos, que al dividir una geometría en piezas pequeñas y simples facilita sus análisis).

Otra parte de vital importancia comprobada es en cuanto las especificaciones fisicoquímicas de los materiales y condiciones electroquímicas, conforme se establezca lo más fiel posible en el modelo, más eficiente será el comportamiento y los resultados, aún hay mucho por aprender.

Selección Multicriterio

Preferencia tecnológica, el método ELECTRE III identifico a la batería LiFePO_4 (LFP) como la opción más adecuada incluso a temperaturas extremas, además del ciclo de vida más eficiente.

Al obtener el mayor valor neto en la comparativa esta tecnología se posiciona como la solución más equilibrada para las prioridades establecidas en este estudio, destacando en estabilidad térmica y seguridad.

Análisis Estadístico

Se confirmó una interacción triple significativa lo que prueba estadísticamente que la temperatura máxima no depende de un solo factor, sino de la combinación simultanea de tipo de Batería, C_{rate} y la temperatura ambiente.

En condiciones estándar LFP es térmicamente más eficiente incluso sin enfriamiento y estrés térmico severo, mostro ligeramente mejor comportamiento, la realidad es que cualquier batería eléctrica automotriz, actualmente tiene enfriamiento (fluido anticongelante), pues no solo hace más eficiente el desempeño en condiciones extremas, evita la degradación y por ende incrementa el tiempo de vida de la batería.

Esto nos lleva a concluir que la hipótesis nula (H_0) se rechaza, y la Hipótesis de investigación se confirma dado que Las baterías de ferrofosfato de litio (LiFePO_4) presentan un desempeño térmico superior (menor temperatura máxima y distribución más uniforme) y mayor seguridad operacional comparadas con las baterías de Li-ion convencionales (NMC/NCA) bajo condiciones de descarga.

Aun debemos mencionar, la batería ideal es según la aplicación que le vayamos a dar, tomemos en cuenta, incluso, hábitos personales, economía al momento de adquirir un auto eléctrico, incluso la afinidad a cierta tecnología y muchas otras; nuevas tecnologías se están vislumbrando, materiales, arquitectura interior, etc., todavía está por verse lo que nos depara la innovación tecnológica.

REFERENCIAS

- [1] Presidencia de la Republica and G. de México, “Plan Nacional de Desarrollo 2025-2030,” 2025. [Online]. Available: <https://www.gob.mx/presidencia/documentos/plan-nacional-de-desarrollo-2025-2030-391771>
- [2] G. Makwana, O. Satbhai, and N. D. Pawar, “Numerical Investigation of Li-Ion Battery Pack Using Multi-scale, Multi-dimensional Electrochemical Thermal Model,” in *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, 2026, pp. 105–118. doi: 10.1007/978-981-96-8508-0_9.
- [3] A. (Synopsys), “31.2. Using the MSMD-Based Battery Models,” 2025, *Canonsburg, PA, USA*.
- [4] M. Tournaviti, C. Vlachokostas, A. V. Michailidou, C. Savva, and C. Achillas, “Addressing the Scientific Gaps Between Life Cycle Thinking and Multi-Criteria Decision Analysis for the Sustainability Assessment of Electric Vehicles’ Lithium-Ion Batteries,” *World Electr. Veh. J.*, vol. 16, no. 1, p. 44, 2025, doi: 10.3390/wevj16010044.
- [5] Z. Tang *et al.*, “Unlocking superior safety, rate capability, and low-temperature performances in LiFePO₄ power batteries,” *Energy Storage Mater.*, vol. 67, 2024, doi: 10.1016/j.ensm.2024.103309.
- [6] T. Chen, M. Li, and J. Bae, “Recent Advances in Lithium Iron Phosphate Battery Technology: A Comprehensive Review,” 2024. doi: 10.3390/batteries10120424.
- [7] A. Akyildiz *et al.*, “Optimum Selection of Lithium Iron Phosphate Battery Cells for Electric Vehicles,” *IEEE Access*, vol. 13, pp. 55070–55080, 2025, doi: 10.1109/ACCESS.2025.3553081.
- [8] J. Kim, D. Kim, S. Lim, S. Lee, J. Oh, and G. Lee, “Accelerating simulations of Li-ion battery thermal runaway using modified Patankar–Runge–Kutta approach,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 251, p. 123518, 2024, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2024.123518.
- [9] S. Lee, M. Kwon, and Y. Kim, “Preventing Thermal Runaway Propagation in Lithium-ion Batteries using a Passive Liquid Housing,” *J. Electrochem. Soc.*, vol. 171, no. 3, p. 030507, 2024, doi: 10.1149/1945-7111/ad2d3f.
- [10] D. Kim, K. Seo, S. Lim, S. Lee, and J. Kim, “Computational Safety Design of Thermal Management System of Li-Ion Battery Modules,” *J. Electrochem. Soc.*, vol. 172, no. 12, p. 120502, 2025, doi: 10.1149/1945-7111/ae1ab5.
- [11] S. C. imala Saravanan, Chinnnasami Sivaji, M. Ramachandran, “The Selection of Li-Ion

- Batteries Used in Electric Vehicles (EV)’s Using the TOPSIS Method,” *J. Appl. Chem. Phys.*, vol. 3, no. 3, pp. 11–21, 2024, doi: 10.46632/jacp/3/3/2.
- [12] P. Kumar *et al.*, “Optimizing Electric Mobility: A Multi-Criteria Decision-Making Approach for Sustainable Future of Electric Vehicles Through Smart Motor Choices,” *J. Eur. des Syst. Autom.*, vol. 57, no. 6, pp. 1825–1845, 2024, doi: 10.18280/jesa.570630.
- [13] Naciones Unidas, “La crisis climática: cinco aspectos clave para 2025,” 7 feb 2025. Accessed: May 02, 2025. [Online]. Available: <https://www.un.org/es/cambio-climático/la-crisis-climática-cinco-aspectos-para-tener-en-cuenta-en-2025#>
- [14] International Energy Agency, ““Global EV Outlook 2025,”” *IEA*, Paris, France, Tech. Rep, 2025. [Online]. Available: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2025>
- [15] and H. Z. Y. Guo, X. Liu, L. Jiang, ““Advances and Industrialization of LiFePO₄ Cathodes in Electric Vehicles: Challenges and Perspectives,”” *J. Mater. Chem. A*, vol. 13, pp. 8921–8940, 2025, doi: 10.1039/d5ta00166h.
- [16] and R. S. M. Rehm, M. Fischer, ““Comparing the Electrical Performance of Commercial Sodium-Ion and Lithium-Ion Battery Cells,’ Energy Storage Mater,”” *Sci. Direct*, vol. 633, 2025, doi: doi: 10.2139/ssrn.4937278.
- [17] C. de la Union, “Ley general de cambio climático,” *Dof*, pp. 1–45, 2014.
- [18] AJEPER, “REPORTE DE VENTAS 2022,” *Asoc. Mex. Distrib. Automóviles, México*, 2023.
- [19] DOF, “Estrategia de Transición para Promover el Uso de Tecnologías y Combustibles más Limpios,” 2024. [Online]. Available: https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5714865&fecha=23/01/2024&print=true
- [20] A. Wakale, S. Ma, and X. Hu, “Battery Thermal Runaway Propagation: A CFD Approach to Cell and Module Analysis,” in *SAE Technical Papers*, 2025. doi: 10.4271/2025-01-8164.
- [21] X. Jiang, Y. Xin, B. He, F. Zhang, and H. Tian, “Effect of Heteroatom Doping on Electrochemical Properties of Olivine LiFePO₄ Cathodes for High-Performance Lithium-Ion Batteries,” *Materials (Basel)*, vol. 17, no. 6, p. 1299, 2024, doi: 10.3390/ma17061299.
- [22] S. S. Achanta, A. Fotouhi, H. Zhang, and D. J. Auger, “Thermal Modelling and Temperature Estimation of a Cylindrical Lithium Iron Phosphate Cell Subjected to an

- Automotive Duty Cycle,” *Batteries*, vol. 11, no. 4, p. 119, 2025, doi: 10.3390/batteries11040119.
- [23] SMN and CONAGUA, “Pronóstico del tiempo por municipios,” <https://smn.conagua.gob.mx/es/>.
- [24] B. Wang, P. Kannan, Y. T. Liao, B. Kwon, V. Premnath, and J. Jeevarajan, “A numerical model for simulating thermal runaway propagation between lithium-ion battery cells with detailed heat transfer analysis,” *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 256, no. 2, 2026, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2025.128073.
- [25] A. García, C. Micó, J. Marco-Gimeno, and I. Elkourchi, “Coupled thermal runaway and combustion modeling for NMC811 Li-ion batteries safety: development and validation,” *Appl. Energy Combust. Sci.*, vol. 24, 2025, doi: 10.1016/j.jaecs.2025.100375.
- [26] L. Guo *et al.*, “Unlocking the energy capabilities of micron-sized LiFePO 4,” *Nat. Commun.*, vol. 6, 2015, doi: 10.1038/ncomms8898.
- [27] H. A. Al_Issa *et al.*, “COMPARATIVE ANALYSIS OF LITHIUM-IRON-PHOSPHATE AND SODIUM-ION ENERGY STORAGE DEVICES,” *Inform. Autom. Pomiar w Gospod. i Ochr. Sr.*, vol. 15, no. 1, pp. 49–54, 2025, doi: 10.35784/iapgos.7045.
- [28] Z. Lv, Z. Sun, L. Wang, Q. Liu, and J. Zhang, “Multi-Level Thermal Modeling and Management of Battery Energy Storage Systems,” *Batteries*, vol. 11, no. 6, p. 219, 2025, doi: 10.3390/batteries11060219.
- [29] C. Capasso, L. Iannucci, S. Patalano, O. Veneri, and F. Vitolo, “Design approach for electric vehicle battery packs based on experimentally tested multi-domain models,” *J. Energy Storage*, vol. 77, p. 109771, 2024, doi: 10.1016/j.est.2023.109971.
- [30] J. Gorsch *et al.*, “Contrasting a BYD Blade prismatic cell and Tesla 4680 cylindrical cell with a teardown analysis of design and performance,” *Cell Reports Phys. Sci.*, vol. 6, no. 3, 2025, doi: 10.1016/j.xcrp.2025.102453.
- [31] IEST Battery, “Tesla 4680 Battery VS. BYD Blade Battery: Study Reveals Different Battery Cell Technologies,” 2026.
- [32] S. Chourey and D. Naware, “A Multi-criterion Decision-Making Approach Toward Optimal Selection of Lithium Batteries for Electric Vehicle Applications,” in *Role of Plug-in Electric Vehicles in Grid Management Services*, 1st Editio., 2025, pp. 119–136. doi: 10.1201/9781003613237-7.

- [33] I. Arce, E, “Selección de alternativas,” 2015.
- [34] B. Roy, “The outranking approach and the foundations of ELECTRE methods,” *Theory and Decision*, vol. 31, no. 1, pp. 49–73, 1991, doi: 10.1007/BF00134132.
- [35] M. (Eds. . Figueira, J. R., Greco, S., & Ehrgott, “Multiple criteria decision analysis: State of the art surveys (2nd ed.),” *Springer*, 2016, doi: 10.1007/978-1-4939-3094-4.
- [36] B. P, “Data set of Lithium-Ion Battery at Different C rate,” *IEEE Dataport*, 2025, doi: 10.21227/2ev6-9g14.
- [37] Z. Chen, J. Zhang, C. Liu, C. Yang, and S. Chen, “Thermal Runaway in Lithium-Ion Batteries: A Review of Mechanisms, Prediction Approaches, and Mitigation Strategies,” 2026. doi: 10.3390/batteries12030088.
- [38] V. K. Ramesh Babu, A. S. Veerendra, S. Gandla, and Y. R. Manjunatha, “Multi-Physics Digital Twin Models for Predicting Thermal Runaway and Safety Failures in EV Batteries,” *Automation*, vol. 6, no. 4, 2025, doi: 10.3390/automation6040092.
- [39] P. H. Kumar *et al.*, “Integrated thermal and battery management for electric vehicles: Experimental validation and simulation-based optimization of lithium-ion batteries,” *Energy Explor. Exploit.*, vol. 43, no. 5, pp. 2100–2158, 2025, doi: 10.1177/01445987251337094.