



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FISICAS Y MATEMATICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA MECANICA

MODELAMIENTO DEL PROCESO DE ENFRIAMIENTO DE BATERIAS DE
ION-LITIO A TRAVES DE SOLIDOS CON CAMBIO DE FASE

MEMORIA PARA OPTAR AL TITULO DE INGENIERO CIVIL MECANICO

FELIPE MAURICIO VALDES MERY

PROFESOR GUIA:

WILLIAMS CALDERON MUÑOZ

MIEMBROS DE LA COMISION:

MARCOS ORCHARD CONCHA

JORGE REYES MARAMBIO

SANTIAGO DE CHILE

2015

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL

TITULO DE: Ingeniero Civil Mecánico

POR: Felipe Mauricio Valdés Mery

FECHA: 13/10/2015

PROFESOR GUIA: Williams Calderón Muñoz

MODELAMIENTO DEL PROCESO DE ENFRIAMIENTO DE BATERIAS DE ION-LITIO A TRAVES DE SOLIDOS CON CAMBIO DE FASE

El mercado de las baterías de ion-litio ha crecido sostenidamente en los últimos años, y se espera que éste sea de más de 55.000 millones de dólares para el año 2020. Sin embargo, en equipos de alta demanda energética como los automóviles eléctricos, las altas temperaturas dentro de las baterías puede generar diversos problemas de funcionamiento y durabilidad, por lo que encontrar métodos que controlen la temperatura se vuelve imprescindible

El presente trabajo título tiene como objetivo general estudiar el uso de materiales de cambio de fase sólido-sólido como medio de enfriamiento de baterías de ion-litio.

La metodología para desarrollar el trabajo de título consiste en buscar y escoger los PCM adecuados (X40 y NPG) y obtener sus propiedades termofísicas, modelar la generación de calor dentro de las celdas, diseñar el sistema con los parámetros correspondientes (tipo y espesor de PCM, tasa de descarga, temperatura inicial y tipo de celda), para luego simular el enfriamiento de las celdas durante la descarga. Con estos resultados, se modela la expulsión de calor posterior a la descarga y finalmente se varían los parámetros de diseño. Una vez concluidas las 288 simulaciones, se procede a estudiar el enfriamiento durante el *thermal runaway*.

Los resultados de las simulaciones muestran que en el 71% de los casos el X40 es capaz de mantener la temperatura bajo los 50°C y en el 80% en el caso del NPG. Además, se logra homogeneidad en el arreglo de celda, ya que en solo 3 de los 288 casos totales (~ 1%), la diferencia entre la temperatura máxima y mínima es mayor a 5°C. La expulsión de calor para todos los casos es lenta, superando las 10 horas en la mayoría de los casos. Mejorar la conductividad térmica y emplear convección forzada puede solucionar el problema. En cuanto la *thermal runaway*, la simulación mostró que el X95 es capaz de ralentizar la aparición de las reacciones químicas más severas, ya que si la temperatura es baja desde el comienzo de anula el feedback positivo temperatura-generación de calor.

Para mi abuela Brisa y mi abuelo Jorge.

AGRADECIMIENTOS

Dedico este trabajo a todas las personas que me han acompañado durante este largo viaje; que me vieron reír, llorar, fallar e intentar nuevamente, y que por sobre todo, me han tendido una mano desinteresada en los momentos en que lo necesitaba.

A mis padres, que me motivaron a entrar a la universidad y completar mi carrera. Sin duda, sin ellos no hubiese sido capaz de alcanzar esta meta, de la cual me siento orgulloso de alcanzar.

A mi hermano Ignacio, con el que siempre he podido contar para consejos, apoyo y distracción.

A mis amigos, antiguos y nuevos, que me ayudaron a superar esta difícil etapa de mi vida.

A mis abuelos, que siempre estuvieron orgullosos de que entrara a la universidad y que, a pesar de que hoy no están conmigo, sé lo alegres que están que haya conseguido egresar.

Tabla de Contenido

Lista de Tablas	viii
Lista de Figuras	xi
Lista de Símbolos	xii
1. Introducción	1
1.1. Motivación	1
1.2. Objetivos	3
1.2.1. Objetivo General	3
1.2.2. Objetivos Específicos	3
1.3. Alcances	4
1.4. Estructura de la memoria	4
2. Antecedentes Generales	5
2.1. Baterías	5
2.2. Baterías de ion-litio	6
2.2.1. Composición y funcionamiento	6
2.3. Problemas térmicos en las baterías	7
2.3.1. Baja temperatura de operación	7
2.3.2. <i>Thermal Runaway</i>	8
2.3.3. Temperatura no-homogénea entre celdas	9
2.4. Sistemas de enfriamiento	9
2.4.1. Almacenamiento de energía térmica	10
2.4.2. Sistema con cambio de fase sólido-sólido	11

2.5. Estado del arte	12
2.5.1. Enfriamiento por aire	13
2.5.2. Enfriamiento por agua	13
2.5.3. Enfriamiento por PCM	15
2.6. Ecuación de calor	16
2.7. Generación de calor	17
2.7.1. Ciclo de carga y descarga	17
2.7.2. Thermal runaway	20
3. Metodología	24
3.1. Metodología general	24
3.2. Proceso de descarga de las celdas	25
3.2.1. Simplificación de las celdas	25
3.2.2. Configuración del sistema	26
3.2.3. Parámetros de configuración	27
3.2.4. Condiciones de borde	29
3.2.5. Simplificación del modelo a 2D	30
3.3. Expulsión del calor	30
3.3.1. Condiciones de borde	31
3.3.2. Condiciones iniciales	31
3.4. Thermal Runaway	32
3.4.1. Simplificación de la celda	32
3.4.2. Configuración del sistema	32
3.4.3. Parámetros de configuración	34
3.4.4. Condiciones de borde	34
3.4.5. Condiciones iniciales	34
4. Resultados	35
4.1. Proceso de descarga	35
4.1.1. Validación del modelo 2D	35
4.1.2. Parámetros FEM	37
4.1.3. Calor generado	39
4.1.4. Temperaturas finales	46
4.1.5. Diferencia de temperaturas entre celdas	52

4.2. Expulsión de calor	54
4.3. Thermal runaway	58
4.3.1. Parámetros FEM	58
4.3.2. Distribuciones de temperatura	60
5. Conclusiones	65
Bibliografía	69
Apéndice A. Evolución de temperatura durante descargas	73
Apéndice B. Distribuciones finales de temperatura para la descarga	98

Índice de tablas

2.1. Comparación entre distintas tecnologías de baterías.	6
2.2. Propiedades termofísicas de SSPCMs.	12
2.3. Parámetros de reacción del proceso de <i>thermal runaway</i>	23
3.1. Propiedades termofísicas de las celdas de ion-litio a estudiar.	25
3.2. Propiedades termofísicas de los PCM seleccionados.	28
3.3. Especificaciones de las baterías SONY US18650VTC3 y US26650VT.	29
3.4. Corrientes eléctricas y tiempos de operación máximo para cada tasa de descarga.	29
3.5. Propiedades termofísicas de los componentes de la celda.	32
3.6. Propiedades termofísicas del X95.	34
4.1. Comparación entre mallas 2D. (Fuente: Elaboración propia).	38
4.2. Comparación entre mallas.	39
4.3. Calor de Joule, en [W], obtenido para distintas tasas de descarga.	40
4.4. Calor por cambio de entropía total absorbido durante el proceso de descarga en [J] para celdas 18650 y NPG como PCM.	44
4.5. Calor total absorbido durante el proceso de descarga en [J] para celdas 18650 y NPG como PCM. (Fuente: Elaboración propia).	45
4.6. Calor por cambio de entropía total absorbido durante el proceso de descarga en [J] para celdas 26650 y NPG como PCM. (Fuente: Elaboración propia).	45
4.7. Calor total absorbido durante el proceso de descarga en [J] para celdas 26650 y NPG como PCM.	45
4.8. Calor por cambio de entropía total absorbido durante el proceso de descarga en [J] para celdas 18650 y X40 como PCM.	45

4.9. Calor total absorbido durante el proceso de descarga en [J] para celdas 18650 y X40 como PCM.	46
4.10. Calor por cambio de entropía total absorbido durante el proceso de descarga en [J] para celdas 26650 y X40 como PCM.	46
4.11. Calor total absorbido durante el proceso de descarga en [J] para celdas 26650 y X40 como PCM.	46
4.12. Temperaturas finales máximas en [°C] para celdas 18650 y X40 como PCM.	47
4.13. Temperaturas finales máximas en [°C] para celdas 26650 y X40 como PCM.	48
4.14. Temperaturas finales máximas en [°C] para celdas 18650 y NPG como PCM.	50
4.15. Temperaturas finales máximas en [°C] para celdas 26650 y NPG como PCM.	51
4.16. Diferencia de temperatura máxima entre las celdas y al interior de ellas durante el proceso de descarga, en [°C], para celdas 18650 y X40 como PCM.	52
4.17. Diferencia de temperatura máxima entre las celdas y al interior de ellas durante el proceso de descarga, en [°C], para celdas 26650 y X40 como PCM.	53
4.18. Diferencia de temperatura máxima entre las celdas y al interior de ellas durante el proceso de descarga, en [°C], para celdas 18650 y NPG como PCM.	53
4.19. Diferencia de temperatura máxima entre las celdas y al interior de ellas durante el proceso de descarga, en [°C], para celdas 26650 y NPG como PCM. (Fuente: Elaboración propia).	54
4.20. Tiempos, en [h], necesarios para enfriar el sistema, para X40 como PCM.	55
4.21. Tiempos, en [h], necesarios para enfriar el sistema, para NPG como PCM.	55
4.22. Comparación entre mallas 3D.	60
4.23. Comparación entre pasos temporales. (Fuente: Elaboración propia).	60

Índice de figuras

1.1. Proyección de las ventas mundiales de baterías de ion-litio. (Fuente: IHS iSuppli Agosto 2011)	2
1.2. Proyección de las ventas mundiales de automóviles eléctricos. (Fuente: IDTechEx.)	3
2.1. Proceso de carga y descarga en una batería de ion-litio.	7
2.2. Tipos de almacenamiento de energía térmica.	10
2.3. Control de temperatura usando aire.	14
2.4. Control de temperatura usando líquido.	15
2.5. Control de temperatura usando PCM.	16
2.6. Cambio de entropía vs estado de carga. (Fuente: [23])	18
2.7. Comparación entre el ajuste polinomial y los datos obtenidos experimentalmente. (Fuente: Elaboración propia).	19
3.1. Diagrama de flujo de la metodología para desarrollar el trabajo de título.	25
3.2. Configuración a estudiar modelado en COMSOL.	26
3.3. Configuración a estudiar modelado en COMSOL.	27
3.4. Configuración a estudiar modelado en COMSOL.	30
3.5. Condiciones de borde en el proceso de expulsión de calor.	31
3.6. Simplificación de la celda.	33
3.7. Configuración del sistema para el problema de <i>thermal runaway</i>	33
4.1. (a) Malla usada para el modelo 3D. (b) Distribución final de temperatura.	36
4.2. (a) Malla usada para el modelo 2D. (b) Distribución final de temperatura.	36
4.3. Mallas más finas.	37
4.4. Mallas más gruesas.	38

4.5. Evolución del calor generado por cambio de entropía por una celda 18650 y X40 como medio de enfriamiento.	40
4.6. Evolución del calor generado por cambio de entropía por una celda 26650 y X40 como medio de enfriamiento.	41
4.7. Evolución del calor generado por cambio de entropía por una celda 18650 y NPG como medio de enfriamiento.	41
4.8. Evolución del calor generado por cambio de entropía por una celda 26650 y NPG como medio de enfriamiento.	42
4.9. Evolución del calor generado total por una celda 18650 y X40 como medio de enfriamiento.	42
4.10. Evolución del calor generado total por una celda 26650 y X40 como medio de enfriamiento.	43
4.11. Evolución del calor generado total por una celda 18650 y NPG como medio de enfriamiento.	43
4.12. Evolución del calor generado total por una celda 26650 y NPG como medio de enfriamiento.	44
4.13. Variación de la temperatura máxima final de la celda 18650 y X40 como medio de enfriamiento con respecto al espesor del PCM.	48
4.14. Variación de la temperatura máxima final de la celda 26650 y X40 como medio de enfriamiento con respecto al espesor del PCM.	49
4.15. Variación de la temperatura máxima final de la celda 18650 y NPG como medio de enfriamiento con respecto al espesor del PCM.	50
4.16. Variación de la temperatura máxima final de la celda 26650 y NPG como medio de enfriamiento con respecto al espesor del PCM.	51
4.17. Variación de la temperatura máxima en las celdas durante la expulsión de calor para el X40 como medio de enfriamiento y $T_0 = 20^\circ\text{C}$	55
4.18. Variación de la temperatura máxima en las celdas durante la expulsión de calor para el X40 como medio de enfriamiento y $T_0 = 30^\circ\text{C}$	56
4.19. Variación de la temperatura máxima en las celdas durante la expulsión de calor para el X40 como medio de enfriamiento y $T_0 = 40^\circ\text{C}$	56
4.20. Variación de la temperatura promedio del PCM durante la expulsión de calor para el X40 como medio de enfriamiento y $T_0 = 20^\circ\text{C}$	57

4.21. Variación de la temperatura promedio del PCM durante la expulsión de calor para el X40 como medio de enfriamiento y $T_0 = 30^\circ\text{C}$	57
4.22. Variación de la temperatura promedio del PCM durante la expulsión de calor para el X40 como medio de enfriamiento y $T_0 = 40^\circ\text{C}$	58
4.23. Mallas más finas.	59
4.24. Evolución de la temperatura durante el <i>thermal runaway</i> desde los 5 hasta los 30 [min].	61
4.25. Evolución de la temperatura durante el <i>thermal runaway</i> desde los 35 hasta los 60 [min].	62
4.26. Evolución de la temperatura durante el <i>thermal runaway</i> desde los 5 hasta los 30 [min].	63
4.27. Evolución de la temperatura durante el <i>thermal runaway</i> desde los 35 hasta los 60 [min].	64

Lista de símbolos

PCM	<i>Phase Change Material</i> , Material de cambio de fase
TES	<i>Thermal Energy Storage</i> , Almacenamiento de energía térmica
SSPCM	<i>Solid-Solid Phase Change Material</i> , Material de cambio de fase sólido-sólido
SLPCM	<i>Solid-Liquid Phase Change Material</i> , Material de cambio de fase sólido-líquido
SEI	<i>Solid Electrolyte Interphase</i> , Interfaz sólido-electrolito
NPG	Neopentil-glicol
X40	material de cambio de fase x40
EV	<i>Electrical Vehicle</i> , Vehículo eléctrico
HEV	<i>Hybrid Electrical Vehicle</i> , Vehículo Híbrido
ρ	Densidad [kg/m ³]
C_p	Calor específico [J/kgK]
T	Temperatura [°C,K]
t	Tiempo [s,min]
k	Conductividad térmica [W/mK]
\dot{q}	Generación de calor [W/m ³]
α	Difusividad térmica [m ²]
Q_S	Calor por cambio de entropía [W]
Q_J	Calor de Joule [W]
Q_P	Calor de polarización [W]
Q_T	Calor total [W]
T_{celda}	Temperatura de celda [°C,K]
ΔS	Cambio de entropía en la celda [J/mol-K]
I	Corriente eléctrica [A]
n	Número de carga de reacción

F	Constante de Faraday [C/mol]
E_{emf}	Potencial de circuito-abierto [V]
V	Voltaje de la celda [V]
V_0	Voltaje de circuito abierto [V]
R_η	Resistencia de sobrepotencial [Ω]
R_{celda}	Resistencia eléctrica de la celda [Ω]
D_{cell}	Diámetro de celda [mm]
e_{pcm}	Espesor de PCM [mm]
L_x	Largo en el eje x [mm]
L_y	Largo en el eje y [mm]
SOC	<i>State of Charge</i> , Estado de carga

Introducción

1.1. Motivación

Actualmente, el uso de baterías de ion-litio como almacenamiento de energía se encuentra ampliamente masificado, encontrándose en dispositivos electrónicos, médicos, máquinas, debido a su alta energía específica y potencia específica [1]. Esto se ve reflejado en el crecimiento del mercado de este tipo de baterías, como se muestra en la Figura 1.1, en donde se espera que para el año 2020, las ventas totales mundiales de baterías de ion-litio alcancen los 55.000 millones de dólares [2].

Sin embargo, en estas baterías se genera calor durante los procesos de carga/descarga, todo producto de reacciones electroquímicas y químicas [3]. Este calor se traduce en aumentos de temperatura de las celdas, lo que genera que el funcionamiento se vea perjudicado, acortando la capacidad de la batería y su vida útil [4]. Esta generación de calor se vuelve especialmente significativa en los equipos de alta demanda energética, tales como automóviles eléctricos e híbridos, trenes de alta velocidad, vehículos ligeros (scooters, bicicletas) y aviones.

Por otro lado, debido a los problemas asociados al uso de combustibles fósiles como medio principal de energización (cambio climático, costo al alza, escasez de oferta), cada vez más países ofrecen incentivos económicos como subsidios y exenciones tributarias, a las empresas y personas que utilicen equipos eléctricos en desmedro de los combustibles fósiles como el petróleo, en aplicaciones de mayor demanda, por lo que se espera que sus ventas aumenten consistentemente como se muestra en la Figura 1.2, para los automóviles eléctricos [5].

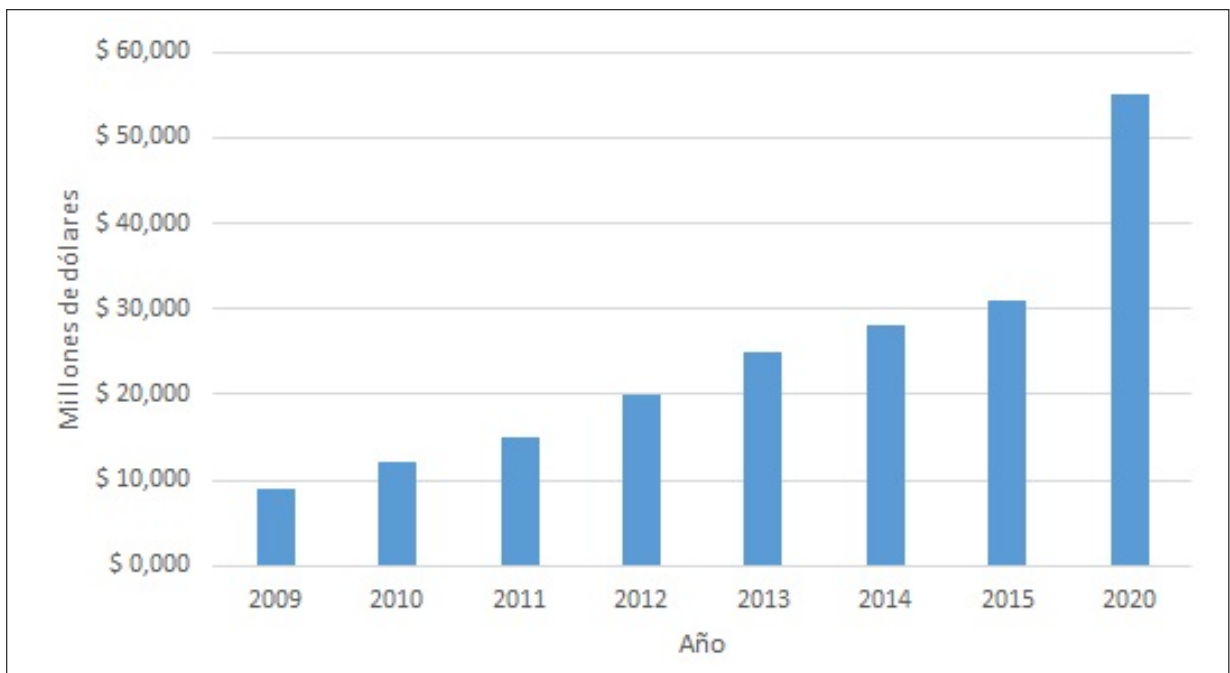


Figura 1.1: Proyección de las ventas mundiales de baterías de ion-litio. (Fuente: IHS iSuppli Agosto 2011)

Como consecuencia de esto, diversos métodos se han propuesto y desarrollado para el control térmico de las baterías de ion-litio. Tanto sistemas activos como pasivos utilizando líquidos refrigerantes, agua o aire [6], son empleados actualmente con el fin de mantener las celdas en rangos de temperaturas óptimas y homogéneas. No obstante, en general estos métodos que utilizan fluidos requieren complejos sistemas de dispositivos, aumentando los costos, el tamaño, el peso y en el caso de los sistemas activos, utilizando la misma energía de las baterías para funcionar.

Debido a estas razones, sistemas pasivos utilizando PCM (materiales de cambio de fase) han sido investigados y propuestos en el último tiempo [7]. Este tipo de sistema consiste en rodear el material a enfriar con el PCM, para que este absorba la energía como calor latente. Sabbah et al. [8] propuso un método de enfriamiento usando un compuesto de grafito y cera de parafina. Este fue capaz de mantener la temperatura bajo los niveles críticos y una buena uniformidad en el arreglo. Sin embargo, este tipo de PCM que tiene un cambio de fase de tipo sólido-líquido, presenta algunas dificultades que deben ser corregidas (baja conductividad térmica, subenfriamiento, derrames o fugas).

Por esta razón, es importante estudiar el comportamiento térmico de las baterías de litio, y

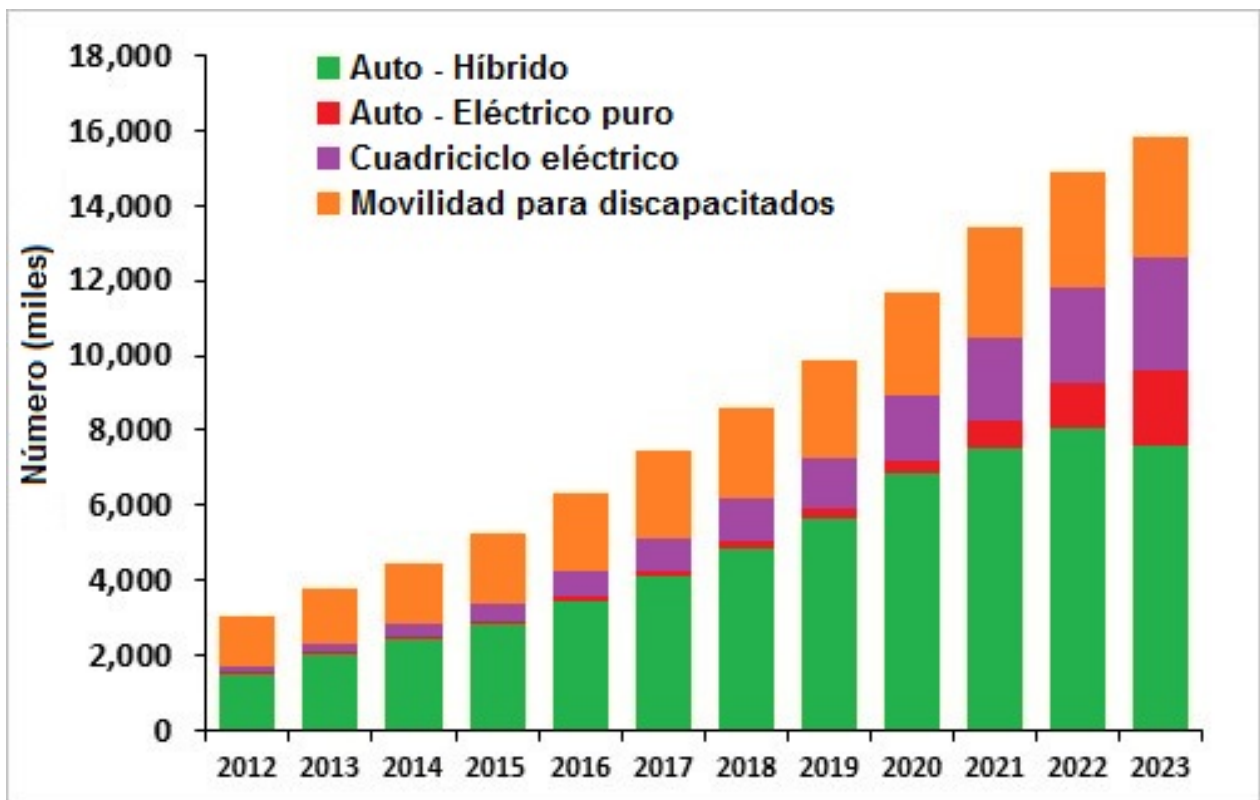


Figura 1.2: Proyección de las ventas mundiales de automóviles eléctricos. (Fuente: IDTechEx.)

proponer métodos de enfriamiento para las celdas, que utilicen PCM del tipo sólido-sólido con el fin de mantener la temperatura de las celdas en rangos de operación aceptables y similares entre sí.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo General

El objetivo general del trabajo de título es estudiar el uso de materiales de cambio de fase sólido-sólido como medio de enfriamiento de baterías de ion-litio.

1.2.2. Objetivos Específicos

Los objetivos específicos que permitirán realizar el trabajo de título son:

- ▷ Establecer la forma en que se genera calor al interior de las celdas de ion-litio en los procesos de descarga.

- ▷ Aplicar modelos de generación de calor durante el proceso de Thermal Runaway.
- ▷ Identificar sólidos que al alcanzar temperaturas cercanas a la de operación y *Thermal Runaway*, cambien de estructura cristalina.
- ▷ Determinar si algunos materiales de cambio de fase sólido-sólido son capaces de mantener la temperatura máxima del sistema bajo los 50°C y la diferencia máxima de temperatura dentro del sistema bajo los 5°C.
- ▷ Establecer el efecto de la separación entre las celdas, la temperatura ambiente y la tasa de descarga de las celdas durante el enfriamiento usando materiales de cambio de fase sólido-sólido.

1.3. Alcances

El trabajo de título propuesto tiene como alcance el realizar el modelamiento del proceso de enfriamiento de las baterías de ion-litio sólo en base a simulaciones mediante software. Además, se considera solo un enfoque de transferencia de calor en el problema a desarrollar.

1.4. Estructura de la memoria

La estructura utilizada en este documento para exponer el trabajo realizado es la siguiente:

- ▷ **Capítulo 1. Introducción.** Corresponde a la descripción del tema, la motivación de éste, objetivos del trabajo realizado y los alcances de éste.
- ▷ **Capítulo 2. Antecedentes Generales.** Corresponde a la revisión bibliográfica de antecedentes. En este capítulo se explican los conceptos necesarios para la comprensión y contextualización del trabajo.
- ▷ **Capítulo 3. Metodología.** En este capítulo se explica la metodología y el procedimiento utilizado para desarrollar el trabajo.
- ▷ **Capítulo 4. Resultados.** Se presentan los resultados obtenidos a partir de la metodología.
- ▷ **Capítulo 5. Conclusiones.** Se enumeran las conclusiones del trabajo realizado y se proponen trabajos a realizar en el futuro.

Antecedentes Generales

2.1. Baterías

Una batería es un dispositivo que transforma energía química en energía eléctrica a través de una reacción electroquímica de óxido-reducción. Está conformada de tres partes principalmente: un electrodo positivo, un electrodo negativo y el electrolito.

El electrodo positivo, o cátodo, es el componente en donde ocurre la reacción de reducción (es decir, electrones son recibidos desde un circuito externo), mientras que el electrodo negativo, o ánodo, es en donde sucede la reacción de oxidación (es decir, electrones son cedidos a un circuito externo). El electrolito es un material que posee una buena conducción iónica. Su principal función es proveer un medio para que iones viajen de un electrodo a otro.

Existen dos tipos de baterías: las primarias y las secundarias. En las primarias, las reacciones en los electrodos son irreversibles y por ende no son recargables (por ejemplo, baterías alcalinas). En las secundarias, las reacciones sí son reversibles y por lo tanto, recargables (por ejemplo, ion-litio, NiMH).

El desarrollo de baterías va desde las de cobre/zinc (Volta, 1800), ácido-plomo (Planté, 1859), óxido de zinc/manganeso (Leclanché, 1866), Níquel-Cadmio (Jungner, 1899), sulfuro de sodio (Yao & Kummer, 1966) y litio-metálico (1960's) hasta las actuales de Níquel-Hidruro metálico (1980's) y ion-litio (1990's) [9].

La Tabla 2.1 compara algunas de las tecnologías disponibles actuales.

Tabla 2.1: Comparación entre distintas tecnologías de baterías.

Tecnología	Ni-Cd	Ni-MH	Plomo	Li-ion Cil.	Li-ion Pris.	Li-Pol
Voltaje nominal (V)	1.2	1.2	2.1	3.6	3.6/3.7	3.6
Energía específica [Wh/kg]	50.0	70.0	30.0	80.0	100-160.0	140.0
Energía específica [Wh/L]	150.0	200.0	-	-	250-360.0	-
Ciclos de carga	500.0	560.0	-	1000.0	1000.0	-
Peligro ambiental	Baja	Media	Media	Alta	Alta	Alta
Costo	Bajo	Medio	Bajo	Alto	Alto	Alto
Tasa auto-descarga [%-mes]	25-30	30-35	-	6-9	6-9	-
Efecto memoria	Sí	Sí	Sí	No	No	No

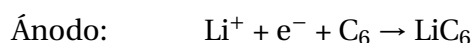
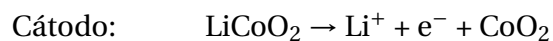
(Fuente: [10])

2.2. Baterías de ion-litio

2.2.1. Composición y funcionamiento

La más avanzada tecnología de baterías en el mercado actual, es las baterías de ion-litio y de ion-litio-polímero.

En el caso de las baterías de ion-litio, el cátodo consiste en un óxido de metal-litio laminado (por ejemplo, LiCoO_2 , LiMn_2O_4 , LiFePO_4 , LiNiCoO_2), con litio dispuesto entre las capas. El ánodo está formado de materiales basados en carbono (generalmente grafito) finamente laminados. Por otro lado, para el electrolito se tienen compuestos que no reaccionan con el litio (produciendo reacciones secundarias indeseadas). Los ejemplos más comunes son las sales de litio (por ejemplo, LiPF_6 , LiBF_6 , LiClO_4) disueltas en solventes orgánicos (por ejemplo, carbonato de etileno, carbonato de dimetilo, carbonato de dietilo). Las reacciones químicas que ocurren en los componentes, por ejemplo en una batería de litio-cobalto, son:



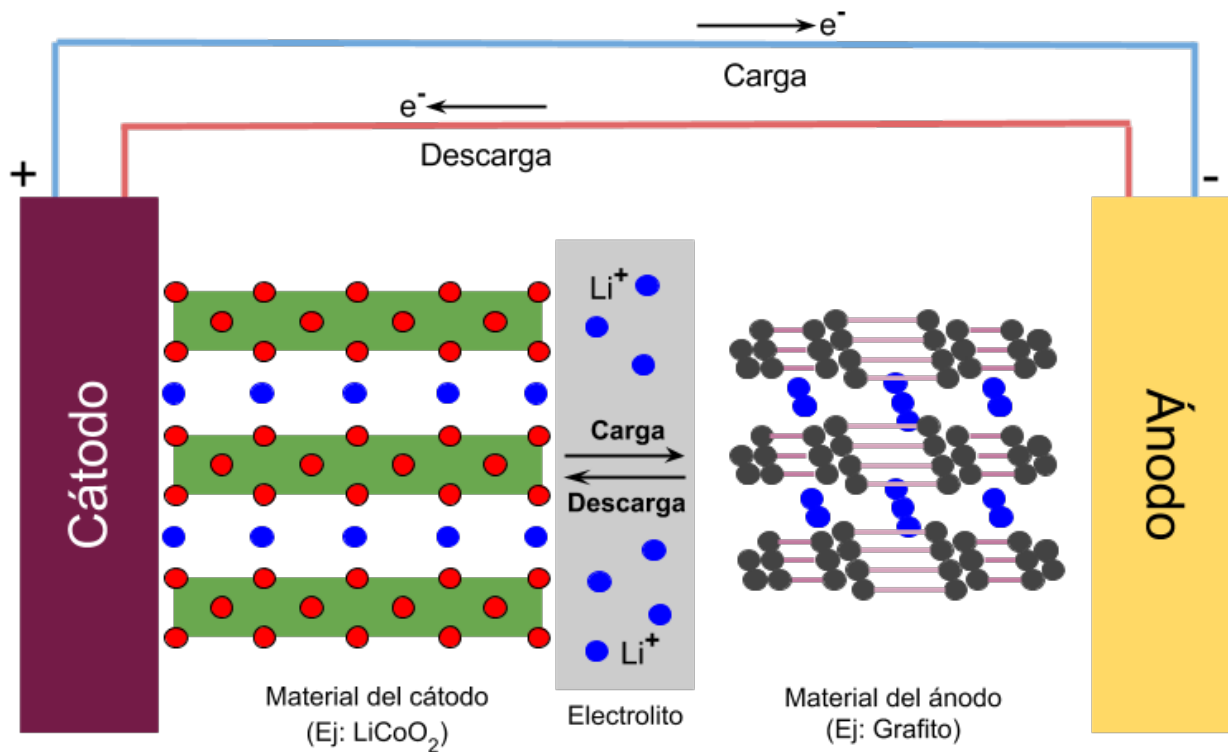


Figura 2.1: Proceso de carga y descarga en una batería de ion-litio.

La Figura 2.1 muestra los procesos de carga y descarga para una batería de óxido de cobalto-litio.

2.3. Problemas térmicos en las baterías

La temperatura de operación y almacenamiento de las celdas, es una de las principales variables que afectan el rendimiento eléctrico (por ejemplo, voltaje, potencia de descarga), vida útil y seguridad de la batería [4]. Temperaturas bajo y sobre las recomendadas por el fabricante, *thermal runaway*, temperatura no-homogénea entre las celdas y pérdida de capacidad, son problemas térmicos que deben ser evitados, para que la batería funcione en un rango óptimo.

2.3.1. Baja temperatura de operación

Las reacciones que se llevan a cabo en las celdas, siguen la ley de Arrhenius, por lo que la tasa a la que ocurren estas reacciones disminuye con la temperatura. Esto quiere decir, que a bajas temperaturas, la capacidad de carga/descarga disminuye, afectando el desempeño de la

batería.

Además, a bajas temperaturas, la velocidad con la que los iones de litio pueden ingresar entre las capas de grafito es menor a la velocidad con la que los iones viajan desde el cátodo hasta el ánodo. Esto genera que los iones de litio se acumulen en la entrada del ánodo en forma de película de manera irreversible, disminuyendo la vida útil y capacidad de la batería.

2.3.2. *Thermal Runaway*

La principal desventaja de las baterías de ion-litio con respecto a las otras, es lo relativo a la seguridad al operar [11]. El principal riesgo es que ocurra un proceso llamado *thermal runaway*, donde al aumentar la temperatura sobre un punto crítico, una serie de reacciones exotérmicas se producen, formando un feedback positivo. Esto finalmente desencadena explosiones de gases de hidrógeno. Condiciones abusivas como la sobrecarga, la sobredescarga y los corto-circuitos internos producto de defectos de manufactura, pueden llevar a las baterías a tener temperaturas muy por sobre las condiciones de operación recomendadas por los fabricantes llevando al sistema al *thermal runaway*. Este proceso ocurre en una serie de etapas detallada a continuación [12]:

- ▷ La primera etapa es la descomposición de la interfaz sólida entre el electrolito y el ánodo (SEI, Solid Electrolyte Interphase layer), debido al sobrecalentamiento. El sobrecalentamiento puede ser causado por corrientes eléctricas excesivas, sobrecarga/sobredescarga o temperaturas externas elevadas. La descomposición comienza a una temperatura relativamente baja, 80°C, y una vez que esta capa es traspasada por el electrolito, éste comienza a reaccionar con el ánodo de carbono, en una serie de reacciones exotérmicas que elevan la temperatura aún más alta.
- ▷ A medida que la temperatura aumenta, el calor generado en el ánodo por las reacciones exotérmicas con el electrolito, produce que las moléculas orgánicas usadas como solvente en el electrolito se separen, desarrollando gases de hidrógeno inflamables (por ejemplo, metano y etano), pero no oxígeno. Estas reacciones comienzan generalmente a los 110°C. Con la formación de estos gases, la presión dentro de las baterías aumenta, superando el punto de ignición. Pero, como no hay oxígeno para que ocurra la combustión, los gases se siguen acumulando.

- ▷ A temperaturas cercanas a 135°C, el separador polimérico se derrite, produciendo cortocircuitos entre los electrodos.
- ▷ Eventualmente el calor generado en el solvente y ánodo llega al cátodo, degradando el óxido de metal-litio, otra reacción exotérmica, liberando oxígeno, el elemento restante para que comience la combustión de los gases de hidrógeno acumulados. La degradación del óxido de metal-litio eleva la temperatura a casi 200°C.
- ▷ Finalmente, con la temperatura y presión superando el punto de ignición, se generan explosiones que elevan la temperatura a más de 900°C, lo que conlleva a su destrucción.

2.3.3. Temperatura no-homogénea entre celdas

El voltaje de una sola celda de batería de ion-litio (~ 3.5[V]) no es suficiente para aplicaciones de alta demanda como por ejemplo los autos eléctricos. Por ende, las celdas deben ser colocadas en serie para proveer un voltaje útil. Sin embargo, si existen gradientes de temperatura [13] entre las distintas celdas mayores a un rango de 3 ~ 5°C, la capacidad de carga total se ve perjudicada, además de los riesgos en seguridad.

Esto se debe a que cuando las temperaturas son distintas, unas celdas se descargan más que otras, por lo que cuando se vuelven a cargar, las celdas que se descargaron menos son sobrecargadas, lo que es especialmente peligroso en las baterías de ion-litio a causa de las reacciones secundarias, como la formación láminas de litio metálico en el ánodo, un proceso irreversible, que va limitando la cantidad de iones de litio disponibles, o la pérdida de oxígeno en el cátodo, que podrían llevar al proceso de *thermal runaway*.

2.4. Sistemas de enfriamiento

Existen dos grandes grupos de métodos de enfriamiento: sistemas activos y sistemas pasivos. En el primer tipo, se tienen sistemas que requieren energía externa de alguna forma para su funcionamiento, como el caso de la refrigeración por evaporación y absorción, o convección forzada (por ejemplo, ventiladores). En el segundo grupo, se tiene sistemas en los que no es necesario el uso de energía externa, como los almacenadores de energía térmica (TES, *Thermal Energy Storage*), donde un material absorbe calor, “guardándolo” para una futura utilización o liberación.

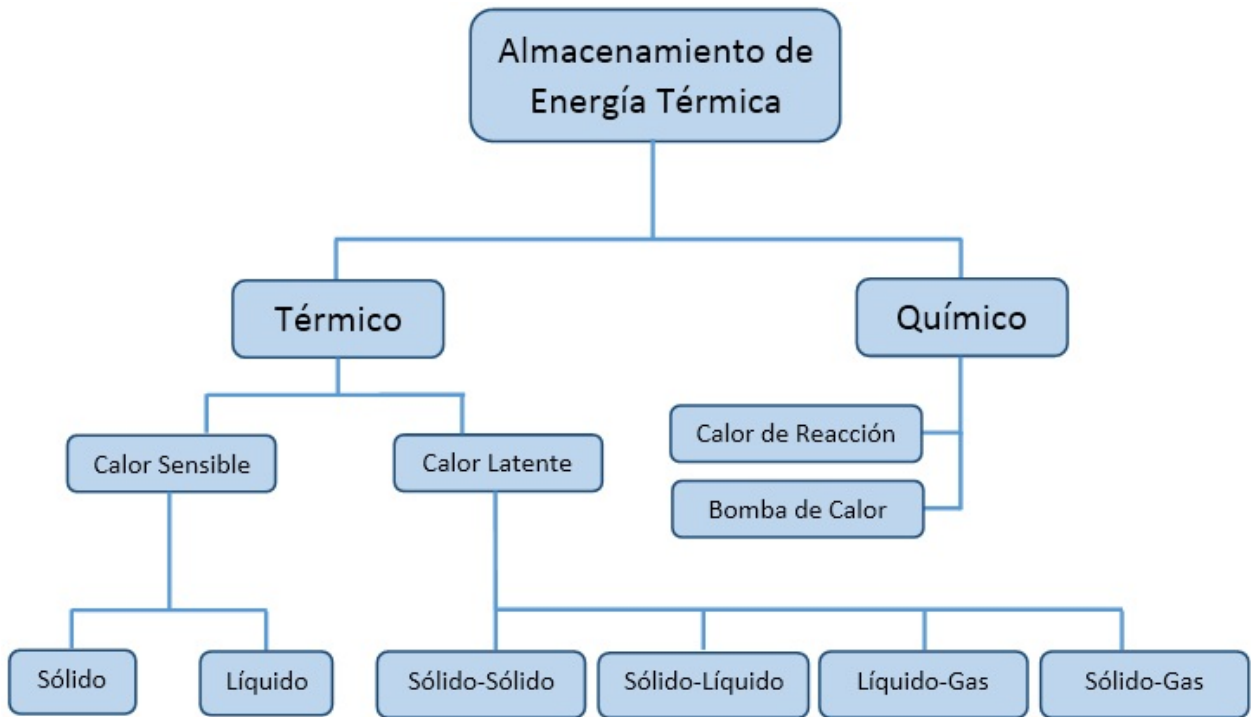


Figura 2.2: Tipos de almacenamiento de energía térmica.

2.4.1. Almacenamiento de energía térmica

La Figura 2.2, muestra un diagrama con los diferentes tipos de almacenamiento de energía térmica [14]. Los de tipo químico se refieren a sistemas que guardan la energía a través de reacciones químicas. Vale decir, cuando un sistema aumenta su temperatura, ocurre una reacción química que guarda el calor como potencial químico. Al enfriarse el sistema, ocurre la reacción inversa liberando el calor guardado.

Los sistemas de tipo térmico, se dividen en los de calor sensible, en los que un sólido o líquido, guarda/libera el calor a través de un aumento/disminución de su temperatura, y los de calor latente en los que la absorción/liberación de calor se ve reflejada en un cambio de fase del material a una temperatura relativamente constante. A este tipo de materiales se les conoce como PCM (Phase Change Material). Los cambios de fase pueden ser sólido-líquido, líquido-gas, sólido-gas y sólido-sólido, refiriéndose este último a materiales que cambian de estructura cristalina. Los más comunes son los de tipo sólido-líquido y sólido-sólido, pues los notables aumentos en los volúmenes específicos en los materiales líquido-gas y sólido-gas al volverse gases, los vuelven imprácticos [15].

2.4.2. Sistema con cambio de fase sólido-sólido

Como se mencionó anteriormente, los PCM del tipo sólido-sólido (SSPCM) consisten en materiales que almacenan el calor al cambiar de estructura cristalina como calor latente. Esto presenta diversas ventajas comparativas en relación a los PCM del tipo sólido-líquido (SLPCM). Entre ellas:

- ▷ Estabilidad e integralidad estructural.
- ▷ Variación de densidad entre fases pequeña (<10%).
- ▷ Posibilidad de ser manufacturada en formas arbitrarias.
- ▷ No necesidad de tener un recipiente.
- ▷ Imposibilidad de fugas o derrames.
- ▷ Posibilidad de transferir calor por conducción directamente.
- ▷ Mayor calor latente por unidad de volumen [MJ/m^3].

Sin embargo, los SSPCM presentan algunas desventajas en comparación con los SLPCM:

- ▷ Menor calor latente por unidad de masa [kJ/kg].
- ▷ Menor conductividad térmica.
- ▷ Mayor costo por unidad de masa [$\$/\text{kg}$].
- ▷ Mayor densidad.
- ▷ Temperaturas de transición mayores.

Además, es posible que de acuerdo al material a enfriar, sea necesario un recubrimiento del SSPCM, pues podrían ocurrir reacciones químicas indeseables entre los materiales, como la corrosión.

Entre los materiales de cambio de fase (PCM, Phase Change Material) que han sido investigados se encuentran [8,9], los polialcoholes: pentaeritritol [$\text{C}-(\text{CH}_2\text{OH})_4$], pentaglicerina [$\text{CH}_3-\text{C}-(\text{CH}_2\text{OH})_3$] y el neopentil-glycol [$(\text{CH}_3)_2-\text{C}-(\text{CH}_2\text{OH})_2$]; sales inorgánicas: sulfato de litio [Li_2SO_4], difloruro de potasio [KHF_2], pentóxido de vanadio [V_2O_5], seleniuro de plata

[Ag₂Se], sulfuro de hierro [FeS]; polímeros: Polietileno de alta densidad [HDPE]; y compuestos metálicos perovskita laminar [CaTiO₃]. La Tabla 2.2, muestra algunas de las propiedades termofísicas relevantes.

Tabla 2.2: Propiedades termofísicas de SSPCMs.

Material	Temperatura de transición [°C]	Calor latente		Densidad a 35°C [kg/m ³]
		[kJ/kg]	[MJ/m ³]	
Pentaeritritol [PE]	116.00	269.00	373.91	1390.00
Pentaglicerina [PG]	83.00	139.00	169.58	1220.00
Neopentil-glycol [NPG]	45.00	213.50	226.31	1060.00
Mezcla 60% [NPG] – 40% [PG]	26.00	76.00	85.42	1124.00
HDPE	80.00	188.00	180.48	960.00
Difloruro de potasio [KHF ₂]	196.00	176.00	417.00	2370.00
Pentóxido de vanadio [V ₂ O ₅]	72.00	75.00	332.00	3357.00
Seleniuro de plata [Ag ₂ Se]	133.00	35.00	281.00	8216.00
Perovskita laminar [CaTiO ₃]	18-63	42-146	46.2-219	1100-1500
Sulfuro de hierro [FeS]	138.00	73.00	348.00	4840.00

(Fuente: [16])

2.5. Estado del arte

El control de la temperatura de las baterías de ion-litio es un problema especialmente serio en aplicaciones de alta demanda como la industria del transporte (por ejemplo, EVs y HEVs). Como se mencionó anteriormente, altas temperaturas de carga y descarga, y temperaturas desbalanceadas entre las celdas y al interior de ellas, reducen la vida útil, seguridad y capacidad de las baterías, por lo que un control térmico se vuelve fundamental.

Para lograr este control, cualquier sistema debe ser capaz de [6]:

- (i) Mantener la temperatura de todas las celdas de cada módulo en la batería dentro de un rango óptimo.
- (ii) Mantener la diferencia de temperatura dentro de una celda y entre las celdas de un módulo en niveles bajos.

- (iii) Ser compacto, ligero, de fácil implementación, confiable, de baja costo y de fácil mantenibilidad.
- (iv) Ventilar posibles gases que las baterías puedan generar y que sean potencialmente peligrosos.

Estos sistemas pueden ser tanto pasivos como activos, y los que a su vez pueden estar divididos en 4 categorías dependiendo del medio usado [17]:

- (i) Aire
- (ii) Líquido
- (iii) PCM
- (iv) Combinación de las anteriores

2.5.1. Enfriamiento por aire

Los sistemas de enfriamiento por aire son los más simples y son los más usados principalmente por temas económicos y de espacio. La Figura 2.3 muestra un esquema de los diferentes sistemas de enfriamiento por aire.

La Figura 2.3a muestra un sistema pasivo, en donde aire extraído desde el exterior es dirigido directamente hacia la batería. El sistema pasivo de la Figura 2.3b utiliza un intercambiador de calor para precalentar el aire antes de enviarlo hacia la batería si es que la temperatura está bajo la de operación. La Figura 2.3c muestra un sistema activo en donde se saca parte de la energía de la batería para energizar un dispositivo auxiliar que caliente o enfríe el aire.

Sin embargo, este tipo de sistema es efectivo solo cuando se genera calor de forma moderada [18], además que no es capaz de mantener la temperatura homogénea a altas temperaturas [19]. Para tales casos, se considera el uso de algún refrigerante líquido como agua, con el cual es posible alcanza números de Reynolds más altos con menor caudal.

2.5.2. Enfriamiento por agua

En baterías a gran escala, la convección forzada o natural de aire no puede disminuir significativamente, por lo que un fluido como agua debe usarse [20]. La Figura 2.4 muestra

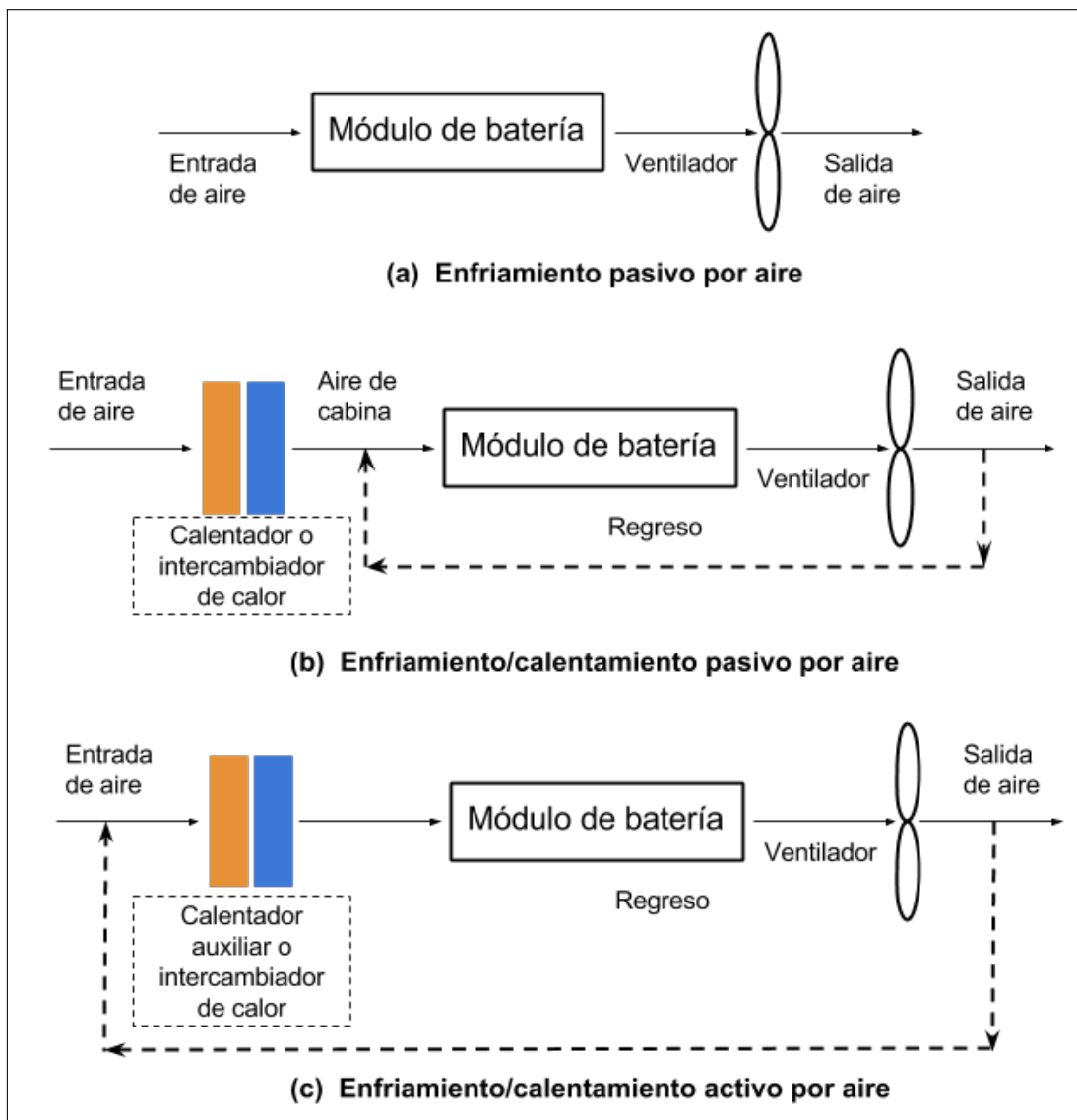


Figura 2.3: Control de temperatura usando aire.

sistemas pasivos y activos que usan agua para calentar y enfriar la batería. En la Figura 2.4a, se tiene un sistema pasivo, en donde el agua es enfriada usando un intercambiador de calor y aire extraído desde el exterior. En la Figura 2.4b y 2.4c, se muestran sistemas activos que utilizan bombas, intercambiadores de calor y dispositivos auxiliares para enfriar/calentar el agua.

Aunque el enfriamiento por agua es más efectivo que el enfriamiento por aire, en general los dispositivos son más grandes, complejos y costosos, por lo que no están masificados.

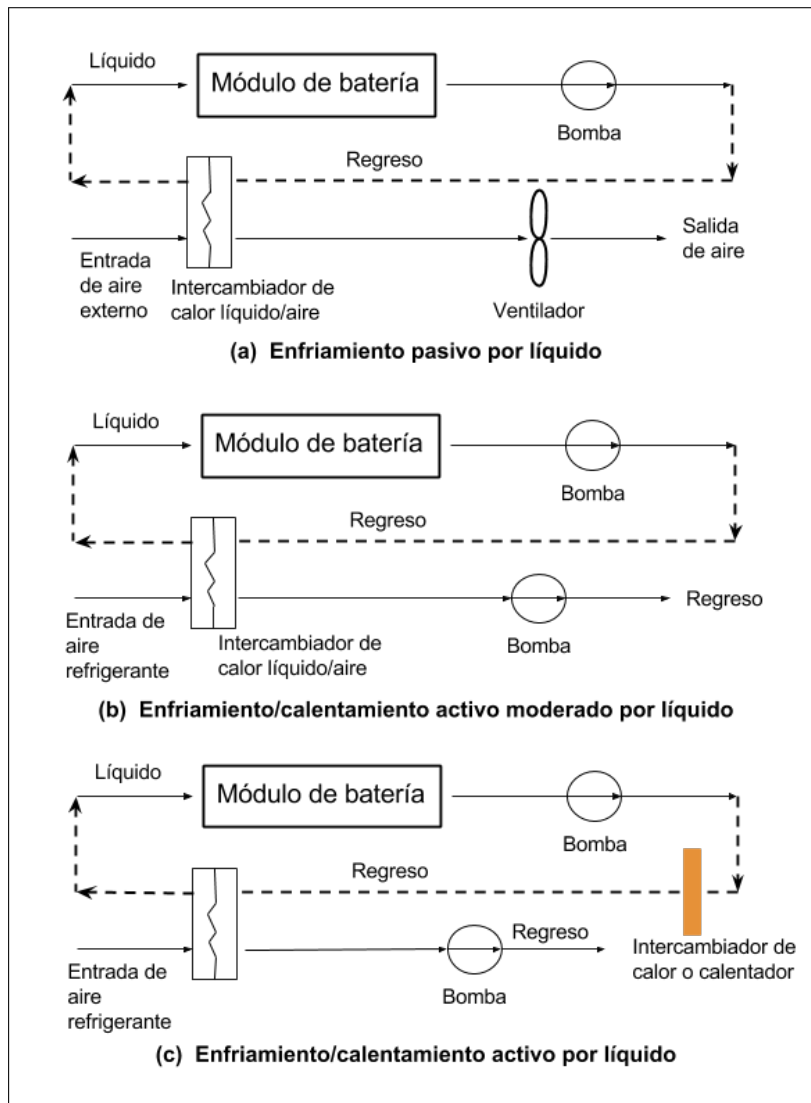


Figura 2.4: Control de temperatura usando líquido.

2.5.3. Enfriamiento por PCM

El uso de aire o agua para lograr el control de la temperatura supone el uso de bombas, ventiladores, tuberías, intercambiadores de calor, calentadores y otros tipos de dispositivos [21].

Debido a esto, otro tipo de soluciones han sido investigadas. La Figura 2.5 muestra un sistema que usa un PCM como medio de enfriamiento. En la configuración mostrada, el PCM encapsula a las celdas, por lo que el calor generado por ellas es transmitido al material por conducción. Sabbah et al. [8] probó la efectividad de este sistema incluso en condiciones de alta demanda energética (10 A/celda), manteniendo la temperatura bajo los 55°C y

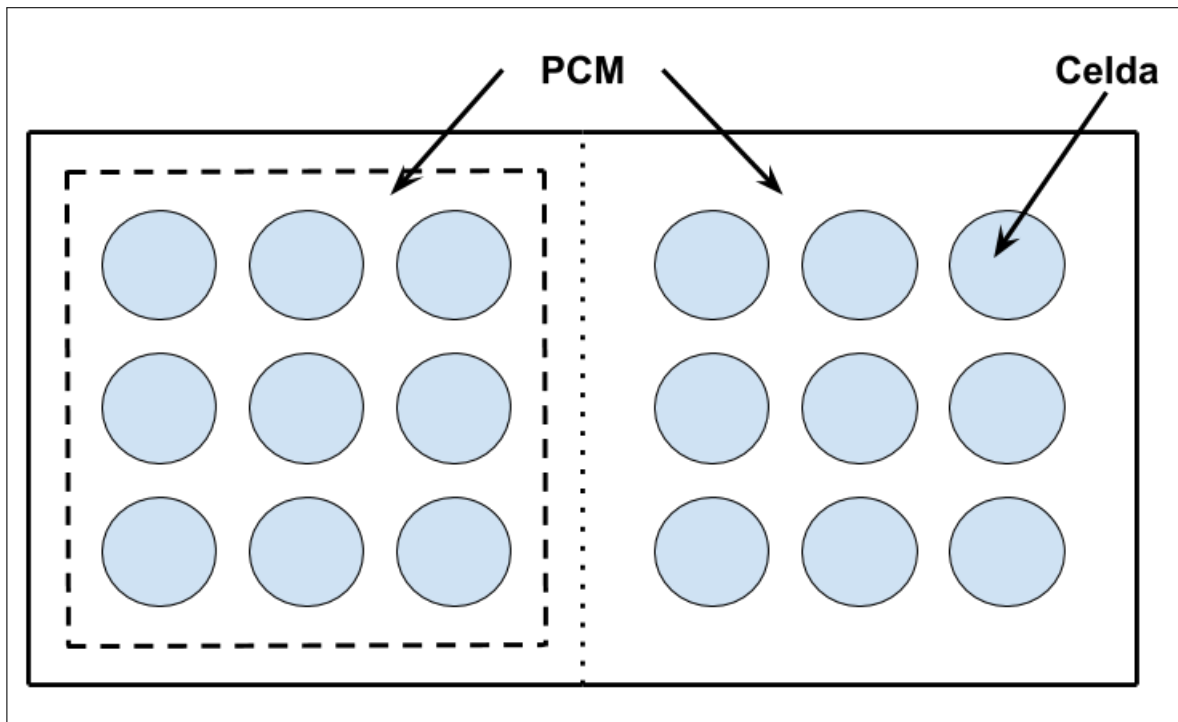


Figura 2.5: Control de temperatura usando PCM.

relativamente homogénea en todo el arreglo.

No obstante, el principal problema que enfrenta este método es la baja conductividad térmica del PCM, lo que dificulta la conducción a través de este, provocando que en algunas zonas no se alcance a llegar a la temperatura de cambio de fase, mientras que en otras el material ya ha cambiado de fase. Por lo tanto, el desarrollo de este sistema está enfocado en conseguir mejores materiales con altas conductividades térmicas.

2.6. Ecuación de calor

La ecuación que gobierna el fenómeno de enfriamiento de las baterías de ion-litio es la Ecuación General del Calor, descrita por la Ecuación 2.1:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(k \nabla T) + \dot{g} \quad (2.1)$$

donde T [K] es la temperatura, t [s] el tiempo, ρ [kg/m³] la densidad, C_p [J/kg·K] el calor específico a presión constante, k [W/m·K] es la conductividad térmica y \dot{g} [W/m³] la generación de calor por unidad de volumen. Esta Ecuación es la forma general transiente, en 3D y con propiedades termofísicas variables.

En coordenadas cartesianas, la Ecuación 2.1 se escribe como:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{g} \quad (2.2)$$

donde k_x , k_y y k_z son las conductividades térmicas en las direcciones x , y y z respectivamente.

Una serie de aproximaciones y supuestos pueden ser hechos con el fin de simplificar la Ecuación 2.2, si se considera un material isotrópico (propiedades iguales en todas las direcciones), homogéneo (propiedades iguales en todo el dominio) o propiedades constantes (invariantes con la temperatura y presión). Si se supone que las propiedades son constantes, éstas se pueden aglutinar en un término conocido como difusividad térmica, de la forma:

$$\alpha = \frac{k}{\rho C_p} \quad (2.3)$$

Este término mide la capacidad de un material de transferir calor con respecto a su capacidad de almacenarlo como energía. Una difusividad térmica baja implica que el material transfiere calor a una velocidad más baja de lo que es capaz de guardar.

2.7. Generación de calor

2.7.1. Ciclo de carga y descarga

Durante los ciclos de carga y descarga de las celdas de ion-litio, el calor es generado principalmente de tres formas [22]:

Calor por cambio de entropía, Q_S . Las reacciones químicas que ocurren dentro de la celda generan cambios en la entropía que se traducen en

$$Q_S = T_{\text{celda}} \Delta S \frac{I}{nF} \quad (2.4)$$

$$\Delta S = - \frac{\partial \Delta G}{\partial T_{\text{celda}}} = nF \frac{\partial E_{\text{emf}}}{\partial T_{\text{celda}}} \quad (2.5)$$

donde Q_S [W] es el calor por cambio de entropía, T_{celda} [K] es la temperatura de operación de la celda, ΔS [J/mol·K] el cambio de entropía, I [A] la corriente que fluye por la celda, n número de carga de reacción (para el caso de las celdas de ion-litio, $n = 1$), F la constante de Faraday ($F = 96485,309$ [C/mol]) y E_{emf} [V] el potencial de circuito-abierto. Las reacciones son

endotérmicas durante el proceso de carga y exotérmicas durante la descarga.

El cambio de entropía, ΔS , que ocurre al interior de la celda se obtuvo experimentalmente en [23]. La Figura 2.6 muestra como varía el cambio de entropía con respecto al estado de carga (SOC).

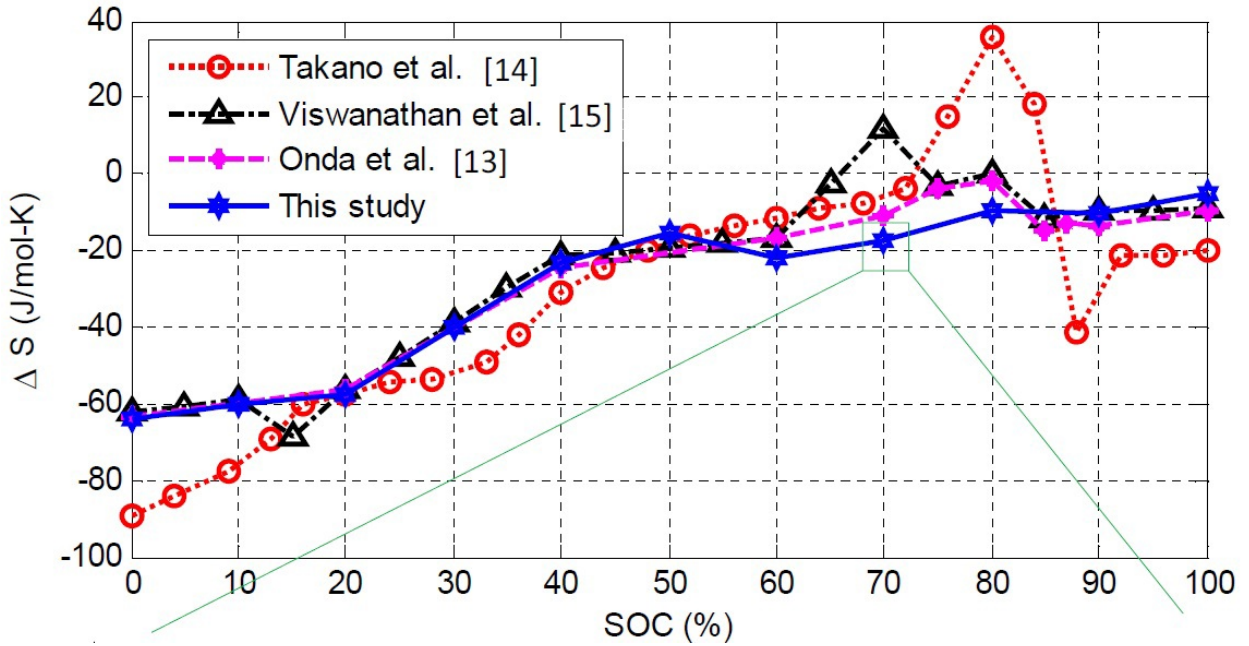


Figura 2.6: Cambio de entropía vs estado de carga. (Fuente: [23])

La curva de color azul corresponde a una buena aproximación de acuerdo a [23], por lo que se escoge para calcular el calor generado por la celda. Al ajustar la curva utilizando MATLAB, se obtiene un polinomio de grado 6:

$$\Delta S(\text{SOC}) = -3431.4(\text{SOC})^6 + 8980(\text{SOC})^5 - 7687(\text{SOC})^4 + 1895.6(\text{SOC})^3 + 359.92(\text{SOC})^2 - 60.94(\text{SOC}) - 61.39 \quad (2.6)$$

La Figura 2.7 muestra la comparación entre el polinomio de la Ecuación 2.6 y los datos obtenidos experimentalmente en [23].

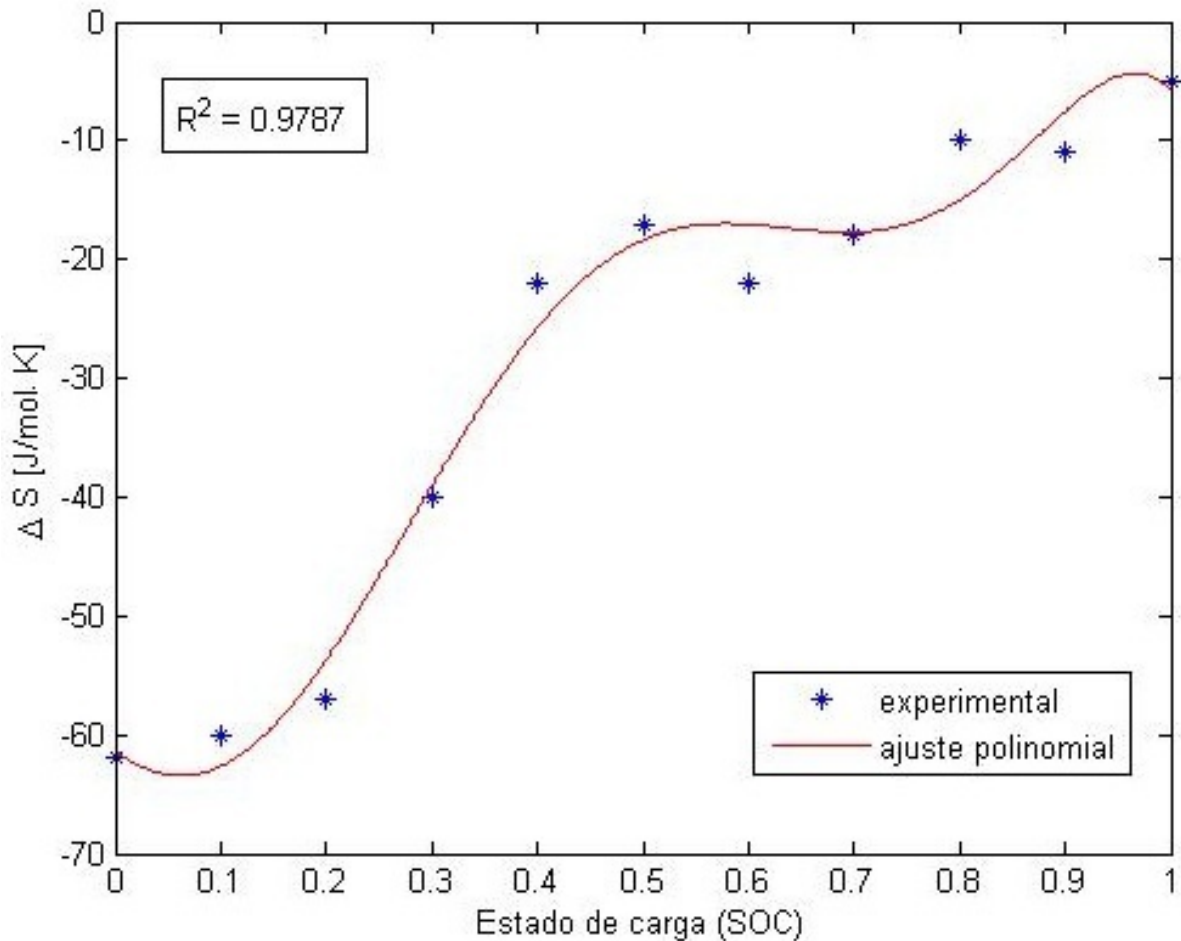


Figura 2.7: Comparación entre el ajuste polinomial y los datos obtenidos experimentalmente. (Fuente: Elaboración propia).

Calor de polarización, Q_P . Cuando una corriente eléctrica fluye a través de una celda, el voltaje V de la celda se distancia del potencial de circuito abierto V_0 debido a la polarización electroquímica. La pérdida de energía por polarización se disipa como calor. Esta forma de calor puede ser descrita como:

$$Q_P = I(V - V_0) = I^2 R_\eta \quad (2.7)$$

donde Q_P [W] es el calor de polarización, I [A] es la corriente que fluye por la celda, V [V] es el voltaje de operación de la celda, V_0 [V] el voltaje de circuito-abierto y R_η [Ω] la resistencia de sobrepotencial. El calor de polarización es exotérmico tanto en los procesos de carga como de descarga.

Calor de Joule, Q_J . Al fluir una corriente eléctrica a través de un material, este disipa parte de la energía eléctrica como calor, producto de la resistencia que opone al movimiento de los

electrones. La ley de Joule muestra que el calor liberado a través de este mecanismo es:

$$Q_J = IV = I^2 R_{\text{celda}} \quad (2.8)$$

donde Q_J [W] es el calor de Joule, I [A] la corriente que pasa a través de la celda, V [V] el voltaje de operación de la celda y R_{celda} [Ω] la resistencia eléctrica de la celda.

La resistencia de sobrepotencial y la eléctrica se pueden agrupar en un término, la resistencia interna de celda, dando como resultado que el calor total, Q_T [W], generado por la celda durante los procesos de carga y descarga es:

$$Q_T = Q_S + Q_P + Q_J = T_{\text{celda}} \Delta S \frac{I}{nF} + I^2 R_{\text{int}} \quad (2.9)$$

2.7.2. Thermal runaway

Como se mencionó anteriormente, el proceso de *thermal runaway* consiste en una serie de reacciones químicas exotérmicas que liberan altas cantidades de calor, provocando finalmente la destrucción total de la celda. Las principales etapas que ocurren durante este proceso son [24]:

- ▷ Descomposición del SEI.
- ▷ Reacción ánodo-solvente.
- ▷ Reacción cátodo-solvente.
- ▷ Descomposición del electrolito.

Un modelo térmico, que se detalla a continuación, de este proceso fue propuesto en [25]. Con él es posible determinar los flujos de calor presentes durante las reacciones químicas que se llevan a cabo.

Descomposición del SEI. El electrodo negativo es protegido de reaccionar con el solvente a través del SEI, que consiste en una película delgada de material capaz de conducir iones a través de él. Cuando la temperatura alcanza los 90°C, este material comienza a descomponerse exotérmicamente hasta los 120°C. Esta generación de calor se a través de las siguientes ecuaciones:

$$R_{\text{sei}}(T, c_{\text{sei}}) = A_{\text{sei}} \exp \left[-\frac{E_{\text{a,sei}}}{RT} \right] c_{\text{sei}}^{m_{\text{sei}}} \quad (2.10)$$

$$S_{\text{sei}} = H_{\text{sei}} W_c R_{\text{sei}} \quad (2.11)$$

$$\frac{dc_{\text{sei}}}{dt} = -R_{\text{sei}} \quad (2.12)$$

donde c_{sei} es la cantidad adimensional de especies meta-estables que contienen litio en el SEI. R_{sei} [s^{-1}], A_{sei} [s^{-1}], $E_{\text{a,sei}}$ [Jmol^{-1}] y m_{sei} son parámetros de la reacción. R [$\text{Jmol}^{-1}\text{K}^{-1}$] es la constante universal de los gases y T [K] la temperatura. H_{sei} [Jg^{-1}] es el liberación específica de calor por gramo de carbono y W_c [gm^{-3}] es el contenido de carbono por unidad de volumen.

Reacción ánodo-solvente. A temperaturas elevadas ($>120^\circ\text{C}$), una reacción exotérmica entre el litio intercalado en el ánodo y el electrolito puede ocurrir. Esta reacción se modela como:

$$R_{\text{ne}}(T, c_e, c_{\text{neg}}, t_{\text{sei}}) = A_{\text{ne}} \exp\left[-\frac{t_{\text{sei}}}{t_{\text{sei,ref}}}\right] c_{\text{neg}}^{m_{\text{ne,n}}} \exp\left[-\frac{E_{\text{a,ne}}}{RT}\right] \quad (2.13)$$

$$R_{\text{ne}}(T, c_e, c_{\text{neg}}, t_{\text{sei}}) = A_{\text{ne}} \left(-\frac{t_{\text{sei,ref}}}{t_{\text{sei}}}\right) c_{\text{neg}}^{m_{\text{ne,n}}} \exp\left[-\frac{E_{\text{a,ne}}}{RT}\right] \quad (2.14)$$

$$S_{\text{ne}} = H_{\text{ne}} W_c R_{\text{ne}} \quad (2.15)$$

$$\frac{dc_{\text{neg}}}{dt} = -R_{\text{ne}} \quad (2.16)$$

donde c_{neg} es la cantidad adimensional de litio intercalado entre el carbono; t_{sei} es una medida adimensional del espesor del SEI que refleja la cantidad de litio en el SEI; R [$\text{Jmol}^{-1}\text{K}^{-1}$] es la constante universal de los gases y T [K] la temperatura. R_{ne} [s^{-1}], A_{ne} [s^{-1}], $E_{\text{a,ne}}$ [Jmol^{-1}] y $m_{\text{ne,n}}$ son parámetros de la reacción. H_{ne} [Jg^{-1}] es el liberación específica de calor por gramo de carbono y W_c [gm^{-3}] es el contenido de carbono por unidad de volumen.

Reacción cátodo-solvente. El material activo-positivo (óxido de metal + litio), se descompone exotérmicamente y emite oxígeno que se puede acumular para reaccionar exotérmicamente con el electrolito. Estas reacciones son:

$$R_{\text{pe}}(T, \alpha, c_e) = A_{\text{pe}} \alpha^{m_{\text{pe,p1}}} (1 - \alpha)^{m_{\text{pe,p2}}} \exp\left[-\frac{E_{\text{a,pe}}}{RT}\right] \quad (2.17)$$

$$S_{\text{pe}} = H_{\text{pe}} W_p R_{\text{pe}} \quad (2.18)$$

$$\frac{d\alpha}{dt} = R_{\text{pe}} \quad (2.19)$$

donde α es el grado de conversión. R_{pe} [s^{-1}], A_{pe} [s^{-1}], $E_{a,pe}$ [$Jmol^{-1}$], $m_{pe,p1}$ y $m_{pe,p2}$ son parámetros de la reacción. R [$Jmol^{-1}K^{-1}$] es la constante universal de los gases y T [K] la temperatura. H_{ne} [Jg^{-1}] es el liberación específica de calor por gramo de material activo-positivo y W_p [gm^{-3}] es el contenido de material activo-positivo por unidad de volumen.

Descomposición del electrolito. El electrolito puede descomponerse exotérmicamente a temperaturas elevadas ($>200^\circ C$), de acuerdo a las siguientes expresiones:

$$R_e(T, c_e) = A_e \exp \left[-\frac{E_{a,e}}{RT} \right] c_e^{m_e} \quad (2.20)$$

$$S_{elec} = H_e W_e R_e \quad (2.21)$$

$$\frac{dc_e}{dt} = -R_e \quad (2.22)$$

donde c_e es la concentración adimensional de electrolito y R_e [s^{-1}], A_e [s^{-1}], $E_{a,e}$ [$Jmol^{-1}$] y m_e son parámetros de la reacción. H_e [Jg^{-1}] es la liberación específica de calor por gramo de electrolito y W_e [gm^{-3}] es el contenido de electrolito por unidad de volumen.

La Tabla 2.3 resume todos los parámetros utilizados en las ecuaciones anteriores.

Tabla 2.3: Parámetros de reacción del proceso de *thermal runaway*.

Símbolo	Descripción	Valor	Unidad
A_{sei}	Factor de frecuencia de descomposición del SEI	1.667×10^{15}	$[s^{-1}]$
A_{ne}	Factor de frecuencia negative-solvent	2.5×10^{13}	$[s^{-1}]$
A_{pe}	Factor de frecuencia positive-solvent	6.667×10^{13}	$[s^{-1}]$
A_e	Factor de frecuencia de descomposición del electrolito	5.14×10^{25}	$[s^{-1}]$
$E_{a,sei}$	Energía de activación de descomposición del SEI	1.3508×10^5	$[Jmol^{-1}]$
$E_{a,ne}$	Energía de activación negative-solvent	13508×10^5	$[Jmol^{-1}]$
$E_{a,pe}$	Energía de activación positive-solvent	1396×10^5	$[Jmol^{-1}]$
$E_{a,e}$	Energía de activación de descomposición del electrolito	2.74×10^5	$[Jmol^{-1}]$
c_{sei0}	Valor inicial de c_{sei}	0.15	
c_{neg0}	Valor inicial de c_{neg}	0.75	
α_0	Valor inicial de α	0.04	
c_{e0}	Valor inicial de c_e	1	
m_{sei}	Orden de reacción para c_{sei}	1	
$m_{ne,n}$	Orden de reacción para c_{neg}	1	
$m_{pe,p1}$	Orden de reacción para α	1	
$m_{pe,p2}$	Orden de reacción para $(1 - \alpha)$	1	
m_e	Orden de reacción para c_e	1	
t_{sei0}	Valor inicial de t_{sei}	0.033	
H_{sei}	Liberación de calor por descomposición del SEI	257	$[Jg^{-1}]$
H_{ne}	Liberación de calor por negative-solvent	1714	$[Jg^{-1}]$
H_{pe}	Liberación de calor por positive-solvent	314	$[Jg^{-1}]$
H_{ele}	Liberación de calor por descomposición del electrolito	155	$[Jg^{-1}]$
W_c	Contenido de carbono por unidad de volumen	6.104×10^5	$[gm^{-3}]$
W_p	Contenido de material act.-pos. por unidad de volumen	1.221×10^6	$[gm^{-3}]$
W_e	Contenido de electrolito por unidad de volumen	4.069×10^5	$[gm^{-3}]$
$\rho c_{p,jr}$	Capacidad calórica volumétrica del material	2.789×10^6	$[Jm^{-3}K^{-1}]$

(Fuente: [24]).

Metodología

3.1. Metodología general

La metodología general seguida para desarrollar el trabajo de título es:

- ▷ **Obtención de las propiedades termofísicas de los SSPCM.** La ecuación de calor (Ecuación 2.1) requiere conocer la conductividad térmica (k), el calor específico (C_p) y la densidad (ρ) para resolverse. Por ende, es necesario determinar estas propiedades para los SSPCM a estudiar.
- ▷ **Modelamiento del sistema.** En esta etapa, se modela el sistema que es estudiado, a través de un software CAD y posteriormente es ingresado en el software FEM.
- ▷ **Modelamiento del enfriamiento de las celdas.** Con los datos recogidos anteriormente, se procederá a modelar el enfriamiento de las celdas que componen las baterías, a través de software apropiado (COMSOL Multiphysics).
- ▷ **Modelamiento de la expulsión del calor de los SSPCM.** Se modelará como el material expulsa el calor guardado como calor latente, cuando las baterías se enfrían al dejar de operar.
- ▷ **Análisis de resultados** Se recogen los resultados entregados por el software para su posterior interpretación.
- ▷ **Cambio en los parámetros de configuración.** Una vez realizada una simulación completa, se varía uno de los parámetros de configuración descritos en la sección 3.2.3 y por lo tanto la configuración del sistema. Hecho ésto, se comienza una nueva simulación.

- ▷ **Modelamiento del enfriamiento durante el thermal runaway.** Al finalizar todas las simulaciones concernientes al proceso de descarga de las celdas, se procede a simular el enfriamiento de una celda durante las etapas tempranas del *thermal runaway*.

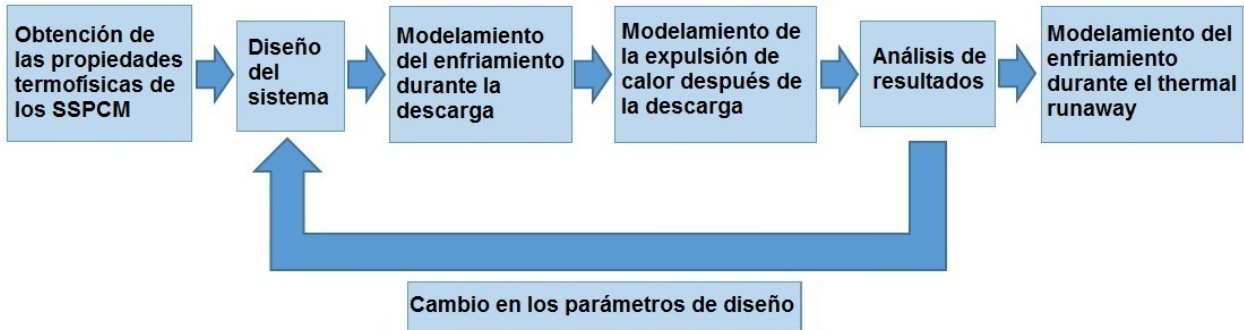


Figura 3.1: Diagrama de flujo de la metodología para desarrollar el trabajo de título.

3.2. Proceso de descarga de las celdas

3.2.1. Simplificación de las celdas

Las celdas de ion-litio están formadas de muchos componentes de diversos tipos y geometrías, complejizando el análisis térmico. Es por ello que se hace necesario simplificarlas.

Al comparar las conductividades de los componentes, es posible notar que todas se encuentran dentro del mismo orden de magnitud y relativamente cercanas [26]. Con esto en mente, los componentes pueden ser modelados como un solo material con propiedades promediadas. Estas se muestran en la Tabla 3.1

Tabla 3.1: Propiedades termofísicas de las celdas de ion-litio a estudiar.

Propiedad	Valor
Densidad	2663 [kg/m ³]
Calor específico	900 [J/kgK]
Conductividad térmica radial	3 [W/mK]
Conductividad térmica longitudinal	30 [W/mK]

(Fuente: [8]).

Además, el calor es generado en el cátodo y ánodo del material, por lo que con el nuevo modelo, el calor total es el mismo pero generado en todo el material.

3.2.2. Configuración del sistema

Para el sistema se considera un módulo de una batería de ion-litio del HEV Ford Escape Hibrid, el cual está fabricado con 20 celdas dispuestas en una configuración 4S5P [8]. Entre las celdas y alrededor de estas se coloca el PCM que enfriará el arreglo. El sistema final, modelado en COMSOL Multiphysics v4.3b, se muestra en la Figura 3.2, en donde las celdas son representadas por los círculos de color verde, mientras que la zona de color azul representa el PCM.

La Figura 3.3 muestra una vista superior del sistema con las dimensiones necesarias para modelar en el software. Aquí, D_{cell} señala el diámetro de a celda, e_{pcm} el espesor del PCM alrededor de la celda, L_x la longitud en la dirección x y L_y la longitud en la dirección y.

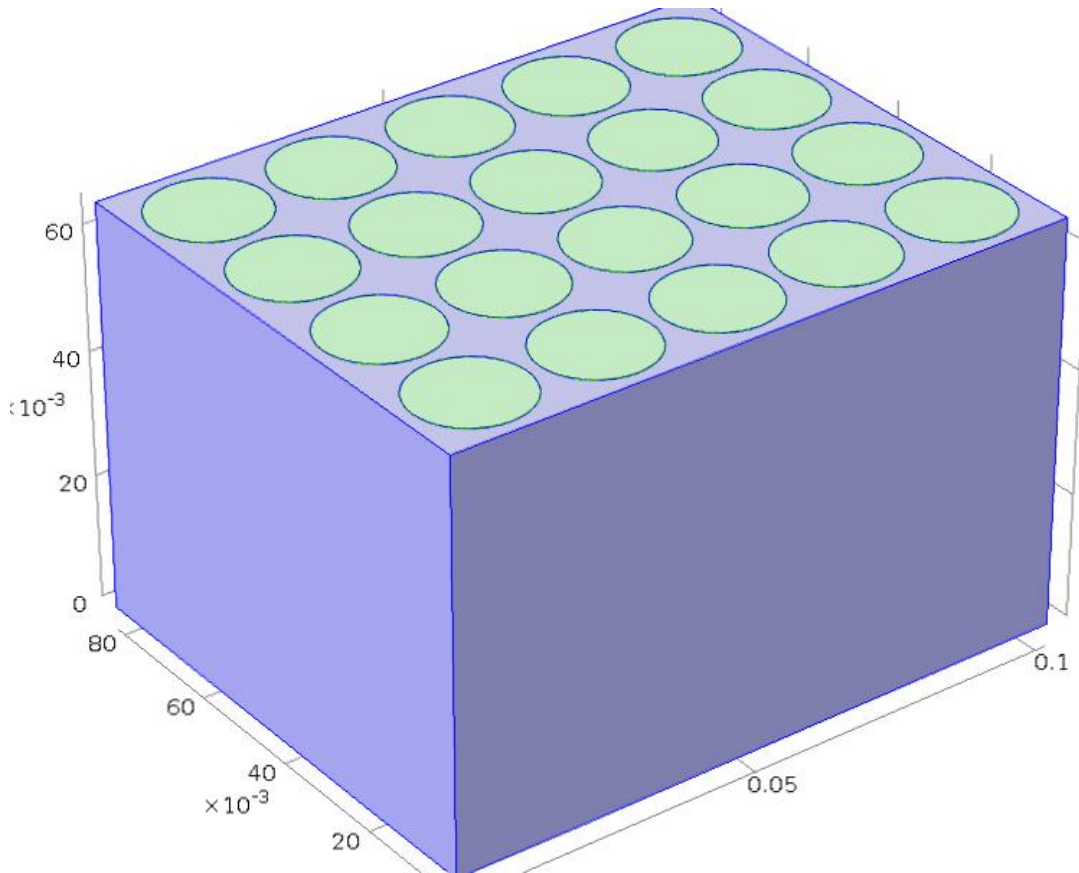


Figura 3.2: Configuración a estudiar modelado en COMSOL.

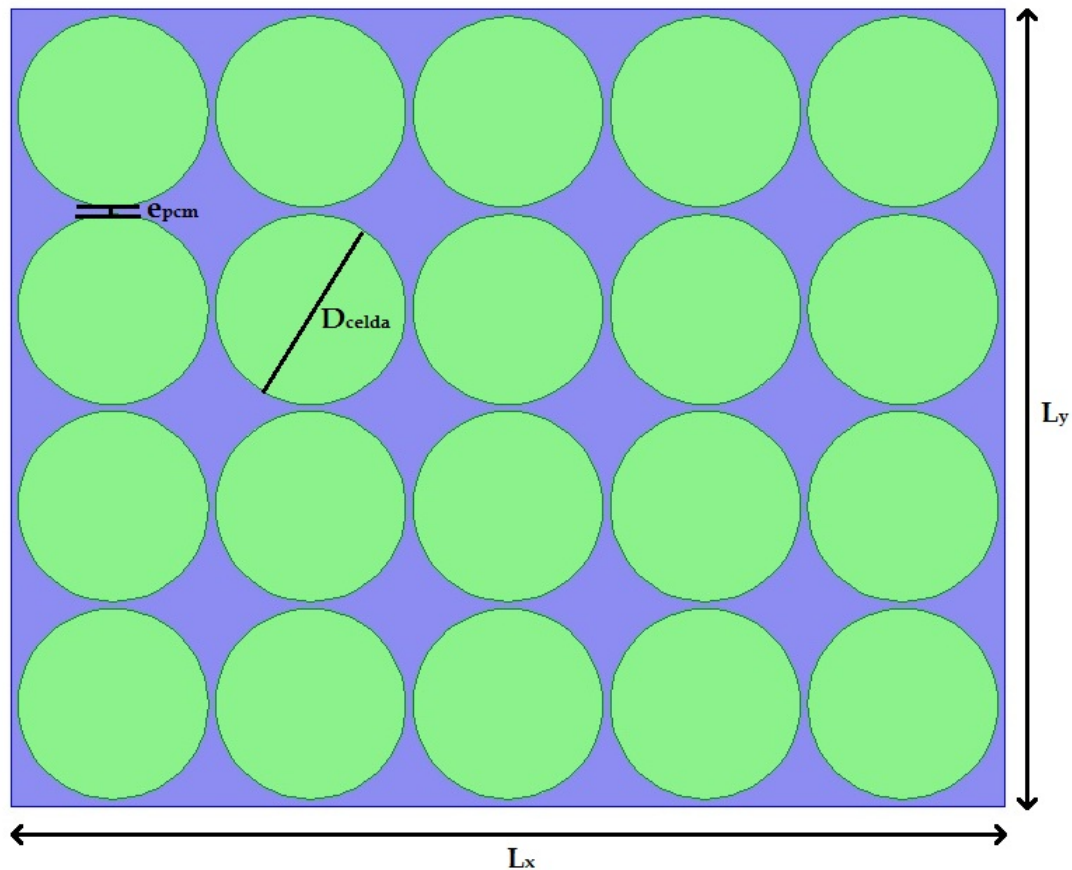


Figura 3.3: Configuración a estudiar modelado en COMSOL.

3.2.3. Parámetros de configuración

Para realizar un análisis profundo se consideran una serie de parámetros que varían en cada una de las simulaciones, con el objetivo de determinar su influencia en el proceso de enfriamiento de las baterías. Los parámetros corresponden al tipo de PCM, espesor del PCM, tipo de celda, tasa de descarga de la celda y temperatura inicial del sistema.

Tipo de PCM

Dos tipos de PCM se usan en el modelamiento del enfriamiento de las celdas. El neopentil-glicol [NPG] y el X40 de PCM Products Ltd., son PCM con temperaturas de transición cercanas a las de operación de las celdas y se encuentran disponibles comercialmente, por lo que son aptos para las simulaciones. La Tabla 3.2 muestra las propiedades termofísicas de estos PCM. Las del NPG fueron obtenidas a partir de [27] y las del X40 a partir de [28].

Tabla 3.2: Propiedades termofísicas de los PCM seleccionados.

	NPG	X40
Temperatura de Transición	45± 1.5[°C]	40± 1.5[°C]
Densidad	1060 [kg/m ³]	1046 [kg/m ³]
Calor específico	1882.8 [J/kgK]	1670 [J/kgK]
Conductividad térmica	0.16 [W/mK]	0.36 [W/mK]
Calor latente	114000 [J/kg]	125000 [J/kg]
Difusividad térmica	8.017×10 ⁻⁸ [m ² /s]	2.061×10 ⁻⁷ [m ² /s]

(Fuente: [27], [28]).

Espesor de PCM

Corresponde a la separación entre las celdas y por lo tanto, a la cantidad de PCM alrededor de ellas. El rango de espesor va desde los 0 hasta los 2 [mm], espaciados por 0.4 [mm], dando un total de 6 espesores a considerar.

Tipo de celda

Se consideran dos tipos de celda, la SONY US18650VTC3 y la US26650VT, ambas disponibles comercialmente. En la Tabla 3.3 se muestran las especificaciones del fabricante más relevantes de estas celdas, obtenidas a partir de [29] y [30].

Tasa de descarga

Se consideran 4 tasas de descarga para el estudio, 0.5C, 1C, 2C y 10C, que representan distintas necesidades de potencia. La Tabla 3.1 muestra las corrientes eléctricas que representan estas tasas de descarga y el tiempo que tardarían las celdas en descargarse totalmente.

Temperatura inicial

Se consideran 3 temperaturas iniciales a las que se encontrarán las celdas y el PCM, 20, 30 y 40°C, que modelan las distintas condiciones de operación a las que pueden trabajar.

Tabla 3.3: Especificaciones de las baterías SONY US18650VTC3 y US26650VT.

Nombre	US18650VTC3	US26650VT
Capacidad nominal	1600 [mAh]	2600 [mAh]
Diámetro	18 [mm]	26 [mm]
Largo	65 [mm]	65 [mm]
Max. corriente carga	10 [A]	26 [A]
Max. corriente descarga	30 [A]	52 [A]
Voltaje nominal	3.7 [V]	3.7 [V]
Resistencia	12 [mΩ]	15 [mΩ]
Material cátodo	LiCoO ₂	
Material ánodo	carbono desorganizado	
Electrolito	carbonato dietilo + LiPF ₆	

(Fuente: [29], [30]).

Tabla 3.4: Corrientes eléctricas y tiempos de operación máximo para cada tasa de descarga.

Tasa de descarga	0.5C	1C	2C	10C
Tiempo de operación	120 [min]	60 [min]	30 [min]	6 [min]
Corriente celda 18650	0.8 [A]	1.6 [A]	3.2 [A]	16 [A]
Corriente celda 26650	1.3 [A]	2.6 [A]	5.2 [A]	26 [A]

(Fuente: Elaboración propia).

3.2.4. Condiciones de borde

Las baterías se componen de varios módulos de celdas conectados entre sí por varios tipos de elementos electrónicos y mecánicos, dificultando el establecimiento de la forma en que cada uno de los módulos se relacionan con el exterior. Otra factor a considerar es la presencia de aire alrededor de los módulos, que al calentarse producen convección natural enfriando un poco la pared del módulo.

Por estas razones se considera que modelar el sistema con borde adiabático en cada una de las caras exteriores representadas por las líneas de color rojo, como se muestra en la Figura 3.4, es un supuesto razonable que no podría sobreestimar el efecto del PCM en el proceso de enfriamiento.

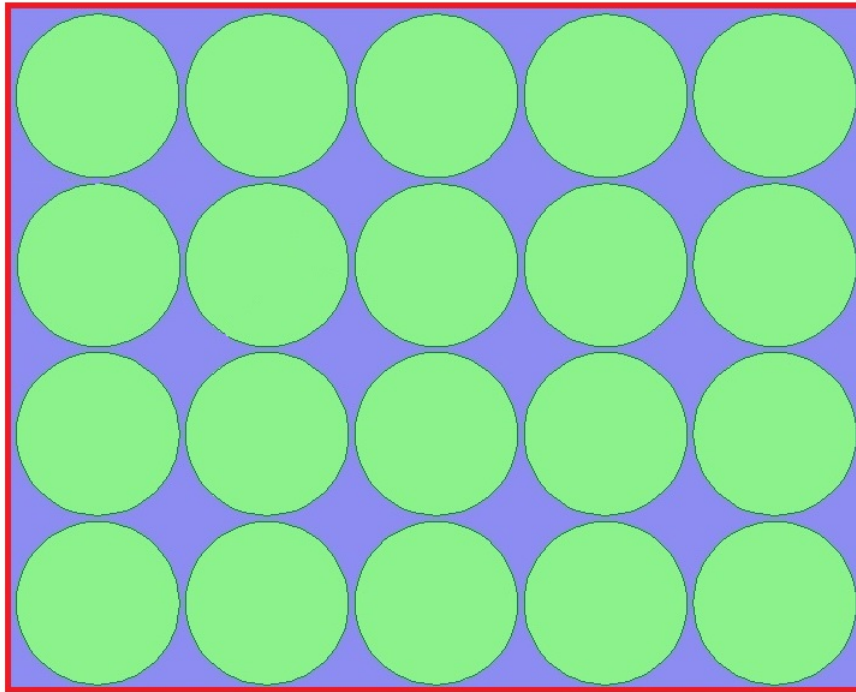


Figura 3.4: Configuración a estudiar modelado en COMSOL.

3.2.5. Simplificación del modelo a 2D

Para simplificar el estudio, se considera realizar las simulaciones en dos dimensiones en lugar de tres. Dos condiciones apoyan esta simplificación: conductividad radial menor que longitudinal y diámetro de celda menor medida que largo de celda.

Conductividad térmica. La conductividad térmica en la dirección radial es aproximadamente 10 veces menor que en la dirección longitudinal de la celda (30:3), por lo que se espera que exista una menor uniformidad en la dirección radial, volviéndola más relevante.

Cilindro largo. El largo de ambas celdas es 65 [mm], y los diámetros 18 [mm] y 26 [mm], por lo que los cocientes largo/diámetro son 3.6 y 2.5. Debido a esto, las celdas pueden ser consideradas como cilindros largos, volviendo la conducción radial predominante [31].

3.3. Expulsión del calor

Una vez que la batería deja de operar, la energía almacenada por el PCM y las celdas debe ser liberada para devolver el sistema a su estado inicial, es decir, a temperatura ambiente. El aire

que rodea a la batería se encarga de enfriar el sistema a través de convección natural. Debido a ésto, para modelar la expulsión de calor, se utilizan condiciones de bordes iniciales y de borde distintas a las del proceso de descarga descritas en la sección 3.2.4.

3.3.1. Condiciones de borde

El enfriamiento del sistema se debe fundamentalmente a la convección natural del aire que lo rodea, tal como se muestra en la Figura 3.6.

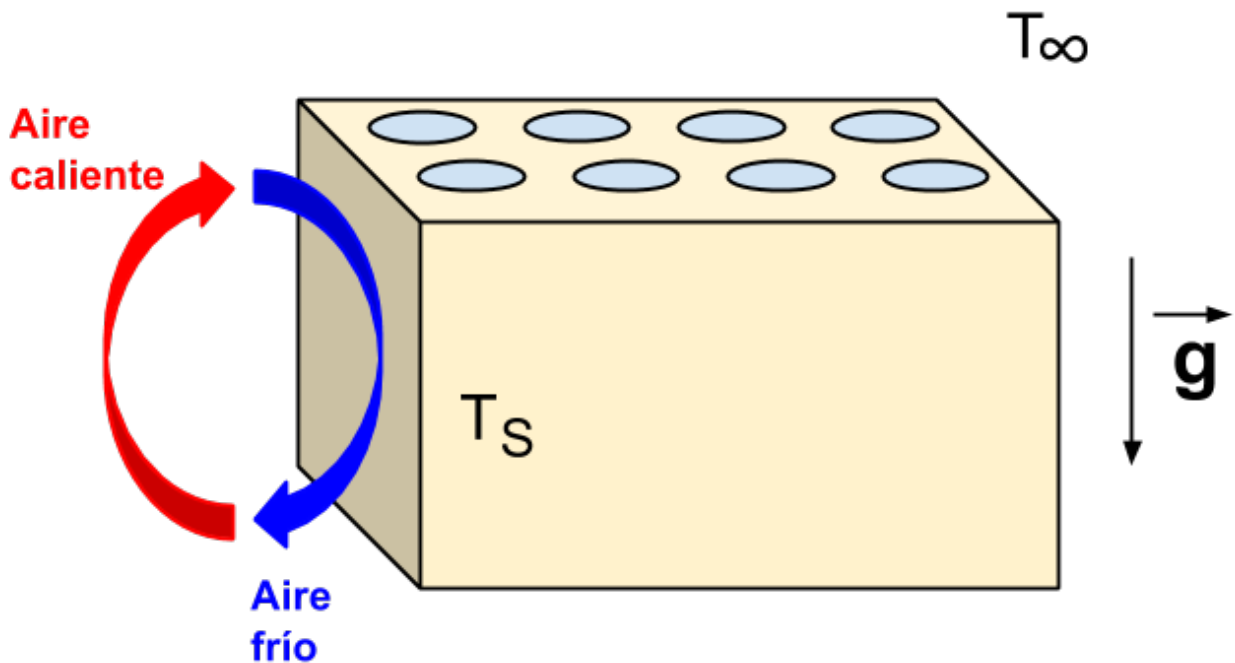


Figura 3.5: Condiciones de borde en el proceso de expulsión de calor.

La temperatura del fluido en el infinito, T_∞ , corresponde a la temperatura ambiente que rodea al sistema, mientras que la temperatura superficial, T_S , señala la temperatura del borde del sistema.

3.3.2. Condiciones iniciales

Como condición inicial se considera la distribución de temperatura final obtenida tras el proceso de descarga de la batería. Estas distribuciones se muestran en el Apéndice B.

3.4. Thermal Runaway

3.4.1. Simplificación de la celda

Cada una de las reacciones químicas que generan calor durante el proceso de thermal runaway ocurren en distintas secciones dentro de la celda, por lo que resulta inadecuado tratar todos los componentes como uno solo. Debido a esto, la simplificación de la celda se realiza teniendo en cuenta los componentes principales que participan en la generación de calor y su propagación dentro de la celda.

Los componentes considerados son el ánodo, cátodo, SEI, terminal positivo y negativo, colector de corriente del ánodo y cátodo, y el envase de la celda. Esta situación se muestra en la Figura 3.6. Además, la Tabla 3.5 muestra las propiedades termofísicas de los materiales que componen la celda.

Tabla 3.5: Propiedades termofísicas de los componentes de la celda.

	k [W/mK]	ρ [kg/m ³]	C_p [J/kgK]
Ánodo	6.3	2211	720
Cátodo	6.1	4584	651
SEI	3.2	1697	1113
Terminal positivo y envase(Al)	160.0	2700	900
Terminal negativo (Cu)	400.0	8700	385

k : conductividad térmica, ρ : densidad, C_p : Calor específico (Fuente: [32]).

3.4.2. Configuración del sistema

La celda tiene un plano de simetría a lo largo, por lo que se modela solo la mitad para ahorrar recursos computacionales. Además, para analizar la capacidad del SSPCM de controlar la temperatura durante el thermal runaway y de este modo ralentizar o evitar su propagación, se emplea un método similar al usado en el proceso de descarga de las celdas. Vale decir, se rodea a la celda con el material de cambio de fase (zona rosada). Todo esto se muestra en la Figura 3.7.

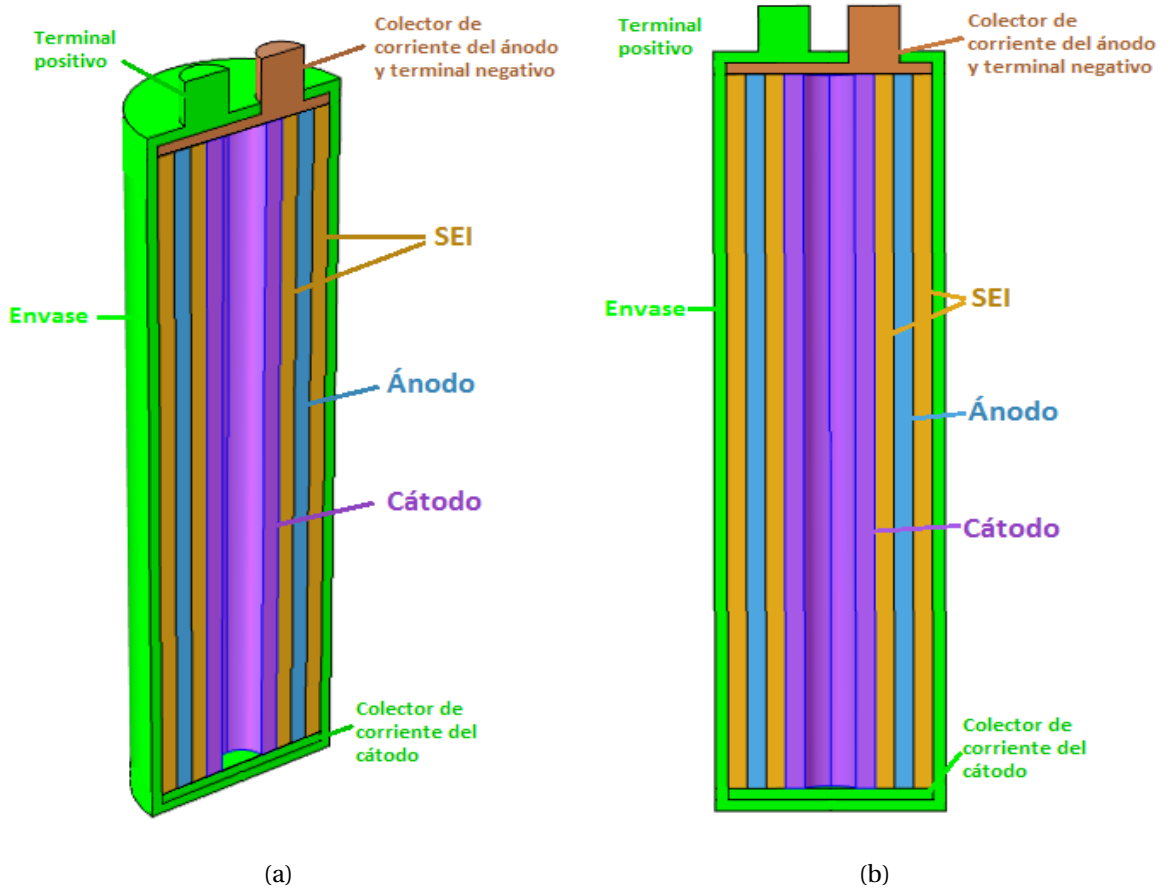


Figura 3.6: Simplificación de la celda.

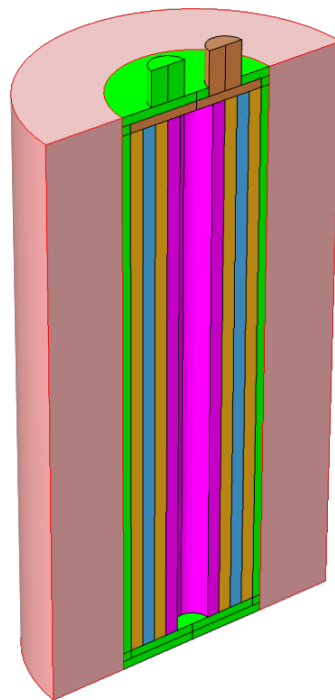


Figura 3.7: Configuración del sistema para el problema de *thermal runaway*

3.4.3. Parámetros de configuración

Debido a que el X40 y el NPG tienen temperaturas de transición muy bajas en comparación a las registradas durante el *thermal runaway*, se necesita otro SSPCM para enfriar. Se escoge el X95 de PCM Products Ltd., pues su temperatura de transición es de 95°C.

La Tabla 3.6 muestra las propiedades termofísicas del material recogidas desde [28].

Tabla 3.6: Propiedades termofísicas del X95.

	X95
Temperatura de Transición	95± 1.5[°C]
Densidad	1215 [kg/m ³]
Calor específico	1510 [J/kgK]
Conductividad térmica	0.36 [W/mK]
Calor latente	140000 [J/kg]
Difusividad térmica	1.96223×10 ⁻⁷ [m ² /s]

(Fuente: [28]).

3.4.4. Condiciones de borde

Al igual que para el proceso de descarga, se tienen bordes adiabáticos en todas las fronteras del sistema.

3.4.5. Condiciones iniciales

El *thermal runaway* puede comenzar de diversas formas, entre ellas, condiciones abusivas de carga y descarga, sobredescarga, falla mecánica en los componentes (por ejemplo, perforaciones, flexión de la celda) y cortos-circuitos. Algunos modelos han sido desarrollados para simular estas situaciones [32]. Sin embargo, la mayoría de estas situaciones escapan de los alcances de este trabajo de título.

Por lo tanto, se considera el inicio de este proceso por la alta temperatura que se alcanza la celda. Esto puede traducirse en que la temperatura inicial del sistema es 90°C, que corresponde al comienzo de la descomposición del SEI.

Resultados

4.1. Proceso de descarga

4.1.1. Validación del modelo 2D

Se realizó una serie de simulaciones a modo de prueba para validar la simplificación del modelo de 3D a 2D. La Figura 4.1a muestra el mallado utilizado para resolver el problema. Se usaron 290549 elementos tetraédricos, de 1.5 [mm³] de tamaño promedio. Para la celda 18650, NPG como PCM, tasa de descarga de 1C, espesor de PCM 2 [mm] y temperatura inicial 20°C, se obtuvo la distribución final de temperatura como la mostrada en la Figura 4.1b. El tiempo que tardó la simulación fue 673 [s] (11 [min] y 13 [s]). La temperatura máxima final conseguida fue 31.126°C y la mínima 29.702°C.

Otra simulación fue hecha bajo las mismas condiciones en 2D. En este caso, se usaron elementos 7190 triangulares, de 1.16 [mm²] de tamaño promedio. El tiempo de la simulación fue 71 [s] (1 [min] y 11 [s]). La temperatura máxima final fue 31.127°C y la mínima 29.704°C.

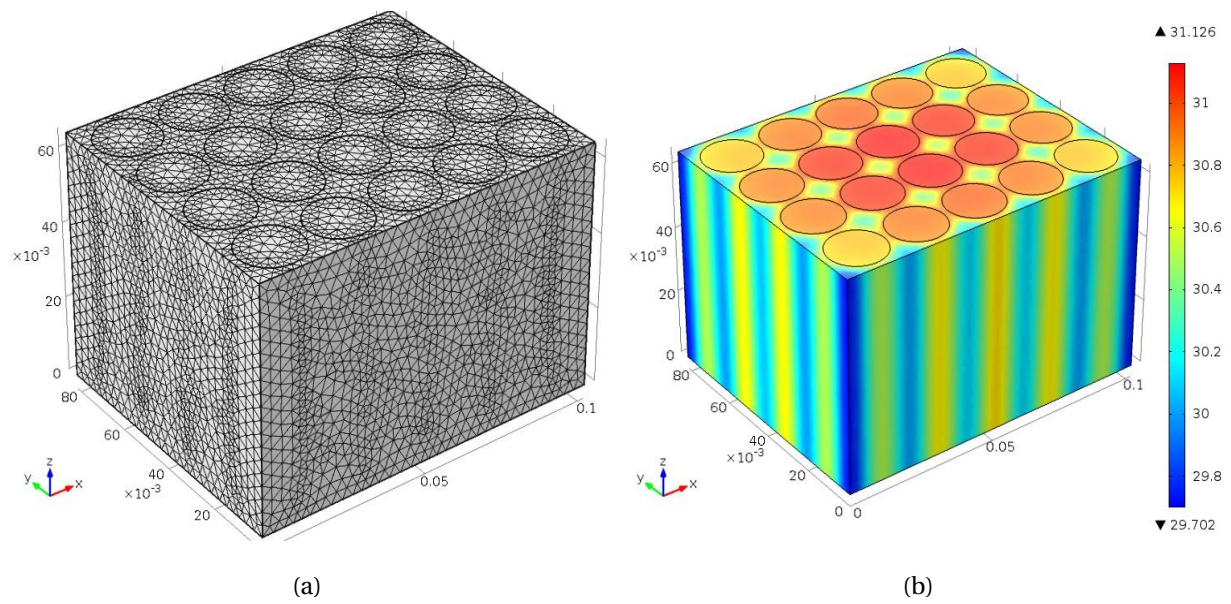


Figura 4.1: (a) Malla usada para el modelo 3D. (b) Distribución final de temperatura.

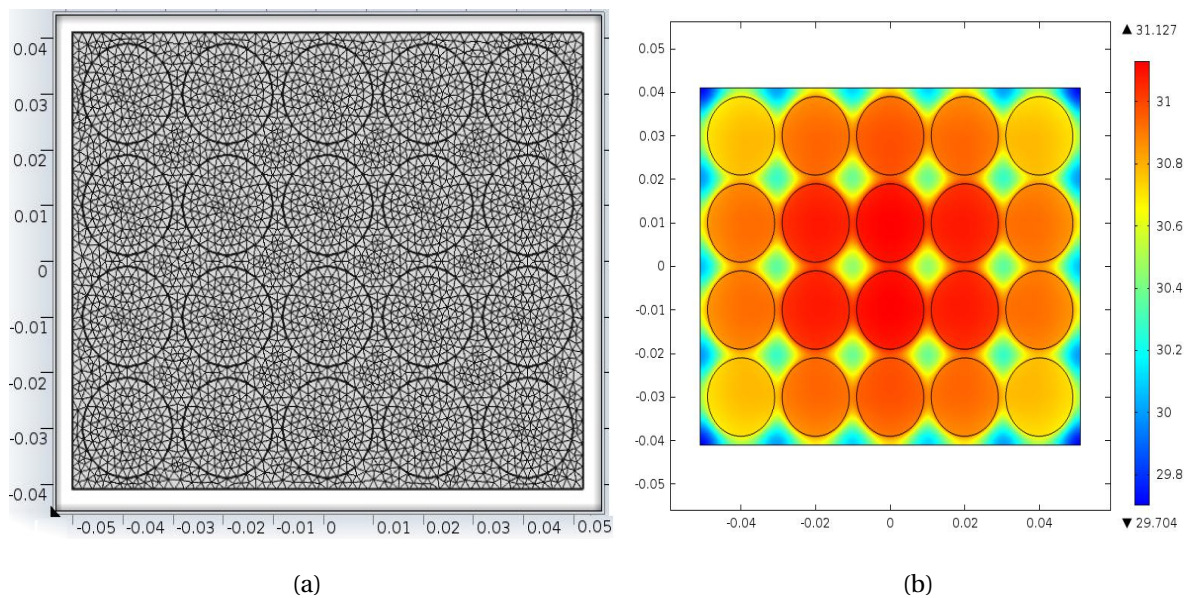


Figura 4.2: (a) Malla usada para el modelo 2D. (b) Distribución final de temperatura.

Más simulaciones fueron realizadas para otros casos y en todas ellas las diferencias fueron del orden de la centésima de grado, por lo que se válida el enfoque 2D del modelo comentado en el capítulo anterior. Mas aún, el tiempo de simulación fue 11 veces menor, por lo que dada la cantidad de simulaciones realizar, el modelo 2D resulta más conveniente.

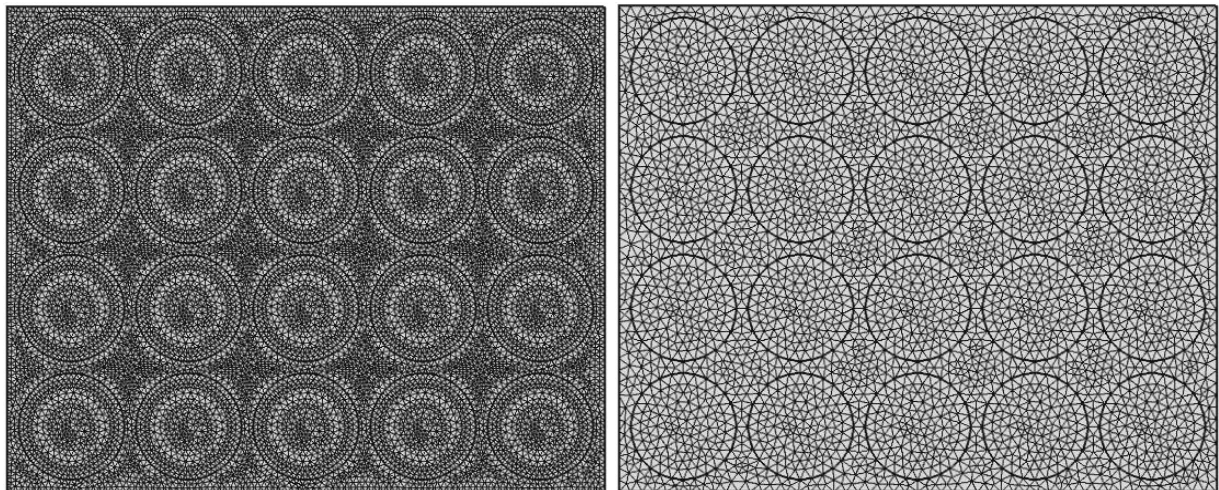
4.1.2. Parámetros FEM

Mallado

La malla que se utiliza para discretizar el espacio es un parámetro fundamental en el método de elementos finitos. Si los elementos son demasiado grandes, los resultados pueden no ser lo suficientemente precisos, y en algunos casos incluso erróneos. Por otro lado, si los elementos son demasiado pequeños, el tiempo de cálculo puede ser muy grande y los resultados no muy distintos de aquellos conseguidos con mallas más grandes. Por lo tanto, una malla que sea lo suficientemente precisa y que no signifique un gasto computacional excesivo, es buscada generalmente.

Con este objetivo, se realizan simulaciones de prueba para determinar la malla óptima. Las mallas a comparar son las predeterminadas por COMSOL y recomendadas para problemas de transferencia de calor en sólidos. Se comienza con la malla más gruesa, tal como se nombra en COMSOL, *fine*, y se continúa con las más finas, *finer*, *extra fine* y *extremely fine*. Estas mallas se muestran en las Figuras 4.3 y 4.4.

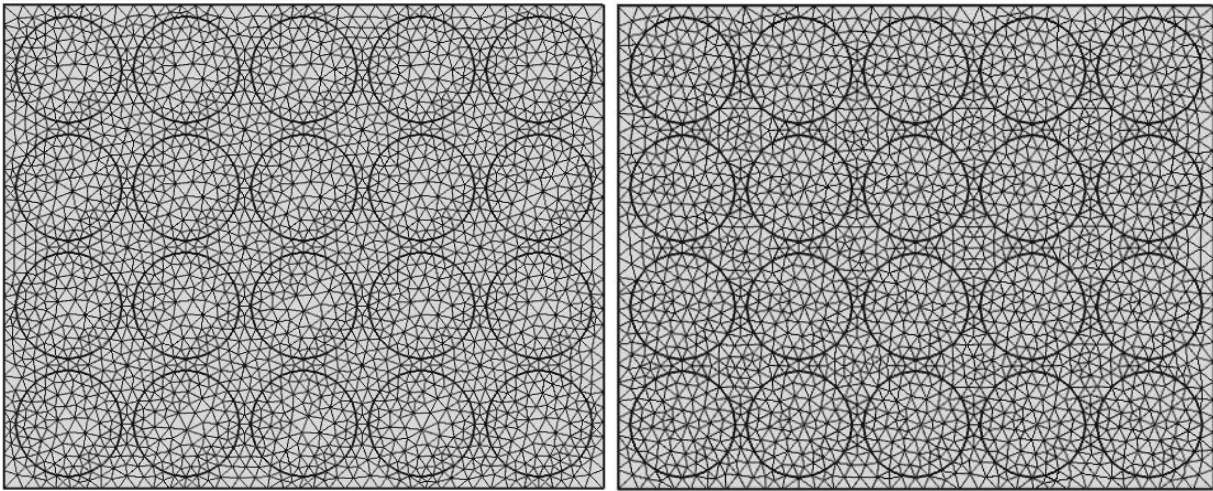
Los parámetros de diseño para estas simulaciones son: celda 18650, NPG como PCM, tasa de descarga de 2C, espesor de PCM 2 [mm] y temperatura inicial 20°C.



(a) Malla *extremely fine*.

(b) Malla *extra fine*.

Figura 4.3: Mallas más finas.



(a) Malla *finer*.

(b) Malla *fine*.

Figura 4.4: Mallas más gruesas.

La Tabla 4.1 muestra los resultados obtenidos para las simulaciones. Como es de esperarse a medida que la malla se afina, la cantidad y calidad de los elementos aumenta, al igual que el tiempo de cálculo. Sin embargo, el afinamiento a partir de la malla más gruesa no tiene un efecto trascendental en las temperaturas máximas y mínimas, consiguiendo una diferencia no superior a la centésima de grado.

Por esta razón, se utiliza una malla *fine*, la cual es lo suficientemente precisa y menos costosa computacionalmente.

Tabla 4.1: Comparación entre mallas 2D. (Fuente: Elaboración propia).

	Número Elem.	Calidad mín.	Calidad prom.	Área elemento prom. [mm ²]	Tmax [°C]	Tmin [°C]	Δt_c [s]
Extremely fine	23874	0.7538	0.9569	0.350	28.454	26.786	111
Extra fine	7190	0.6420	0.9442	1.163	28.454	26.786	43
Finer	4802	0.6307	0.9336	1.742	28.455	26.787	41
Fine	4200	0.5832	0.9282	1.991	28.454	26.786	34

Δt_c : tiempo de cómputo.

Paso temporal

Al igual que con la malla, el paso temporal es importante, pues si no se encuentra dentro de ciertos márgenes definidos por las características del problema, el método se vuelve ineficaz para resolverlo. Si el paso excede un máximo, el método podría tornarse inestable entregando resultados erróneos. Por el contrario, si se afina el paso demasiado, el aumento en la precisión de los cálculos no se condice con el incremento sustancial de los tiempos de cómputo.

Por estas razones, también es necesario encontrar un paso temporal que equilibre estas situaciones. Para esto, se realizan simulaciones similares a las del mallado, en busca del paso temporal ideal. Se comienza con 1 [min] de paso y se afina hasta que las diferencias no sean significativas. La Tabla 4.2 muestra las temperaturas obtenidas para cada caso.

Tabla 4.2: Comparación entre mallas.

Paso temporal	60 [s]	30 [s]	10 [s]	1 [s]	0.5 [s]	0.1 [s]
Tmin [°C]	26.786	26.786	26.786	26.786	26.786	26.786
Tmax [°C]	28.454	28.454	28.454	28.454	28.454	28.454
Δt_c [s]	6	7	8	35	68	368

Δt_c : tiempo de cómputo. (Fuente: Elaboración propia).

Para este tipo de problemas en particular, el paso temporal no varía los resultados, por lo que se escoge los 10 [s] como paso.

4.1.3. Calor generado

De acuerdo a las Ecs. 2.5 y 2.9, para calcular el calor total que se genera en cada una es necesario conocer el voltaje de circuito-abierto, la corriente eléctrica, la resistencia interna, el cambio de entropía y la temperatura de la celda.

Calor de Joule

Las corrientes eléctricas se especifican en la Tabla 3.4 y las resistencias internas se encuentran en la Tabla 3.3, bajo el supuesto de que estas resistencias permanecen constantes. Con estos valores se puede calcular el calor de Joule por celda a partir de la Ecuación 2.8, los que se muestran en la Tabla 4.3, para cada una de las tasas de descarga consideradas.

Tabla 4.3: Calor de Joule, en [W], obtenido para distintas tasas de descarga.

Tasa descarga	0.5C	1C	2C	10C
Celda 18650	0.00768	0.0307	0.1229	3.072
Celda 26650	0.02535	0.1014	0.4056	10.140

(Fuente: Elaboración propia).

Calores totales

El calor generado por las celdas varía principalmente con la tasa de descarga, debido al calor de Joule, y al estado de carga de las celdas, producto del calor por cambio de entropía. El espesor de PCM no tiene mayor injerencia, al provocar cambios de menos de una décima de watt por celda entre los 0 [mm] y 2[mm].

Por esta razón, para presentar el calor generado por las celdas se promedió los valores obtenidos para cada espesor. Los resultados para el calor por cambio de entropía se muestran en las Figura 4.5, 4.6, 4.7 y 4.8. El calor total se muestra en las Figura 4.9, 4.10, 4.11 y 4.12.

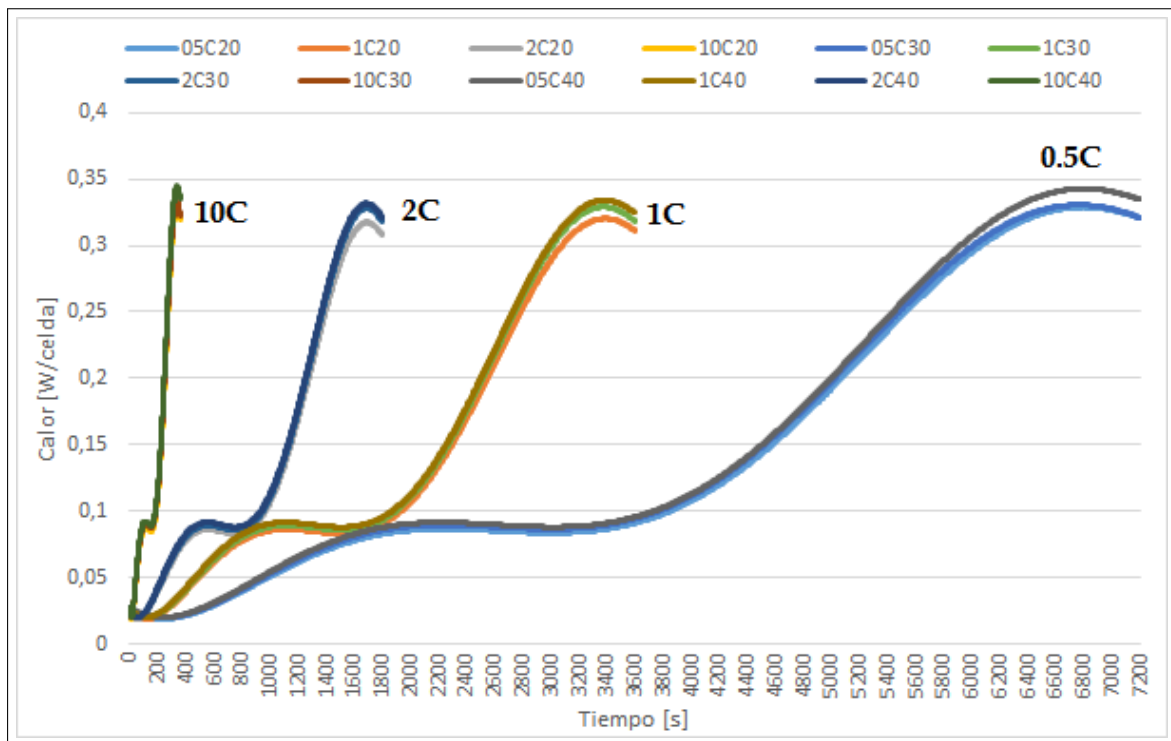


Figura 4.5: Evolución del calor generado por cambio de entropía por una celda 18650 y X40 como medio de enfriamiento.

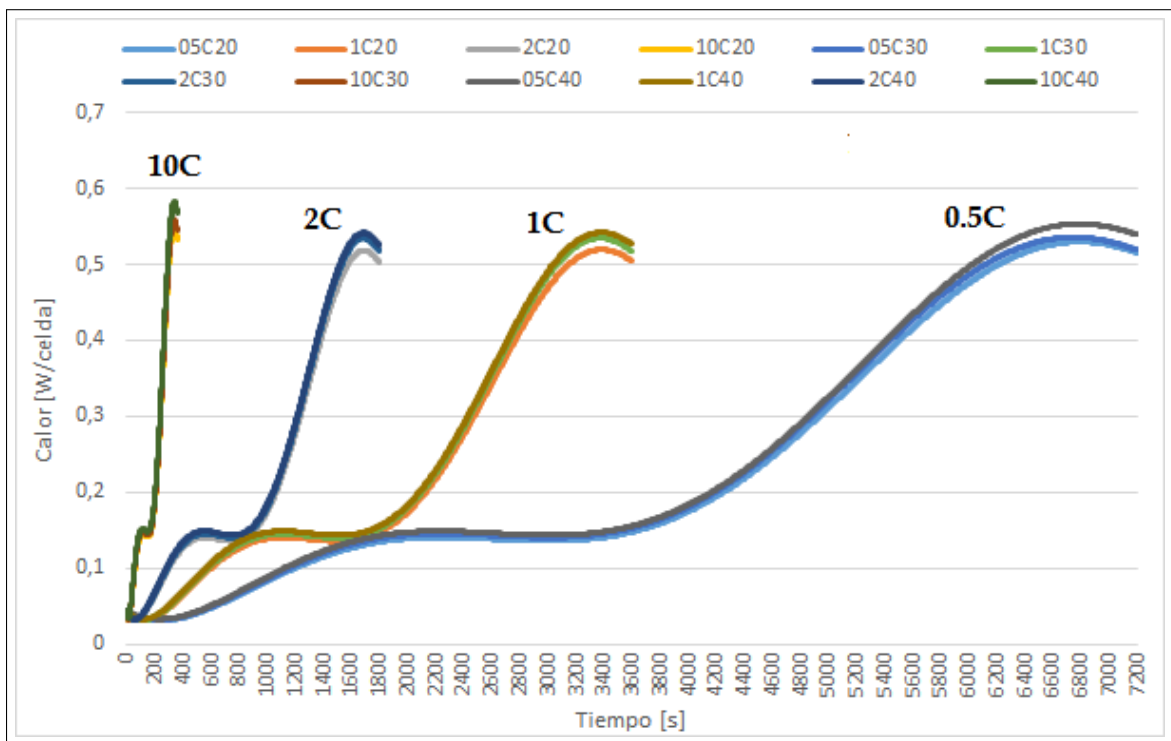


Figura 4.6: Evolución del calor generado por cambio de entropía por una celda 26650 y X40 como medio de enfriamiento.

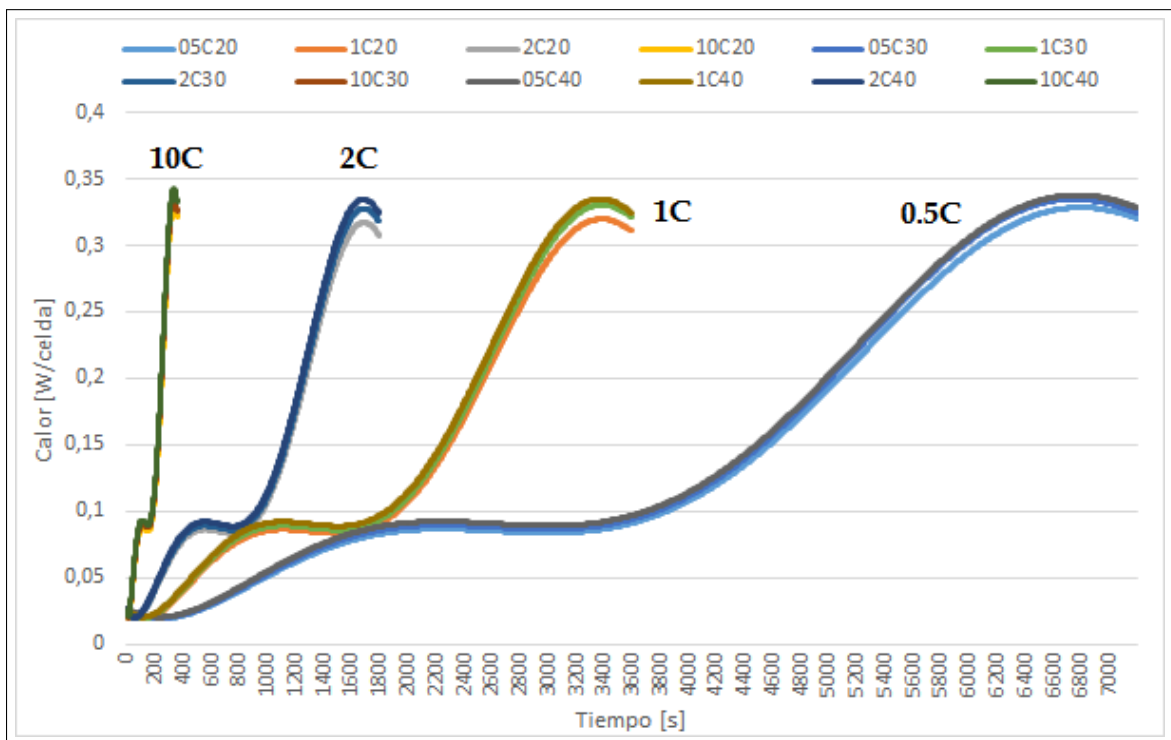


Figura 4.7: Evolución del calor generado por cambio de entropía por una celda 18650 y NPG como medio de enfriamiento.

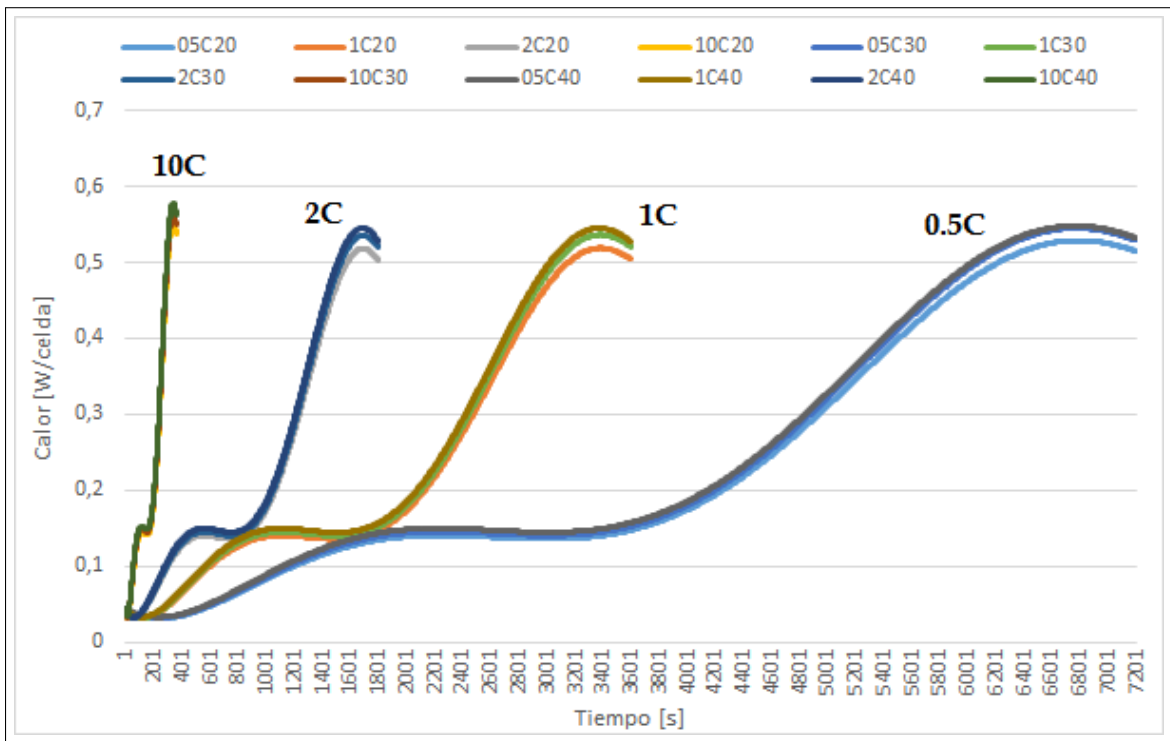


Figura 4.8: Evolución del calor generado por cambio de entropía por una celda 26650 y NPG como medio de enfriamiento.

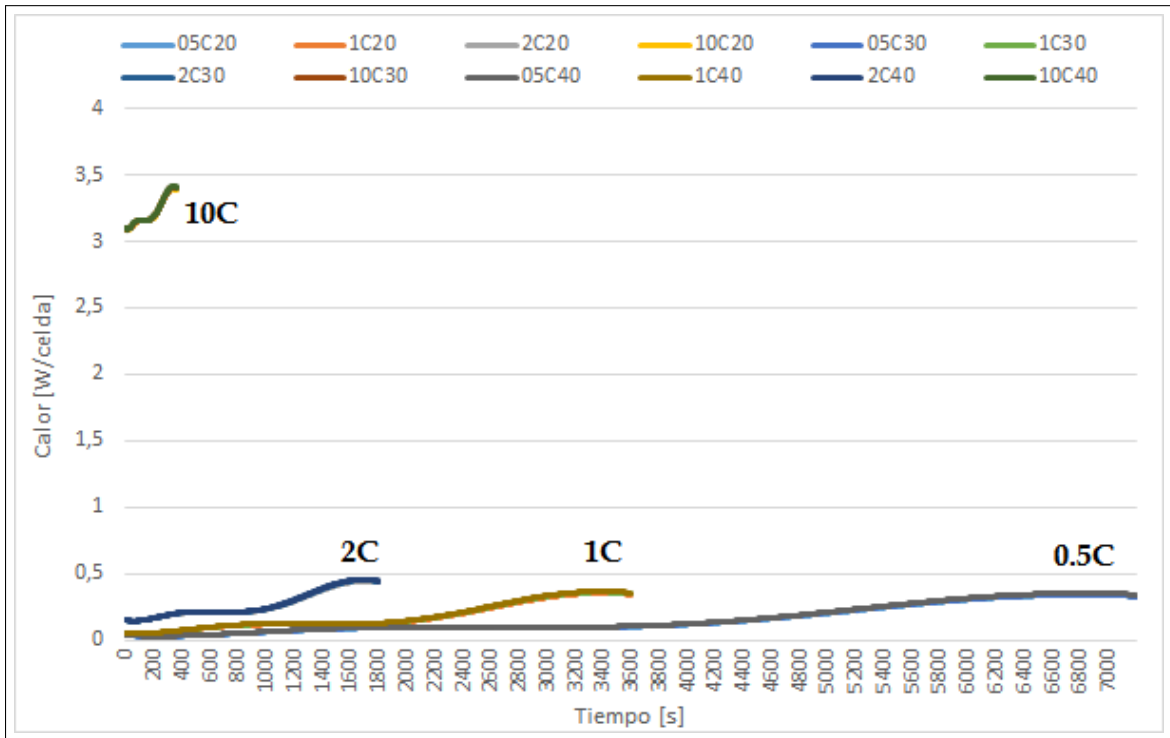


Figura 4.9: Evolución del calor generado total por una celda 18650 y X40 como medio de enfriamiento.

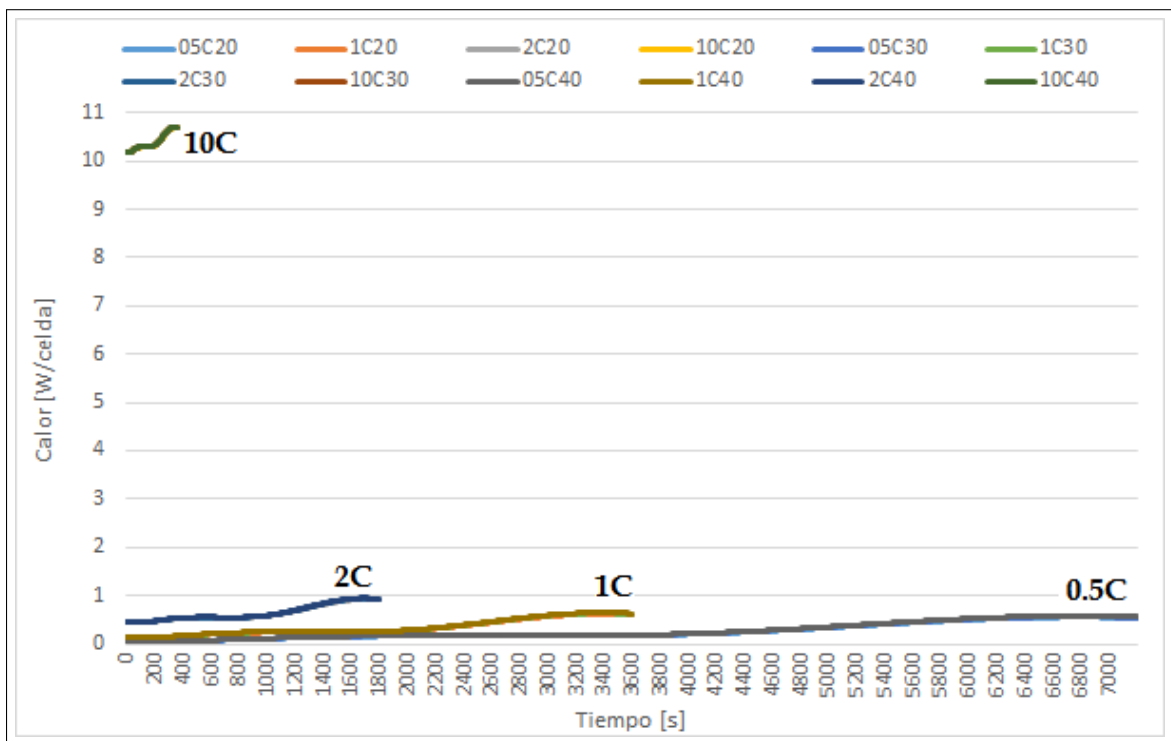


Figura 4.10: Evolución del calor generado total por una celda 26650 y X40 como medio de enfriamiento.

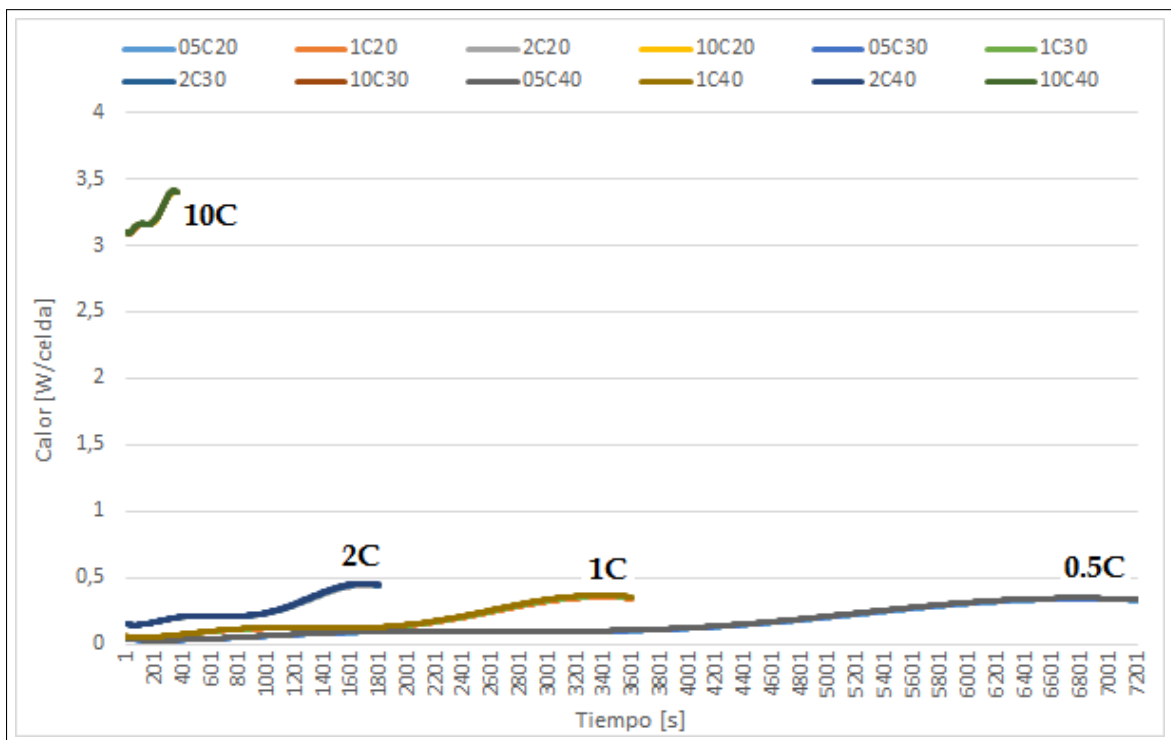


Figura 4.11: Evolución del calor generado total por una celda 18650 y NPG como medio de enfriamiento.

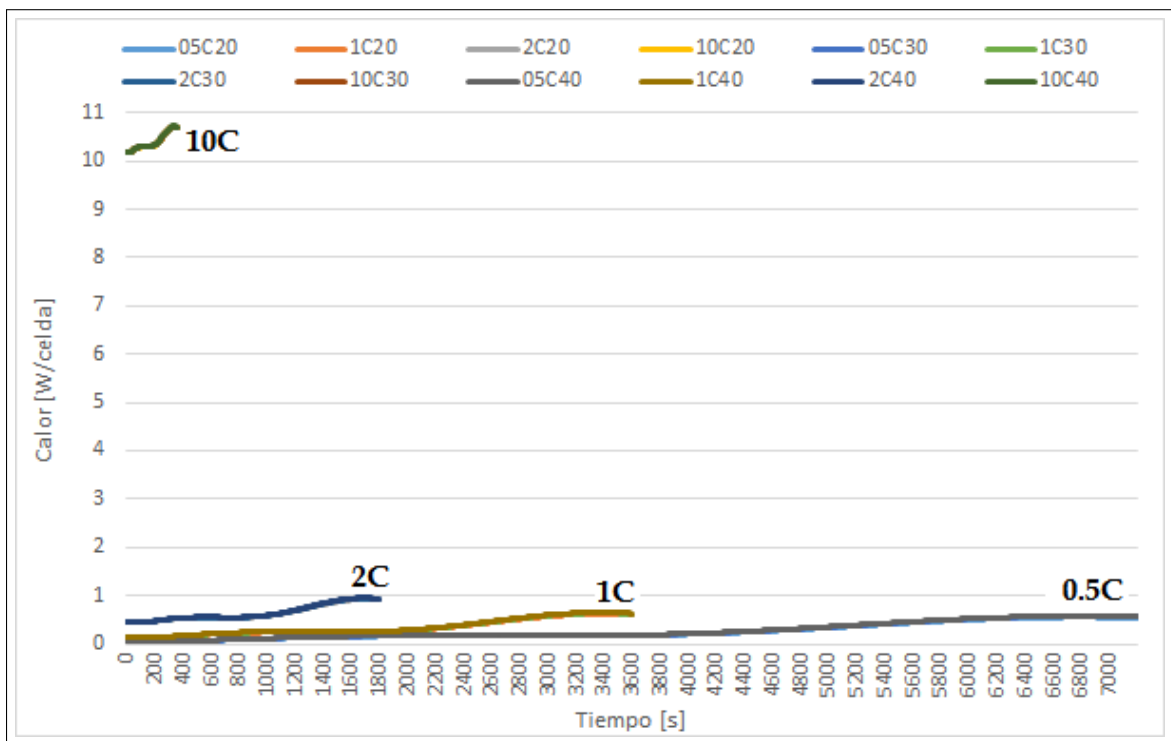


Figura 4.12: Evolución del calor generado total por una celda 26650 y NPG como medio de enfriamiento.

Calor total absorbido por el PCM

La temperatura final de los sistemas es determinado por el calor total absorbido durante todo el proceso. A continuación se presentan estos valores para todos los casos, obtenidos a partir de la integración de las curvas de generación de calor con respecto al tiempo.

Tabla 4.4: Calor por cambio de entropía total absorbido durante el proceso de descarga en [J] para celdas 18650 y NPG como PCM.

T_0	0.5C	1C	2C	10C
20°C	1051.210	517.602	255.775	53.209
30°C	1081.809	535.166	266.464	54.595
40°C	1100.114	547.808	273.771	55.674

(Fuente: Elaboración propia).

Tabla 4.5: Calor total absorbido durante el proceso de descarga en [J] para celdas 18650 y NPG como PCM. (Fuente: Elaboración propia).

T_0	0.5C	1C	2C	10C
20°C	1106.506	628.194	478.939	1159.282
30°C	1137.105	645.758	487.648	1160.599
40°C	1155.410	658.400	494.955	1161.612

(Fuente: Elaboración propia).

Tabla 4.6: Calor por cambio de entropía total absorbido durante el proceso de descarga en [J] para celdas 26650 y NPG como PCM. (Fuente: Elaboración propia).

T_0	0.5C	1C	2C	10C
20°C	1698.965	840.787	420.702	88.781
30°C	1755.224	869.247	434.831	90.903
40°C	1786.462	890.774	445.755	93.027

(Fuente: Elaboración propia).

Tabla 4.7: Calor total absorbido durante el proceso de descarga en [J] para celdas 26650 y NPG como PCM.

T_0	0.5C	1C	2C	10C
20°C	1881.485	1205.827	1150.782	3739.181
30°C	1937.744	1234.287	1164.911	3741.303
40°C	1968.982	1255.810	1175.835	3743.427

(Fuente: Elaboración propia).

Tabla 4.8: Calor por cambio de entropía total absorbido durante el proceso de descarga en [J] para celdas 18650 y X40 como PCM.

T_0	0.5C	1C	2C	10C
20°C	1052.117	517.952	257.883	53.185
30°C	1074.491	534.474	266.545	54.187
40°C	1100.924	544.063	271.285	55.740

(Fuente: Elaboración propia).

Tabla 4.9: Calor total absorbido durante el proceso de descarga en [J] para celdas 18650 y X40 como PCM.

T_0	0.5C	1C	2C	10C
20°C	1107.413	628.544	479.067	1159.105
30°C	1129.787	645.066	487.772	1160.107
40°C	1156.220	654.655	492.469	1161.660

(Fuente: Elaboración propia).

Tabla 4.10: Calor por cambio de entropía total absorbido durante el proceso de descarga en [J] para celdas 26650 y X40 como PCM.

T_0	0.5C	1C	2C	10C
20°C	1700.452	841.250	420.902	88.215
30°C	1734.343	868.582	434.670	90.108
40°C	1784.014	883.936	442.288	93.331

(Fuente: Elaboración propia).

Tabla 4.11: Calor total absorbido durante el proceso de descarga en [J] para celdas 26650 y X40 como PCM.

T_0	0.5C	1C	2C	10C
20°C	1882.972	1206.290	1150.982	3738.310
30°C	1925.954	1233.622	1164.750	3740.508
40°C	1966.534	1248.976	1172.368	3743.731

(Fuente: Elaboración propia).

4.1.4. Temperaturas finales

Para cada avance temporal en la simulación, COMSOL es capaz de entregar la temperatura máxima en el arreglo de celdas. La variación de la temperatura máxima en el arreglo con respecto al tiempo para cada uno de los casos se muestra en el Apéndice A.

La Tabla 4.12 muestra las temperaturas máximas en el arreglo en el tiempo final de operación para las celdas del tipo 18650, mientras que en la Tabla 4.13 se enseñan para las celdas del tipo

26650. En ambos casos se utiliza el X40 como medio de enfriamiento y se presentan los resultados para todas las tasas de descarga, temperaturas iniciales y espesores de PCM. En ambas Tablas, las celdas de color rojo representan los casos en que la temperatura final es mayor a la máxima permitida, vale decir, $50^{\circ}\text{C} < T_{\text{final}}$.

Las Figuras 4.13 y 4.14 presentan la variación de las temperaturas finales máximas en las celdas con el espesor de PCM, para todas las tasas de descarga y temperaturas iniciales.

Tabla 4.12: Temperaturas finales máximas en $^{\circ}\text{C}$ para celdas 18650 y X40 como PCM.

T_0	Tasa	NoPCM	0.0[mm]	0.4[mm]	0.8[mm]	1.2[mm]	1.6[mm]	2.0[mm]
20°C	0.5C	49.92	42.55	43.35	42.06	41.77	41.02	39.53
	1C	36.75	33.94	33.37	32.85	32.36	31.92	31.49
	2C	32.52	30.45	30.04	29.66	29.32	28.99	28.69
	10C	49.34	41.90	41.58	41.37	41.15	40.78	40.60
30°C	0.5C	60.89	44.67	40.89	40.88	40.21	40.32	40.21
	1C	47.22	40.14	39.90	39.82	39.95	39.80	39.40
	2C	42.75	39.67	39.21	39.33	39.13	38.93	38.71
	10C	59.39	46.33	45.44	44.54	43.75	43.15	42.81
40°C	0.5C	71.86	58.84	58.46	56.26	55.28	52.75	50.96
	1C	57.69	49.55	47.94	46.41	45.15	43.34	42.55
	2C	52.99	44.46	44.27	42.72	41.96	41.56	41.35
	10C	69.43	60.09	58.77	57.24	55.76	54.47	53.24

(Fuente: Elaboración propia).

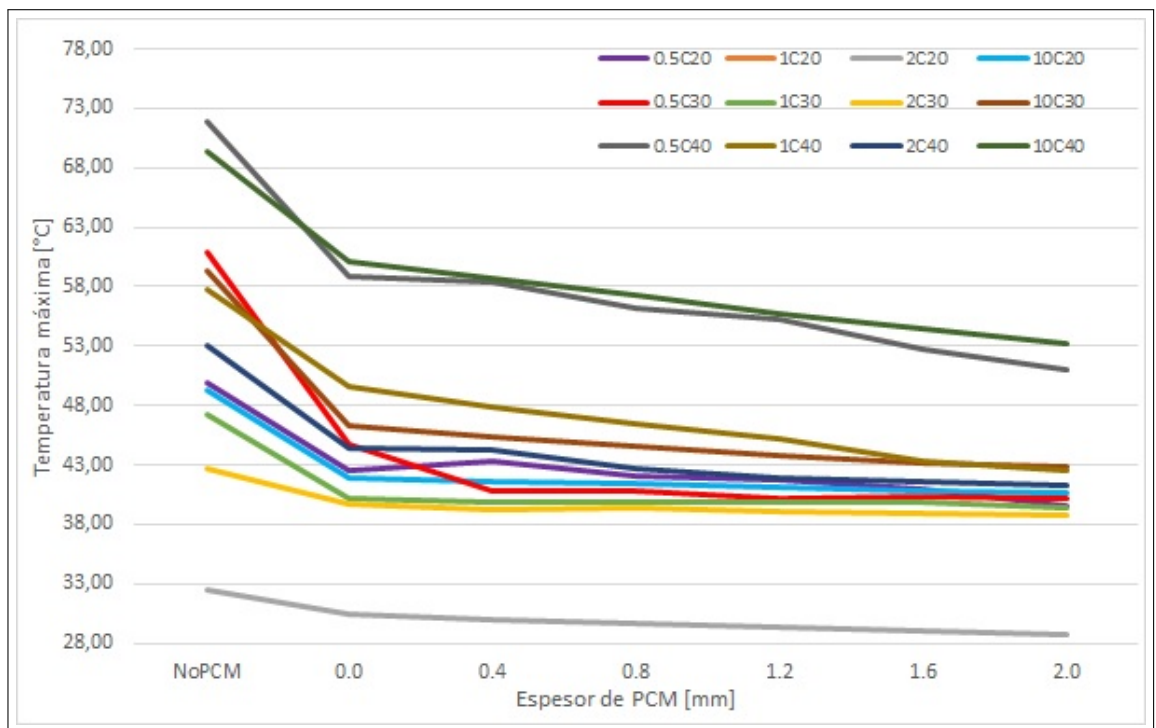


Figura 4.13: Variación de la temperatura máxima final de la celda 18650 y X40 como medio de enfriamiento con respecto al espesor del PCM.

Tabla 4.13: Temperaturas finales máximas en [°C] para celdas 26650 y X40 como PCM.

T ₀	Tasa	NoPCM	0.0[mm]	0.4[mm]	0.8[mm]	1.2[mm]	1.6[mm]	2.0[mm]
20°C	0.5C	44.22	39.22	39.12	38.92	38.11	37.94	37.66
	1C	35.26	32.75	32.39	32.07	31.76	31.47	31.19
	2C	34.25	31.94	31.62	31.34	31.06	30.80	30.56
	10C	65.29	52.07	51.53	50.49	49.59	48.90	47.90
30°C	0.5C	54.97	40.76	40.81	40.66	40.52	40.47	40.36
	1C	45.63	40.06	40.00	40.11	39.99	39.63	39.77
	2C	44.43	40.01	39.87	40.04	39.93	39.90	39.81
	10C	75.32	60.55	59.27	57.99	56.51	54.56	53.37
40°C	0.5C	65.72	56.03	54.20	53.74	52.32	50.74	50.12
	1C	55.99	46.94	45.72	45.93	45.31	44.42	43.83
	2C	54.61	46.82	45.75	45.13	43.76	43.86	43.41
	10C	85.36	74.29	72.77	70.89	70.61	69.35	67.62

(Fuente: Elaboración propia).

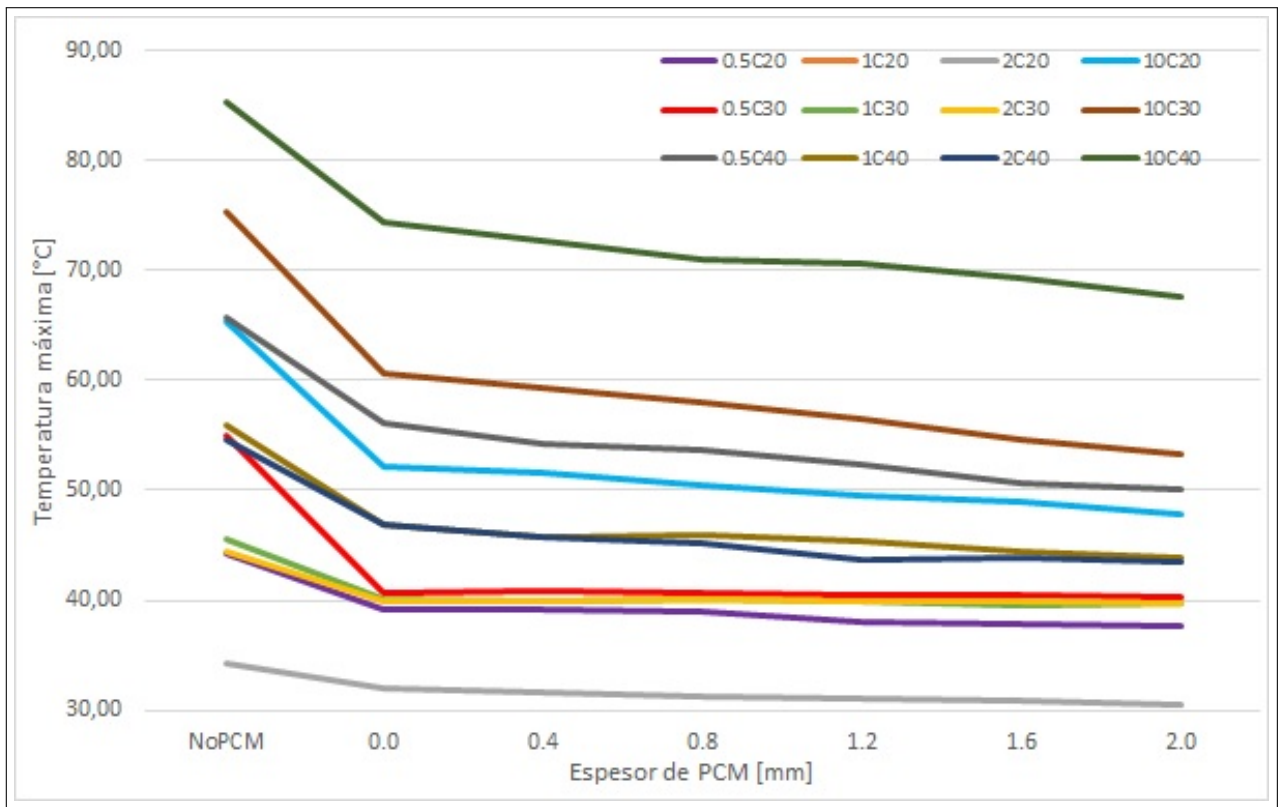


Figura 4.14: Variación de la temperatura máxima final de la celda 26650 y X40 como medio de enfriamiento con respecto al espesor del PCM.

Por otro lado, la Tabla 4.14 muestra las temperaturas finales máximas en el arreglo para las celdas del tipo 18650, mientras que en la Tabla 4.15 se enseñan para las celdas del tipo 26650 para el caso en que se utiliza el NPG como medio de enfriamiento. Los resultados se presentan para todas las tasas de descarga, temperaturas iniciales y espesores de PCM.

Al igual que para el caso del X40, las celdas de color rojo representan los casos en que la temperatura final es mayor a la máxima permitida, vale decir, $50^{\circ}\text{C} < T_{\text{final}}$.

Las Figura 4.15 y 4.16 presentan como varían las temperaturas finales máximas en las celdas con el espesor de PCM, para todas las tasas de descarga y temperaturas iniciales.

Tabla 4.14: Temperaturas finales máximas en [°C] para celdas 18650 y NPG como PCM.

T ₀	Tasa	NoPCM	0.0[mm]	0.4[mm]	0.8[mm]	1.2[mm]	1.6[mm]	2.0[mm]
20°C	0.5C	49.92	44.00	42.71	42.28	41.15	40.29	39.49
	1C	36.75	33.63	33.03	32.49	32.00	31.55	31.13
	2C	32.52	30.23	29.80	29.42	29.07	28.75	28.45
	10C	49.34	44.17	43.48	42.78	42.10	41.42	40.85
30°C	0.5C	60.89	47.30	46.01	45.25	45.29	45.48	45.25
	1C	47.22	43.59	43.29	42.91	42.34	41.88	41.44
	2C	42.75	40.42	39.99	39.60	39.24	38.92	38.61
	10C	59.39	49.99	49.12	48.34	47.83	47.62	47.59
40°C	0.5C	71.86	55.50	52.92	48.61	48.61	47.16	46.45
	1C	57.69	46.26	45.69	45.67	45.52	45.41	45.31
	2C	52.99	45.69	45.50	45.35	45.23	45.12	45.09
	10C	69.43	57.34	55.95	53.58	52.78	52.67	52.04

(Fuente: Elaboración propia).

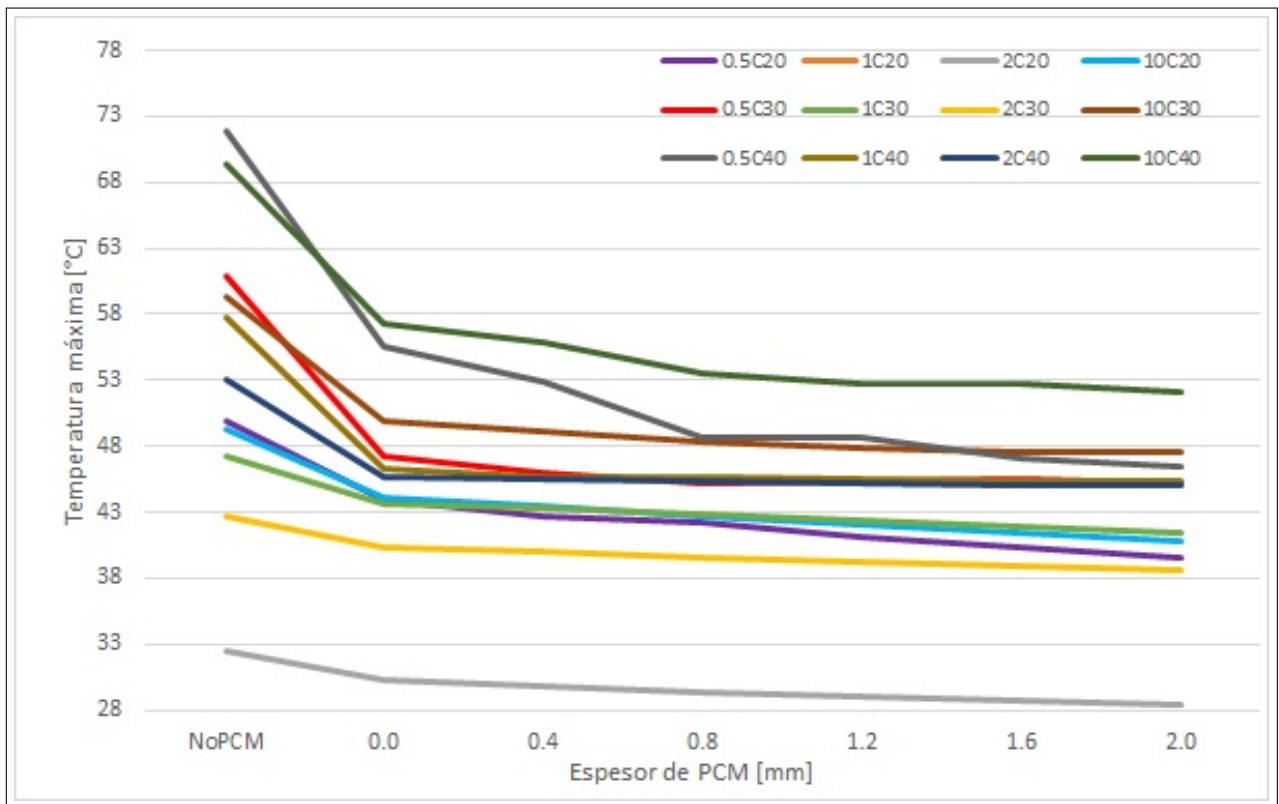


Figura 4.15: Variación de la temperatura máxima final de la celda 18650 y NPG como medio de enfriamiento con respecto al espesor del PCM.

Tabla 4.15: Temperaturas finales máximas en [°C] para celdas 26650 y NPG como PCM.

T ₀	Tasa	NoPCM	0.0[mm]	0.4[mm]	0.8[mm]	1.2[mm]	1.6[mm]	2.0[mm]
20°C	0.5C	44.22	39.68	38.92	38.50	37.97	37.48	37.01
	1C	35.26	32.48	32.12	31.78	31.47	31.18	30.90
	2C	34.25	31.72	31.40	31.11	30.83	30.58	30.34
	10C	65.29	54.80	54.14	53.21	52.42	51.96	51.84
30°C	0.5C	54.97	50.37	49.59	45.36	45.33	45.38	45.03
	1C	45.63	42.80	42.41	42.07	41.75	41.45	41.17
	2C	44.43	41.87	41.54	41.25	40.97	40.72	40.47
	10C	75.32	62.68	62.10	60.43	59.51	59.13	57.86
40°C	0.5C	65.72	51.71	49.83	48.99	48.25	47.57	46.92
	1C	55.99	46.80	46.38	46.05	45.84	45.73	45.64
	2C	54.61	46.72	46.39	46.16	46.01	45.89	45.87
	10C	85.36	70.96	70.15	69.29	67.36	66.59	66.01

(Fuente: Elaboración propia)

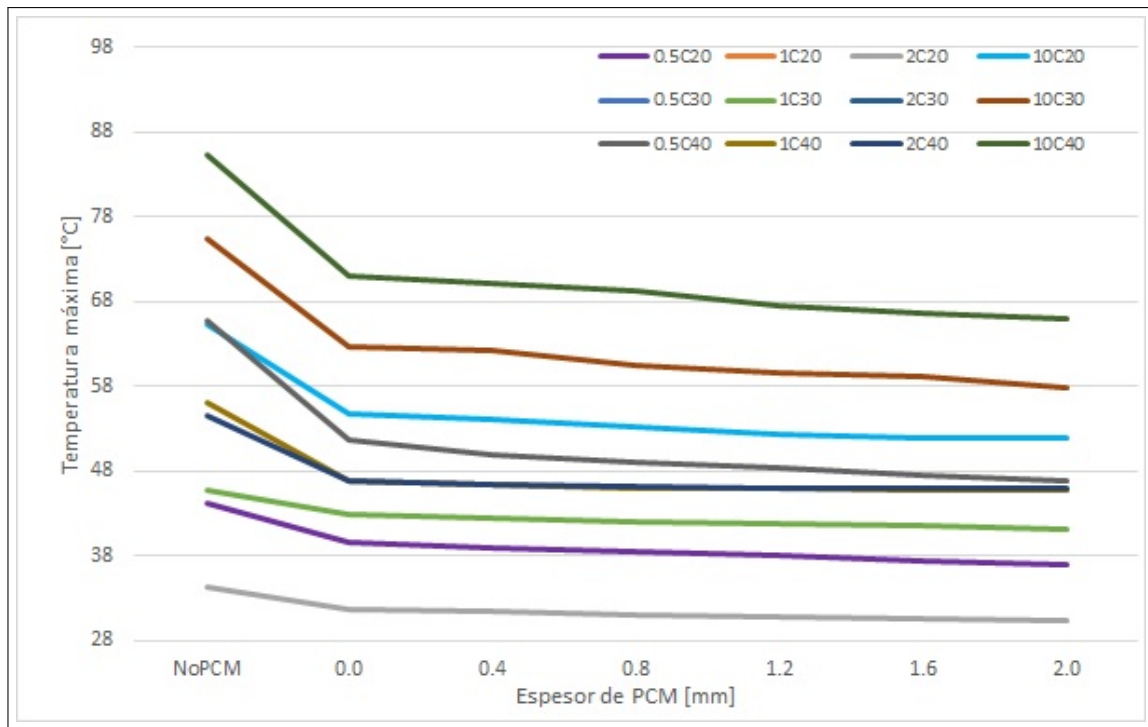


Figura 4.16: Variación de la temperatura máxima final de la celda 26650 y NPG como medio de enfriamiento con respecto al espesor del PCM.

4.1.5. Diferencia de temperaturas entre celdas

Para cada paso temporal, COMSOL obtiene la temperatura máxima y mínima en el arreglo, y luego calcula la diferencia entre ambas.

Las Tablas 4.16 y 4.17 muestran las diferencias de temperatura máxima obtenidas en las simulaciones, para los casos con X40 como medio de enfriamiento, mientras que las Tablas 4.18 y 4.19 son para los casos en que se usa el NPG.

En todas las Tablas, las celdas de color rojo representan los casos en los que la diferencia supera a la permitida, es decir, $5^{\circ}\text{C} < T_{\text{cell}}$.

Tabla 4.16: Diferencia de temperatura máxima entre las celdas y al interior de ellas durante el proceso de descarga, en $^{\circ}\text{C}$, para celdas 18650 y X40 como PCM.

T_0	Tasa	0.0[mm]	0.4[mm]	0.8[mm]	1.2[mm]	1.6[mm]	2.0[mm]
20°C	0.5C	0.146	0.081	0.112	0.157	0.250	0.289
	1C	0.037	0.084	0.135	0.190	0.249	0.307
	2C	0.047	0.102	0.161	0.224	0.288	0.351
	10C	1.276	1.272	1.279	1.343	1.463	1.685
30°C	0.5C	0.146	0.081	0.112	0.157	0.250	0.289
	1C	0.192	0.212	0.212	0.229	0.239	0.783
	2C	0.156	0.185	0.188	0.218	0.279	0.338
	10C	1.335	1.845	2.233	2.025	1.645	1.505
40°C	0.5C	0.055	0.218	0.402	0.832	0.936	1.179
	1C	0.094	0.248	0.651	0.977	1.100	1.129
	2C	0.170	0.484	0.716	0.660	0.538	0.437
	10C	1.108	1.292	1.885	2.773	3.101	3.319

(Fuente: Elaboración propia)

Tabla 4.17: Diferencia de temperatura máxima entre las celdas y al interior de ellas durante el proceso de descarga, en [°C], para celdas 26650 y X40 como PCM.

T ₀	Tasa	0.0[mm]	0.4[mm]	0.8[mm]	1.2[mm]	1.6[mm]	2.0[mm]
20°C	0.5C	0.263	0.147	0.161	0.211	0.267	0.391
	1C	0.066	0.118	0.173	0.230	0.289	0.347
	2C	0.097	0.170	0.245	0.320	0.397	0.470
	10C	3.099	3.609	4.140	4.396	4.365	3.772
30°C	0.5C	0.290	0.386	0.390	0.385	0.383	0.365
	1C	0.305	0.309	0.360	0.329	0.495	0.325
	2C	0.375	0.392	0.425	0.428	0.374	0.405
	10	3.370	3.511	4.469	4.896	4.929	5.333
40°C	0.5C	0.102	0.299	0.522	0.751	0.693	1.291
	1C	0.196	0.385	0.550	0.920	0.920	1.220
	2C	0.395	0.518	0.854	0.925	1.078	1.138
	10C	2.286	2.646	3.058	3.740	4.394	5.026

(Fuente: Elaboración propia)

Tabla 4.18: Diferencia de temperatura máxima entre las celdas y al interior de ellas durante el proceso de descarga, en [°C], para celdas 18650 y NPG como PCM.

T ₀	Tasa	0.0[mm]	0.4[mm]	0.8[mm]	1.2[mm]	1.6[mm]	2.0[mm]
20°C	0.5C	0.065	0.106	0.207	0.289	0.391	0.496
	1C	0.042	0.108	0.187	0.273	0.362	0.449
	2C	0.052	0.128	0.214	0.303	0.390	0.472
	10C	0.501	0.775	1.150	1.451	1.712	1.897
30°C	0.5C	0.187	0.330	0.640	0.301	0.522	0.628
	1C	0.074	0.107	0.212	0.281	0.373	0.463
	2C	0.054	0.131	0.219	0.309	0.398	0.482
	10C	1.142	1.580	1.515	1.475	1.493	1.597
40°C	0.5C	0.156	0.474	1.002	1.002	0.949	0.598
	1C	0.192	0.256	0.300	0.282	0.262	0.235
	2C	0.220	0.282	0.280	0.279	0.241	0.245
	10C	1.097	1.654	2.494	2.445	2.297	1.951

(Fuente: Elaboración propia)

Tabla 4.19: Diferencia de temperatura máxima entre las celdas y al interior de ellas durante el proceso de descarga, en [°C], para celdas 26650 y NPG como PCM. (Fuente: Elaboración propia).

T ₀	Tasa	0.0[mm]	0.4[mm]	0.8[mm]	1.2[mm]	1.6[mm]	2.0[mm]
20°C	0.5C	0.066	0.154	0.215	0.303	0.395	0.486
	1C	0.074	0.142	0.219	0.299	0.380	0.457
	2C	0.109	0.200	0.297	0.392	0.486	0.570
	10C	3.824	3.177	3.314	3.449	3.645	3.971
30°C	0.5C	0.068	0.130	0.428	0.287	0.416	0.509
	1C	0.076	0.146	0.225	0.307	0.390	0.469
	2C	0.111	0.204	0.302	0.398	0.493	0.578
	10C	2.839	3.047	4.142	4.161	4.348	3.823
40°C	0.5C	0.241	0.520	0.714	0.901	0.908	0.806
	1C	0.299	0.427	0.420	0.409	0.382	0.349
	2C	0.418	0.537	0.537	0.495	0.466	0.526
	10C	3.514	3.247	3.940	4.410	4.801	5.052

(Fuente: Elaboración propia)

4.2. Expulsión de calor

Debido a que la temperatura del fluido involucrado en la convección natural es la misma que la del estado inicial del sistema, el tiempo para alcanzarla es demasiado prolongado, por lo que se considera el tiempo necesario para obtener un grado celsius o menos por sobre la temperatura inicial. Además, se considera la expulsión de calor para un espesor de PCM de 2 [mm], ya que en la mayoría de los casos logra el control térmico.

Las Tablas 4.20 y 4.21 muestran los tiempos necesarios para expulsar el calor.

Tabla 4.20: Tiempos, en [h], necesarios para enfriar el sistema, para X40 como PCM.

T ₀	18650				26650			
	0.5C	1C	2C	10C	0.5C	1C	2C	10C
20°C	10.20	12.33	9.72	13.11	18.82	16.52	16.16	20.83
30°C	11.86	12.55	11.05	12.61	16.94	16.66	16.72	-
40°C	-	4.33	3.75	-	-	17.88	17.25	-

(Fuente: Elaboración propia).

Tabla 4.21: Tiempos, en [h], necesarios para enfriar el sistema, para NPG como PCM.

T ₀	18650				26650			
	0.5C	1C	2C	10C	0.5C	1C	2C	10C
20°C	14.44	12.77	11.66	14.86	20.94	18.25	17.86	-
30°C	14.16	12.97	11.75	12.00	20.94	18.47	18.11	-
40°C	21.27	14.05	12.08	-	26.72	18.25	18.50	-

(Fuente: Elaboración propia).

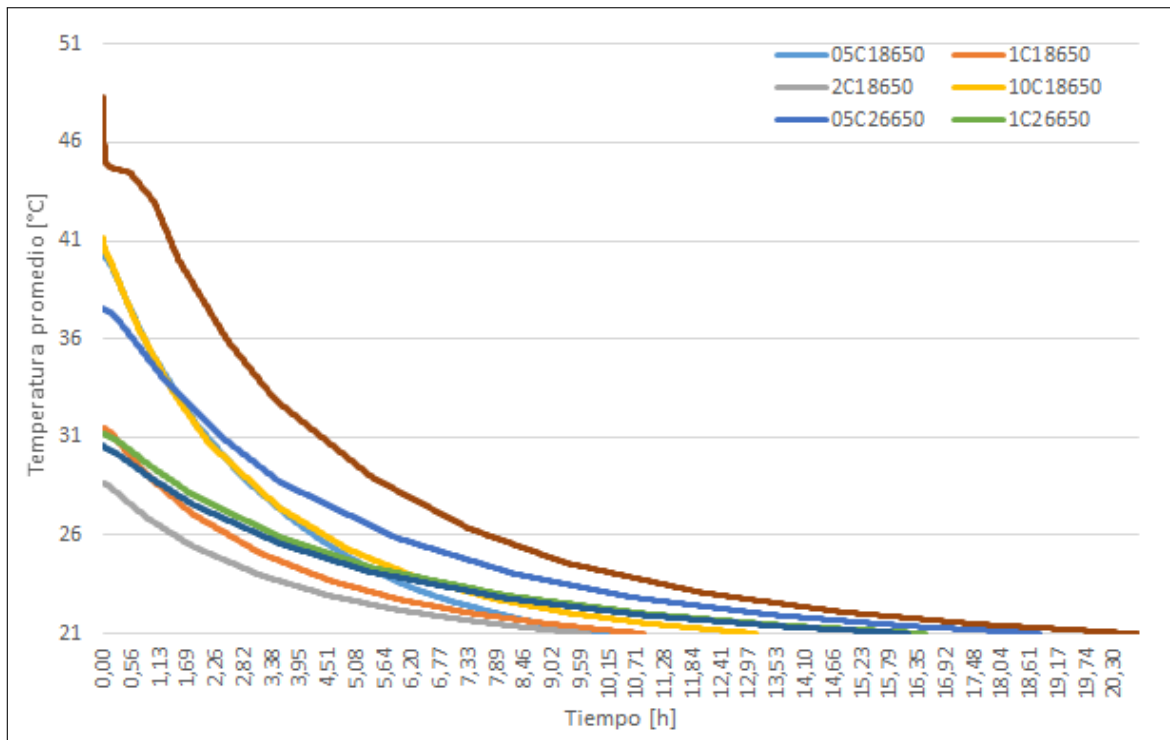


Figura 4.17: Variación de la temperatura máxima en las celdas durante la expulsión de calor para el X40 como medio de enfriamiento y T₀ = 20°C.

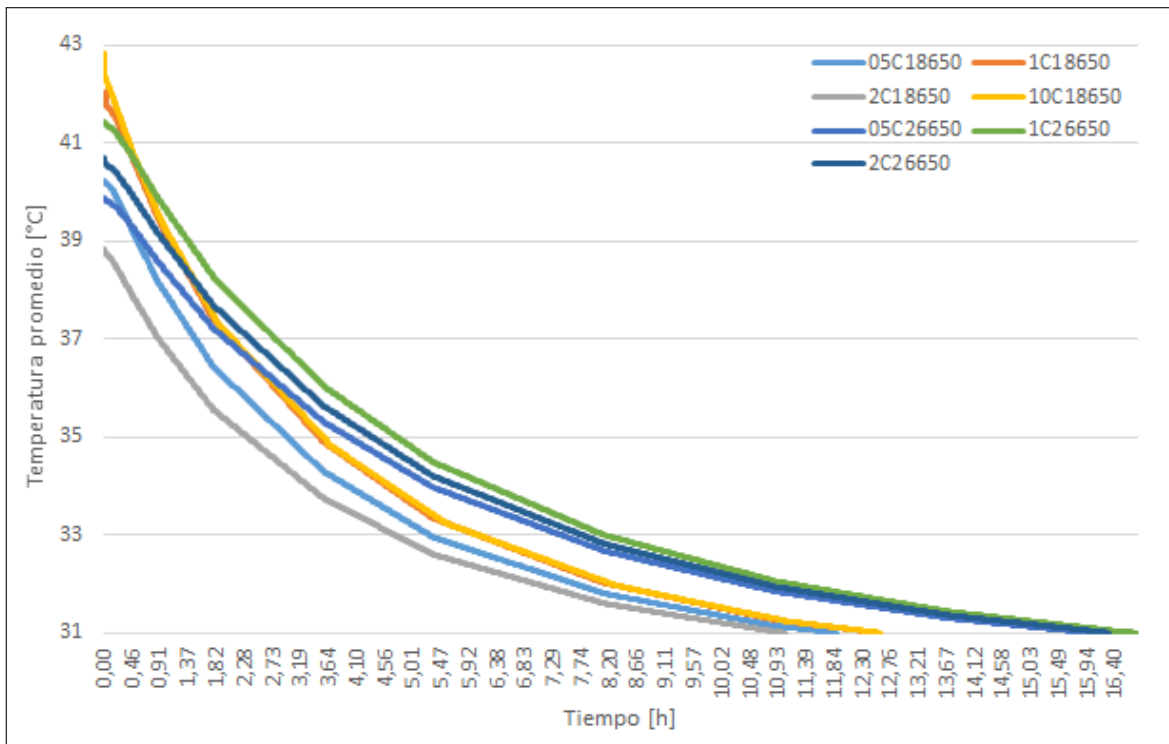


Figura 4.18: Variación de la temperatura máxima en las celdas durante la expulsión de calor para el X40 como medio de enfriamiento y $T_0 = 30^\circ\text{C}$.

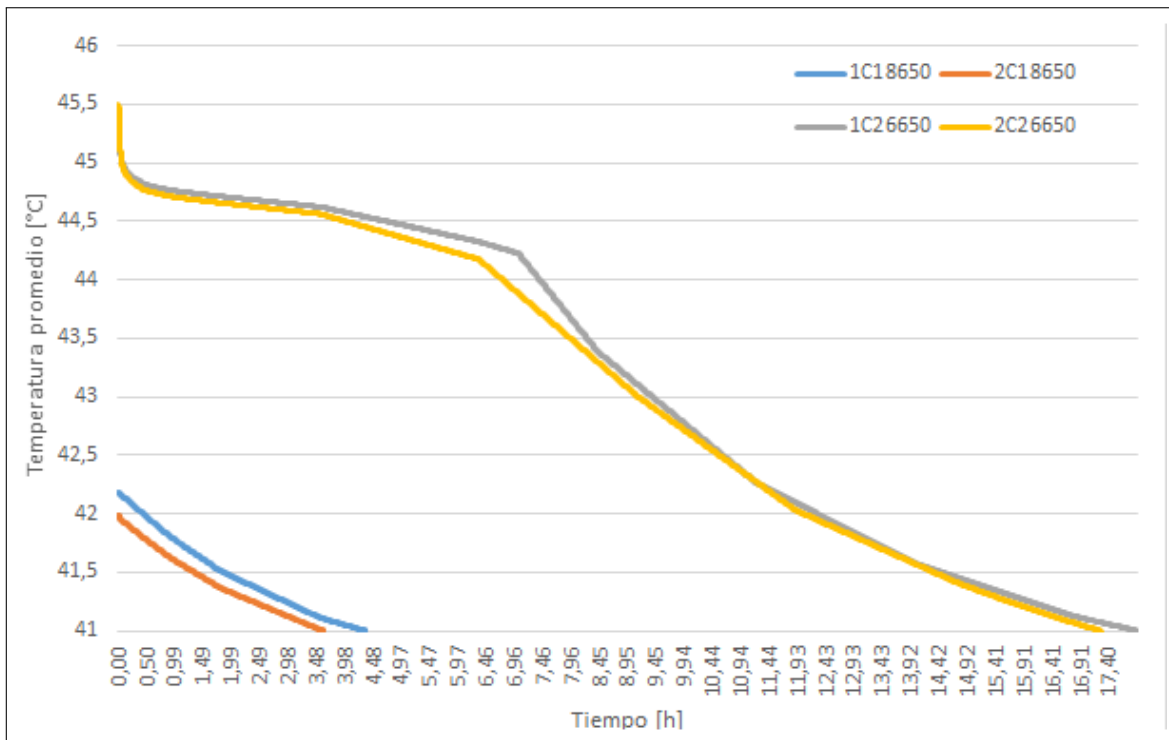


Figura 4.19: Variación de la temperatura máxima en las celdas durante la expulsión de calor para el X40 como medio de enfriamiento y $T_0 = 40^\circ\text{C}$.

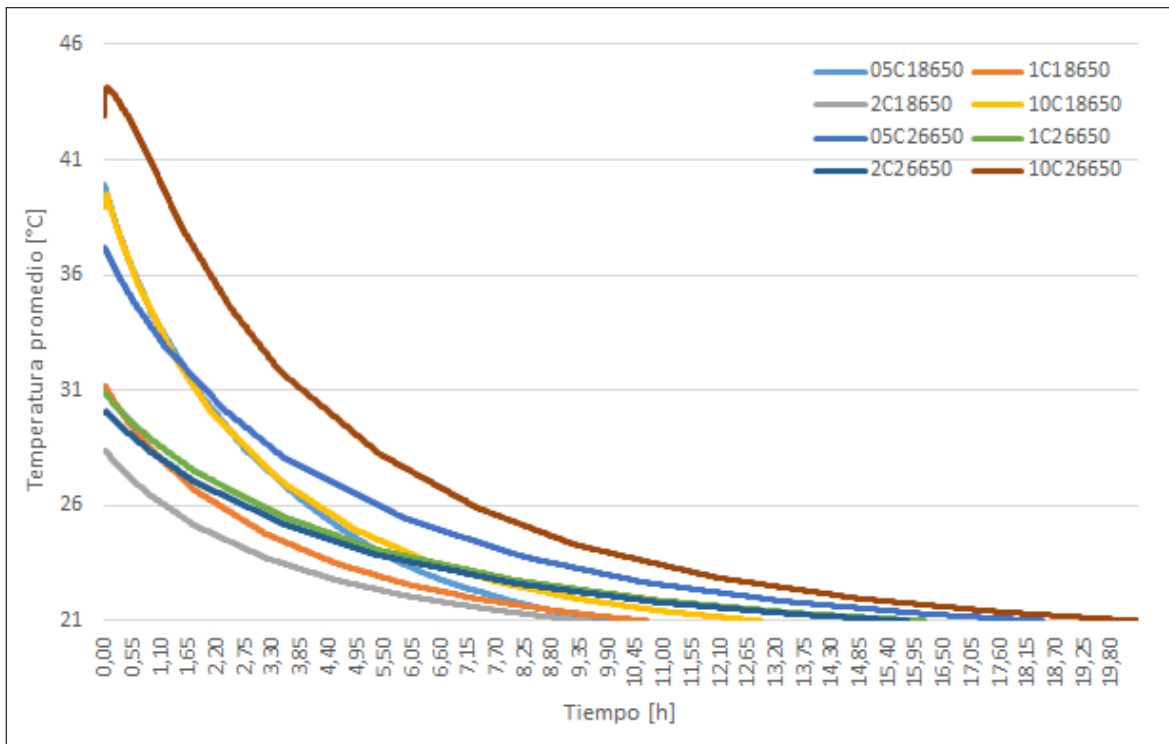


Figura 4.20: Variación de la temperatura promedio del PCM durante la expulsión de calor para el X40 como medio de enfriamiento y $T_0 = 20^\circ\text{C}$.

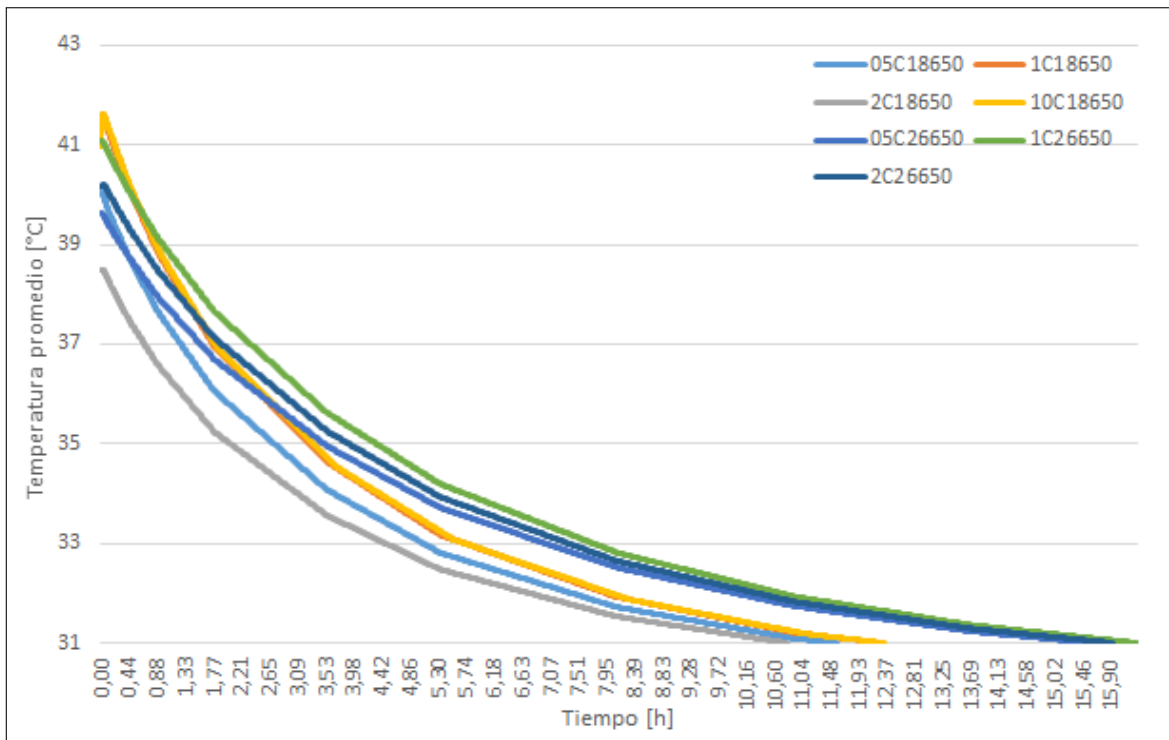


Figura 4.21: Variación de la temperatura promedio del PCM durante la expulsión de calor para el X40 como medio de enfriamiento y $T_0 = 30^\circ\text{C}$.

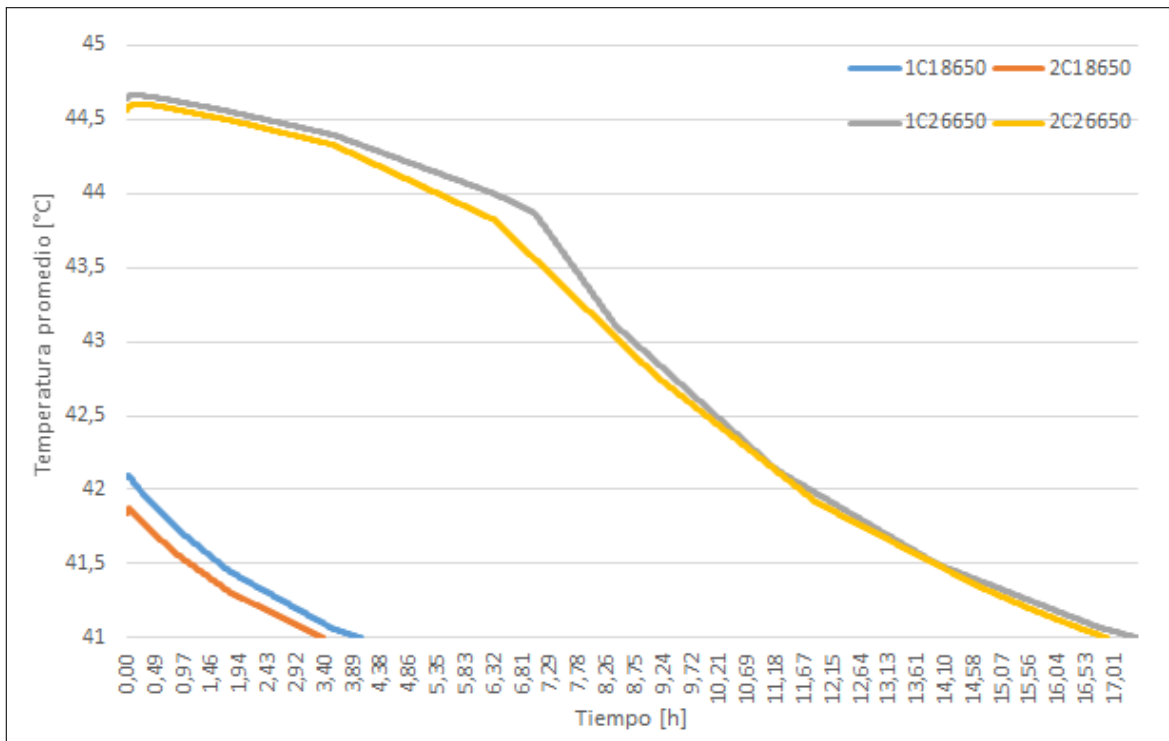


Figura 4.22: Variación de la temperatura promedio del PCM durante la expulsión de calor para el X40 como medio de enfriamiento y $T_0 = 40^\circ\text{C}$.

4.3. Thermal runaway

4.3.1. Parámetros FEM

Mallado

Debido al carácter 3D del problema, es necesario determinar una malla óptima. Las mallas a comparar son las predeterminadas por COMSOL y recomendadas para problemas de transferencia de calor en sólidos. Se comienza con la malla más fina, *extremely fine* y luego se agranda el tamaño de elemento, considerando *extra fine*, *finer* y *fine*. Estas mallas se muestran en la Figura 4.23

Para este proceso no se considera PCM alrededor de la celda.

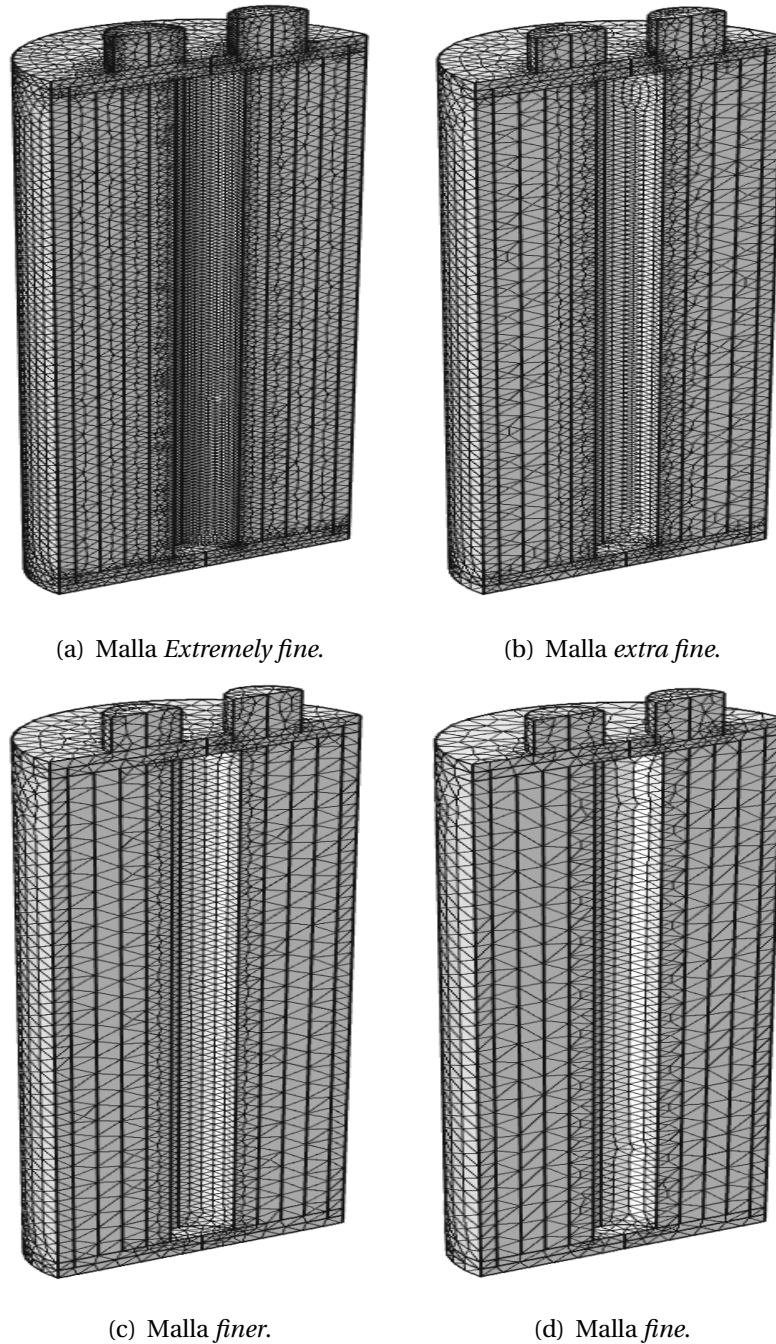


Figura 4.23: Mallas más finas.

La Tabla 4.22 muestra los resultados obtenidos para las simulaciones. La malla más fina tarda más de 30 minutos en entregar el resultado, mientras que la malla *finer*, tarda menos de 60 minutos, con diferencias menores a la décima de grado celsius. La malla *fine* tarda un poco más de 6 minutos pero las diferencias son mayores al grado celsius.

Por lo tanto, se escoge la malla *finer* para el problema.

Tabla 4.22: Comparación entre mallas 3D.

	Número Elem.	Calidad mín.	Calidad prom.	Vol. elemento prom. [mm ³]	Tmax [°C]	Tmin [°C]	Δt_c [s]
Extremely fine	148843	0.05550	0.7493	0.053237	158.86	157.41	2731
Extra fine	55158	0.08060	0.7011	0.143738	158.89	157.40	1261
Finer	27619	0.09359	0.7321	0.286687	158.88	157.39	783
Fine	16412	0.07011	0.6902	0.482086	158.10	156.22	533

Δt_c : tiempo de cómputo. (Fuente: Elaboración propia).

Paso temporal

Al igual que para el proceso de descarga, se busca el paso temporal que sea el óptimo. En este caso, se prueban: 1[s], 10[s], 30[s] y 60 [s].

Tabla 4.23: Comparación entre pasos temporales. (Fuente: Elaboración propia).

Paso temporal	60 [s]	30 [s]	10 [s]	1 [s]
Tmin [°C]	157.40	157.39	157.39	157.39
Tmax [°C]	158.88	158.88	158.88	158.88
Δt_c [s]	41	52	108	738

Δt_c : tiempo de cómputo. (Fuente: Elaboración propia).

El paso temporal tiene escasa influencia en las temperaturas obtenidas, por lo que se escoge los 10[s].

4.3.2. Distribuciones de temperatura

En las Figuras 4.24 y 4.25 se observa la evolución de la temperatura a medida que el proceso de *thermal runaway* avanza. Desde los 90°C hasta los 120°C, se tiene aproximadamente entre 1 y 5 [W] de calor. A partir de los 110°C, comienza la reacción entre el solvente y el ánodo generando más de 5 [W] de calor. A partir de los 150°C, el factor exponencial del calor generado por esta reacción se vuelve predominante, logrando flujos de calor hasta 10 veces superiores, provocando el fallo catastrófico que se quiere evitar.

Evidentemente, sin un medio de enfriamiento, la celda supera la barrera de los 150°C, iniciando reacciones más severas

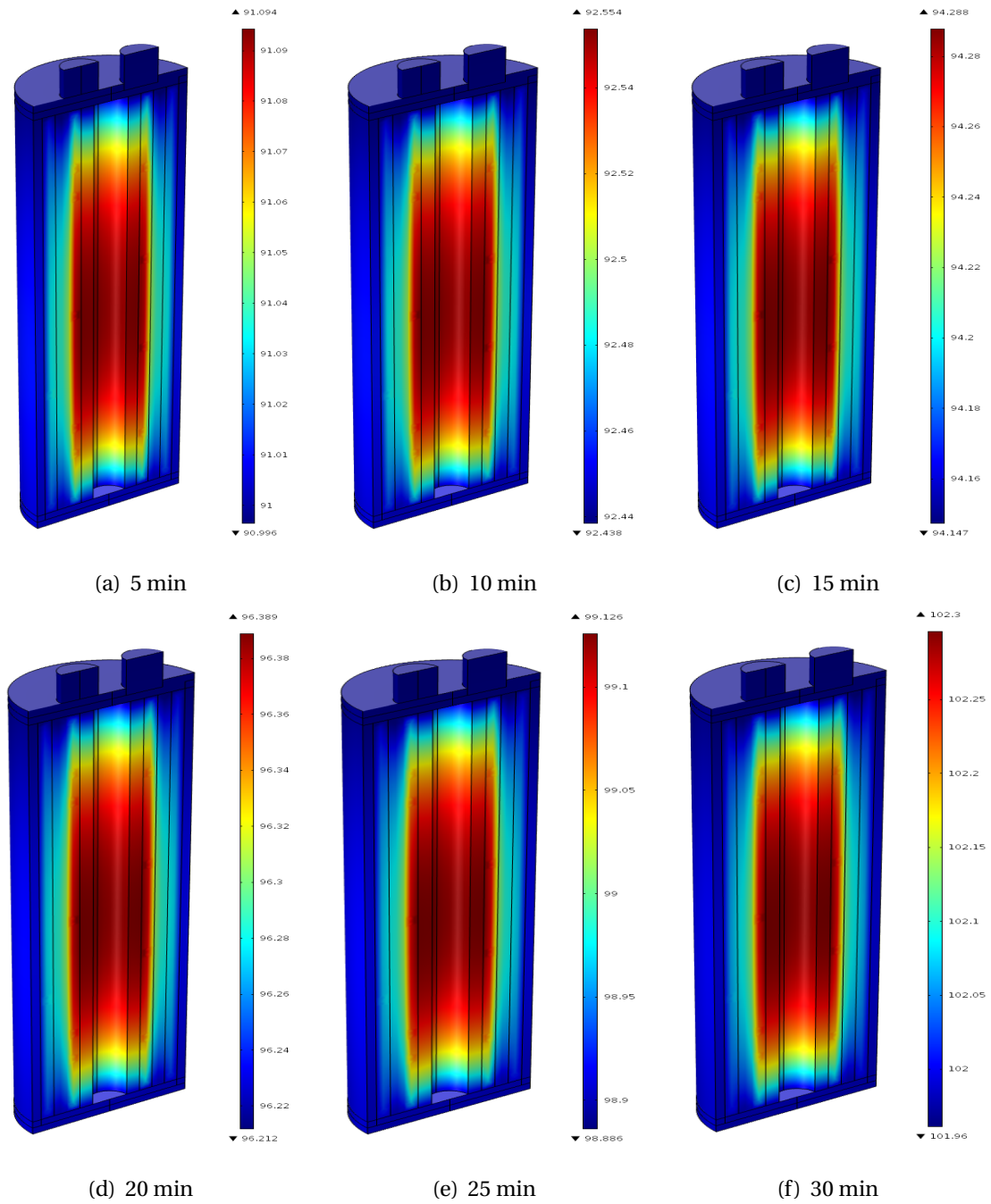


Figura 4.24: Evolución de la temperatura durante el *thermal runaway* desde los 5 hasta los 30 [min].

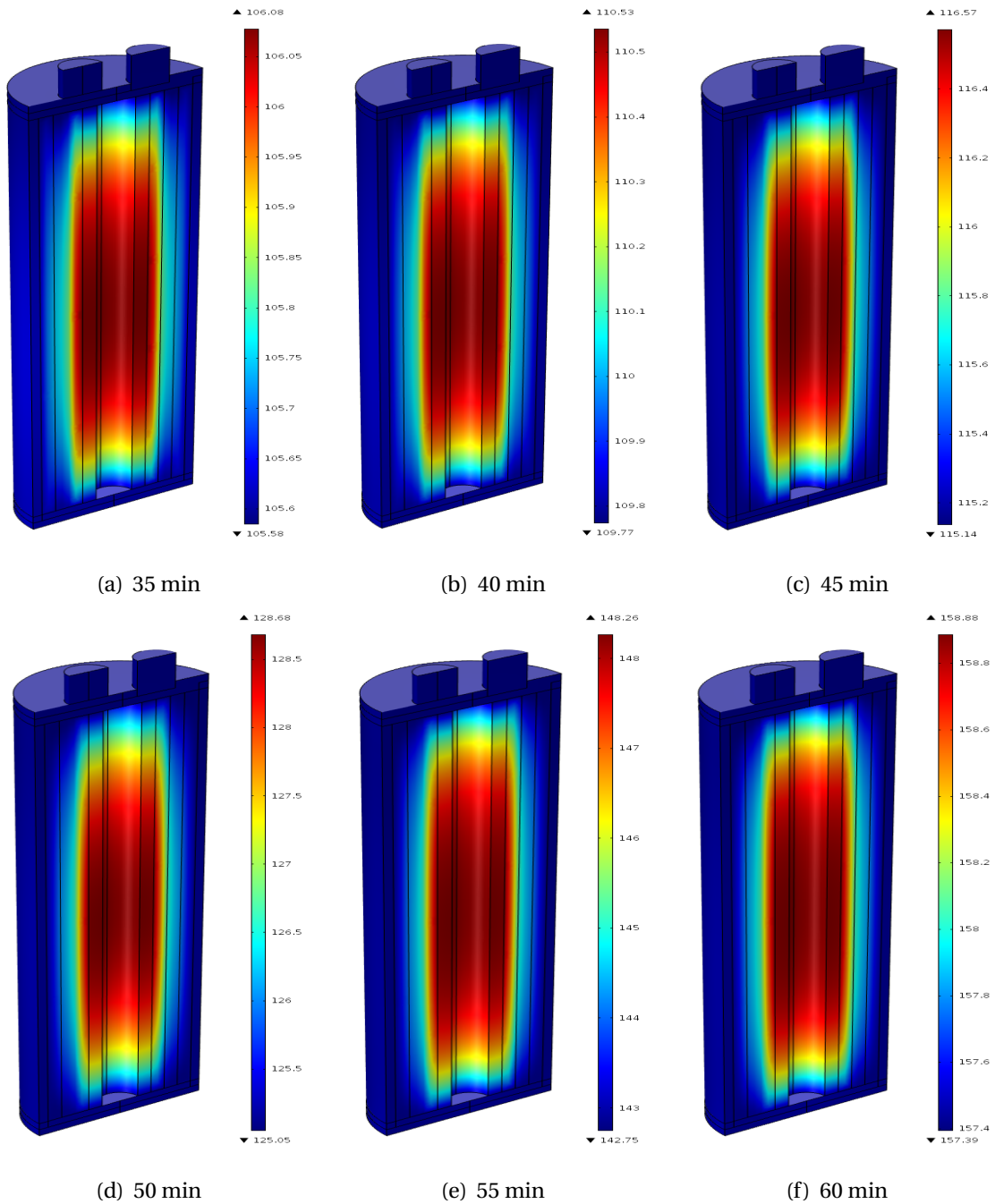


Figura 4.25: Evolución de la temperatura durante el *thermal runaway* desde los 35 hasta los 60 [min].

Cuando se considera el uso de un PCM para enfriar el sistema, la celda no entra en *thermal runaway* durante la primera hora. Como el calor que se genera al interior de la celda es función de la temperatura, si se mantiene lo suficientemente frío, las reacciones más severas no comenzarán y se podrá controlar, tal como se muestra en las Figuras 4.26 y 4.27.

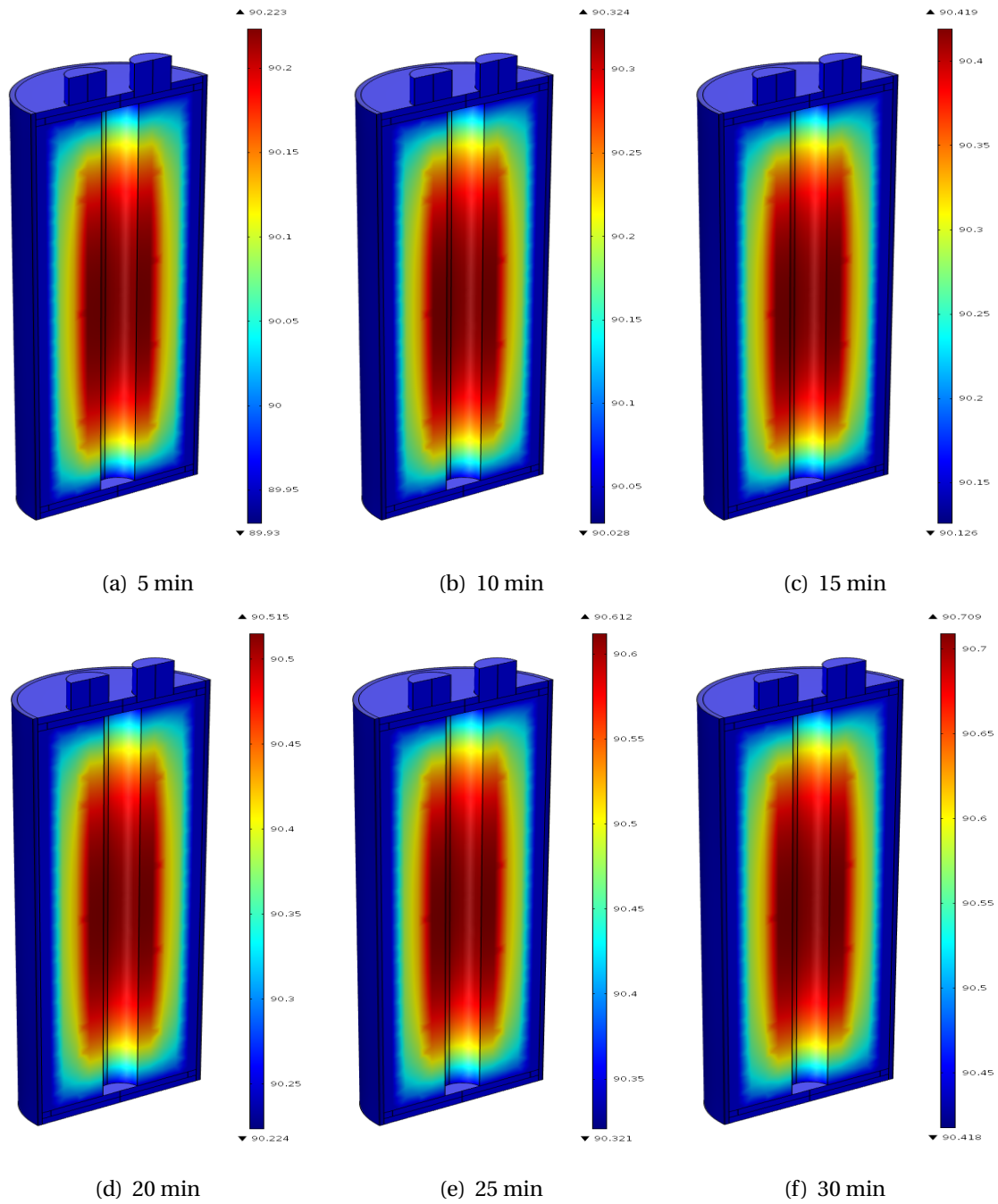


Figura 4.26: Evolución de la temperatura durante el *thermal runaway* desde los 5 hasta los 30 [min].

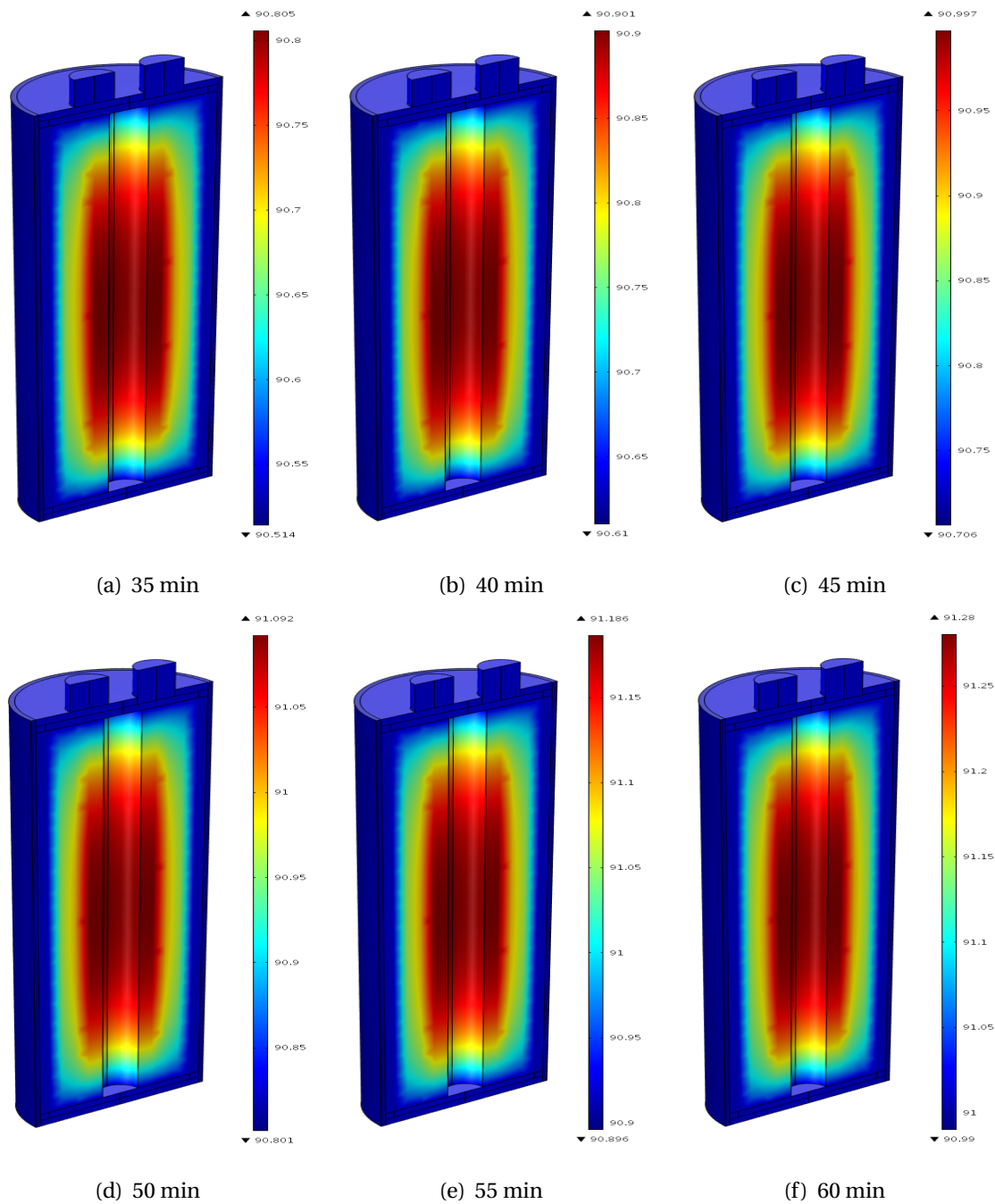


Figura 4.27: Evolución de la temperatura durante el *thermal runaway* desde los 35 hasta los 60 [min].

Conclusiones

El X40 demuestra efectividad en el control de la temperatura durante el proceso de descarga.

De las 144 combinaciones posibles entre las celdas, espesores de PCM, tasas de descarga y temperaturas iniciales, en el 71 % de los casos el X40 fue capaz de mantener la temperatura bajo los 50°C. De acuerdo a la Tabla 4.12, para la celda 18650, solo cuando la temperatura inicial es 40°C y las tasas de descarga son 0.5C y 10C, el PCM no es capaz de bajar la temperatura a menos de 50°C. Sin embargo, con un espesor de PCM un poco mayor este sería capaz de contener la temperatura. Para el caso de la celda 26650, de acuerdo a la Tabla 4.13, cuando la temperatura inicial es 30°C y la tasa de descarga 10C, y cuando la temperatura inicial es 40°C y la tasa de descarga 0.5C, el PCM tampoco es capaz de controlar la temperatura. En ambos casos un espesor de PCM ligeramente mayor podría mantener la temperatura bajo los 50°C. Por otro lado, cuando la temperatura inicial es 40°C y la tasa de descarga 10C, la temperatura máxima final a los 2 [mm] de espesor de PCM es 67.62°C, por lo que el espesor necesario para contener la temperatura volvería impráctico este método. Finalmente se puede concluir que en casi todas las condiciones de operación es posible controlar la temperatura.

El NPG también es efectivo en el control de la temperatura durante el proceso de descarga.

De las 144 combinaciones posibles entre las celdas, espesores de PCM, tasas de descarga y temperaturas iniciales, en el 80 % de los casos el X40 fue capaz de mantener la temperatura bajo los 50°C. La Tabla 4.14 muestra que para la celda 18650, solo cuando la temperatura inicial es 40°C y la tasa de descarga 10C, el PCM no es capaz de controlar la temperatura. Al igual que para X40, un espesor de PCM un poco mayor a 2 [mm] sería capaz de contener la temperatura. La Tabla 4.19, señala que con una tasa de descarga de 10C, para todas las temperaturas iniciales el PCM no puede controlar la temperatura. No obstante, cuando la temperatura inicial

es 20°C, si sería posible controlar la temperatura con un espesor de PCM mayor. Para los otros 2 casos, con temperaturas finales de 57.86°C y 66.01°C, el método se volvería impráctico. Por último, se puede concluir que el NPG es capaz de controlar la temperatura en la mayoría de las condiciones de operación.

Tanto el X40 como el NPG logran que la distribución de temperatura sea homogénea. Las Tabla 4.16, 4.17, 4.18 y 4.19 muestran que en 285 de los 288 casos, la diferencia máxima de temperatura durante el proceso de descarga es menor a los 5°C impuestos como máximo aceptable. En los tres casos en los que no fue capaz de cumplir el objetivo, la diferencia fue menor a 5.4°C, por lo que se puede concluir que los PCM son efectivos en mantener la diferencia de temperatura en rangos aceptables. Esto era lo esperado, pues cada una de las celdas está rodeado por una cantidad similar de PCM, y la conducción ocurre bajo las mismas condiciones. El principal factor que determina la diferencia de temperatura es la tasa de descarga. Cuando la tasa de descarga es 10C, se genera mucho calor en poco tiempo, lo que provoca que en materiales con baja difusividad térmica como el caso de los PCM, la temperatura aumente localmente ayudando a aumentar la diferencia de temperatura entre las celdas exteriores e interiores.

El calor generado depende fundamentalmente del estado de carga y de la tasa de descarga. Para bajas tasas de descarga, el calor predominante es el por cambio de entropía, que depende mayoritariamente del estado de carga, mientras que a mayores tasas de descarga, el calor predominante es el de Joule. Para 0.5C, Q_S representa en promedio entre el 80% y 97% del total, para un estado de carga entre 0 y 1. Para 1C, entre el 73% y 91% del total. Para 2C, entre el 25% y el 71%. Por último, para 10C, entre el 0.1% y el 1%.

La tasa de descarga que produce temperaturas máximas más altas es 10C. Debido a la baja difusividad térmica del PCM, a altas tasas de descarga, el calor no logra transmitirse lo suficientemente rápido a través de él, lo que conlleva a que el material más alejado de las celdas no cambie de fase por completo e incluso en algunos casos, ni siquiera llegue a la temperatura de cambio fase, mientras que el material que se encuentra más cercano a las celdas ya ha cambiado de fase y sigue subiendo de temperatura. Un punto de enfoque para mejorar el método de enfriamiento a través de PCM, es mejorar la conductividad térmica del material.

La tasa de descarga 0.5C también produce temperaturas máximas altas. Si se observa las Figuras 4.9, 4.10, 4.11 y 4.11, los calores totales para las tasas de descarga 0.5C, 1C y 2C, son del mismo orden de magnitud, por lo que si el calor se genera por más tiempo, producirá temperaturas finales más altas. Este es el caso de 0.5C, que genera calor el doble de tiempo que 1C y el cuádruple que 2C. En las Tablas 4.5, 4.9, 4.7 y 4.11, puede notarse que el calor total que se genera es superior para la tasa 0.5C en la totalidad de los casos, lo que explica las temperaturas finales más altas.

El tiempo que tarda la expulsión del calor guardado en el sistema utilizando solo convección natural es demasiado prolongado. Entre 10 y 20 horas en la mayoría de los casos tarda el sistema en evacuar el calor que se almacena durante el proceso de descarga y retornar al estado inicial si solo se considera la convección natural, como se observa en las Tablas 4.20 y 4.21. Esto se debe a la baja conductividad que presenta el PCM que dificulta la difusión del calor desde el interior del sistema a los bordes, y a que la capacidad calórica volumétrica es alta que genera la necesidad de mayores flujos de calor para producir cambios de temperatura. Aumentar la conductividad térmica del material resulta primordial para disminuir los tiempos de enfriamiento, pues una capacidad calórica volumétrica alta es necesaria para almacenar calor durante la descarga de la celda. Otro método que puede ser eficaz es utilizar convección forzada para acelerar la expulsión.

El calor generado durante el *thermal runaway* depende de la temperatura, el tiempo transcurrido en la reacción y la cantidad de reactantes. En una primera etapa, el tiempo de reacción predomina aumentando el calor generado, lo que aumenta la temperatura, que a su vez aumenta el calor generado y forma el feedback positivo. Sin embargo, al reaccionar los componentes dentro de la celda, estos tienden a formar compuestos inertes que eventualmente dejan de hacerlo, lo que induce una segunda etapa de decaimiento de la generación de calor.

El *thermal runaway* puede ser controlado en etapas tempranas por un PCM. Sin un medio de enfriamiento, la celda eventualmente entra en *thermal runaway* al alcanzar los 150°C, que es cuando el calor generado crece exponencialmente, tal como se muestra en las Figuras 4.24 y 4.25, en donde a los 60 [min] se alcanza los 158°C. Sin embargo, al utilizar el X95 para rodear

la celda, la temperatura es controlada desde un inicio retardando el aumento en la generación de calor, anulando el efecto de feedback positivo. Las Figuras 4.26 y 4.27 muestran que en la misma cantidad de tiempo, la temperatura máxima alcanza los 92°C, solo 2 grados por sobre la temperatura inicial, por lo que se puede concluir que para el caso analizado de inicio de thermal runaway (temperatura de 90°C), un PCM adecuado puede controlar la temperatura y retardar la aparición de las reacciones más severas, dando una ventana de tiempo evitar fallas mayores.

Bibliografía

- [1] S. Chen, C. Wan, and Y. Wang, "Thermal analysis of lithium-ion batteries," *Journal of Power Sources*, 2005.
- [2] "Ihs." <https://technology.ihs.com/389363/>.
- [3] R. E. Williford, V. V. Viswanathan, and J.-G. Zhang, "Effects of entropy changes in anodes and cathodes on the thermal behavior of lithium ion batteries," *Journal of Power Sources*, 2009.
- [4] T. M. Bandhauera, S. Garimellaa, and T. F. Fullerb, "A critical review of thermal issues in lithium-ion batteries," *Journal of The Electrochemical Society*, 2011.
- [5] P. Harrop and R. Das, "Hybrid & pure electric vehicles for land, water & air 2013-2023: Forecasts, technologies, players," tech. rep., IDTechEx, 2013.
- [6] Z. Rao and S. Wang, "A review of power battery thermal energy management," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2011.
- [7] N. Javani, I. Dincer, G. Naterer, and B. Yilbas, "Heat transfer and thermal management with pcms in a li-ion battery cell for electric vehicles," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2014.
- [8] R. Sabbah, R. Kizilel, J. Selman, and S. Al-Hallaj, "Active (air-cooled) vs. passive (phase change material) thermal management of high power lithium-ion packs: Limitation of temperature rise and uniformity of temperature distribution," *Journal of Power Sources*, 2008.
- [9] T. Eriksson, *LiMn₂O₄ as a Li-Ion Battery Cathode*. PhD thesis, Uppsala University, 2001.

- [10] S. Chacko, *Numerical analysis of unsteady heat transfer for thermal management*. PhD thesis, University of Warwick, 2012.
- [11] A. W. Golubkov, D. Fuchs, J. Wagner, H. Wiltsche, C. Stangl, G. Fauler, G. Voitic, A. Thaler, and V. Hackere, "Thermal-runaway experiments on consumer li-ion batteries with metal-oxide and olivin-type cathodes," *RSC Advances*, 2014.
- [12] R. Spotnitz and J. Franklin, "Abuse behavior of high-power, lithium-ion cells," *Journal of Power Sources*, 2003.
- [13] A. A. Pesaran, A. Vlahinos, and S. D. Burch, "Thermal performance of ev and hev battery modules and packs," *Proceedings of the 14th International Electric Vehicle Symposium*, 1997.
- [14] A. Sharma, V. Tyagi, C. Chen, and D. Buddhi, "Review on thermal energy storage with phase change materials and applications," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2007.
- [15] M. M. Farid, A. M. Khudhair, S. A. K. Razack, and S. Al-Hallaj, "A review on phase change energy storage: materials and applications," *Energy Conversion and Management*, 2003.
- [16] M. K. M. M.T. Syed, S. Kumar, "Thermal storage using form-stable phase-change materials," *ASHRAE Journal*, 1997.
- [17] A. A. Pesaran, "Battery thermal management in evs and hevs: Issues and solutions," *Advance Automotive Battery Conference*, 2001.
- [18] P. Nelson, D. Dees, K. Amine, and G. Henriksen, "Modeling thermal management of lithium-ion pngv batteries," *Journal of Power Sources*, 2002.
- [19] M. S. Wu, K. H. Liu, Y. Y. Wang, and C. C. Wan, "Heat dissipation design for lithium-ion batteries," *Journal of Power Sources*, 2002.
- [20] Y. Chen and J. Evans, "Heat transfer phenomena in lithium/polymer electrolyte batteries for electric vehicle applications," *Journal of Electrochemical Society*, 1993.
- [21] S. A. Khateeb, M. M. Farid, J. R. Selman, and S. Al-Hallaj, "Design and simulation of a lithium-ion battery with a phase change material thermal management system for an electric scooter," *Journal of Power Sources*, 2003.

- [22] M. N. K. F. T. A. K. Onda, T. Ohshima, "Thermal behavior of small lithium-ion battery during rapid charge and discharge cycles," *Journal of Power Sources*, 2005.
- [23] Y. Kim, S. Mohan, J. B. Siegel, and A. G. Stefanopoulou, "Maximum power estimation of lithium-ion batteries accounting for thermal and electrical constraints," *Proceedings of the ASME 2013 Dynamic Systems and Control Conference*, 2013.
- [24] R. S. G. Kima, A. Pesaran, "A three-dimensional thermal abuse model for lithium-ion cells," *Journal of Power Sources*, 2007.
- [25] A. B. J. D. T.D. Hatchard, D.D. MacNeil, "Thermal model of cylindrical and prismatic lithium-ion cells," *Journal of Electrochemical Society*, 2001.
- [26] V. Srinivasan and C. Wang, "Analysis of electrochemical and thermal behavior of li-ion cells," *Journal of Electrochemical Society*, 2003.
- [27] A. Sar, C. Alkan, and A. Bicer, "Development, characterization, and latent heat thermal energy storage properties of neopentyl glycol-fatty acid esters as new solid-liquid pcms," *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2013.
- [28] "Pcm products ltd." <http://www.pcmproducts.net/files/PlusICE%20Range-2013.pdf>.
- [29] "Sony us18650vtc3." <http://www.batterysupports.com/sony-us18650vtc3-high-drain-30a-rechargeable-lithium-lion-18650-p-20.html>.
- [30] "Sony us26650vt." <http://www.avacom.cz/Datasheety/Sony/US26650VT.pdf>.
- [31] F. P. Incropera, *Fundamentos de Transferencia de Calor*. Prentice Hall, Mexico, 4ta ed., 1999.
- [32] J. F. R. Spotnitz, "Abuse behavior of high-power, lithium-ion cells," *Journal of Power Sources*, 2002.

Apéndices

Evolución de temperatura durante descargas

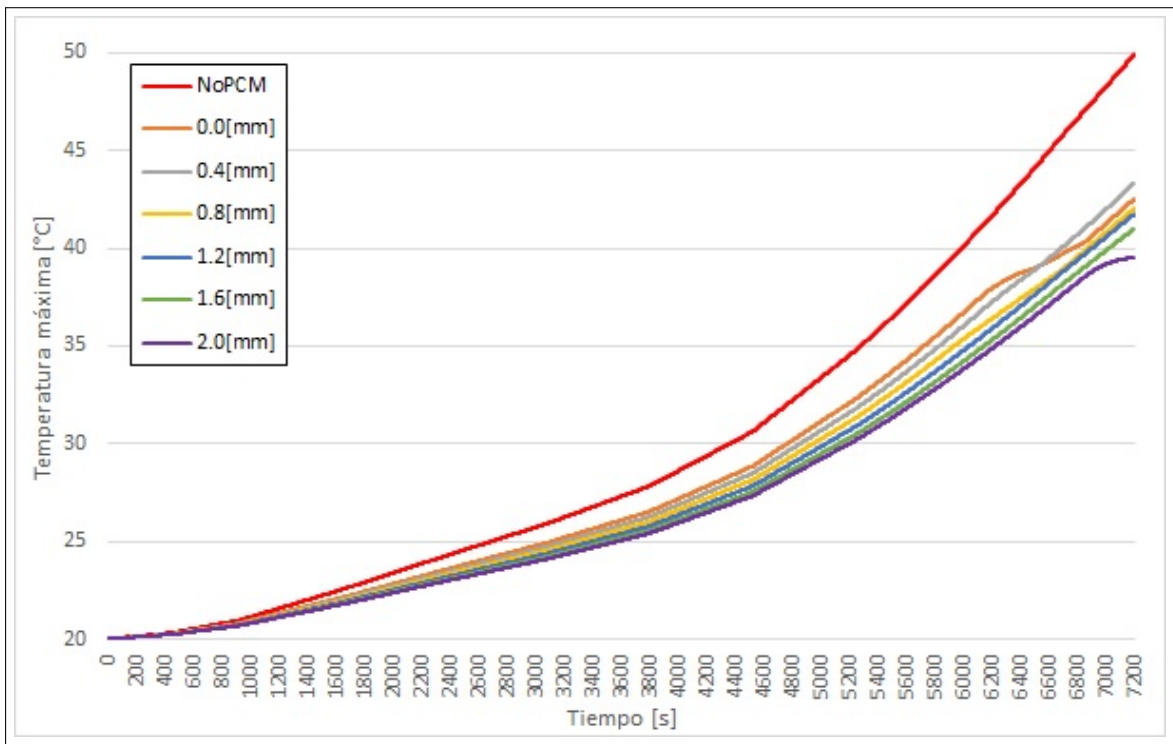


Figura A.1: Evolución de la temperatura máxima de las celdas, para una celda 18650, tasa de descarga 0.5C y temperatura inicial 20°C y X40 como PCM.

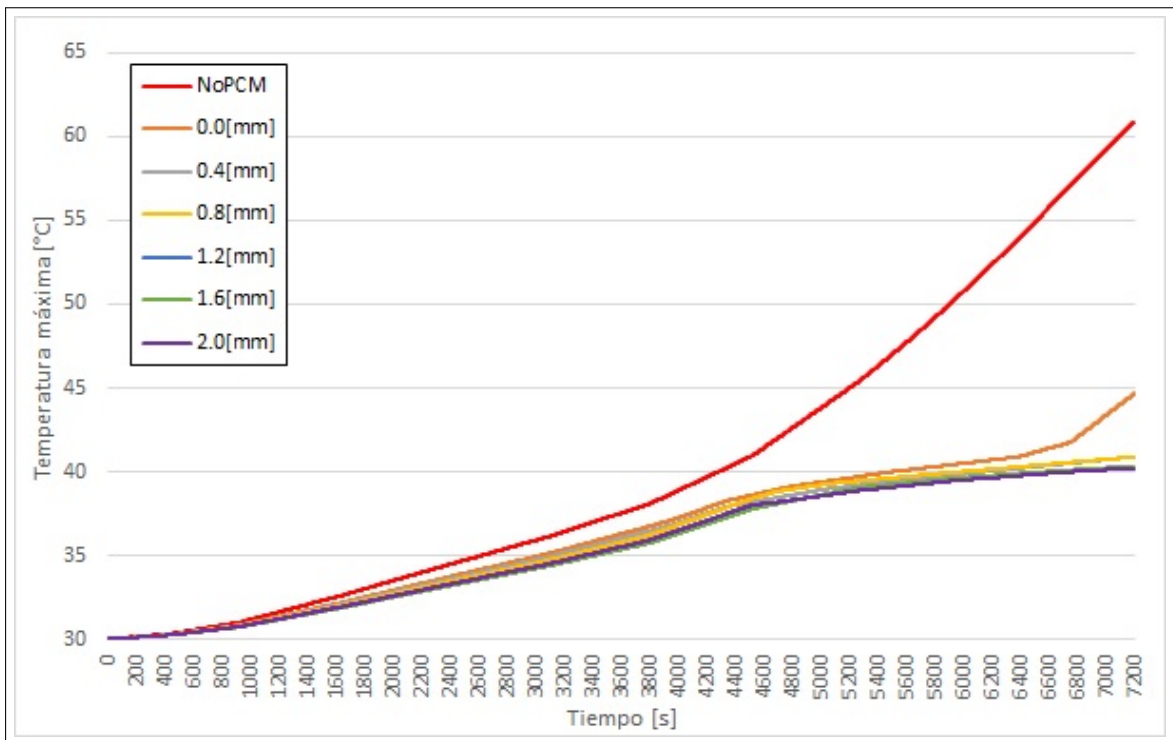


Figura A.2: Evolución de la temperatura máxima de las celdas, para una celda 18650, tasa de descarga 0.5C y temperatura inicial 30°C y X40 como PCM.

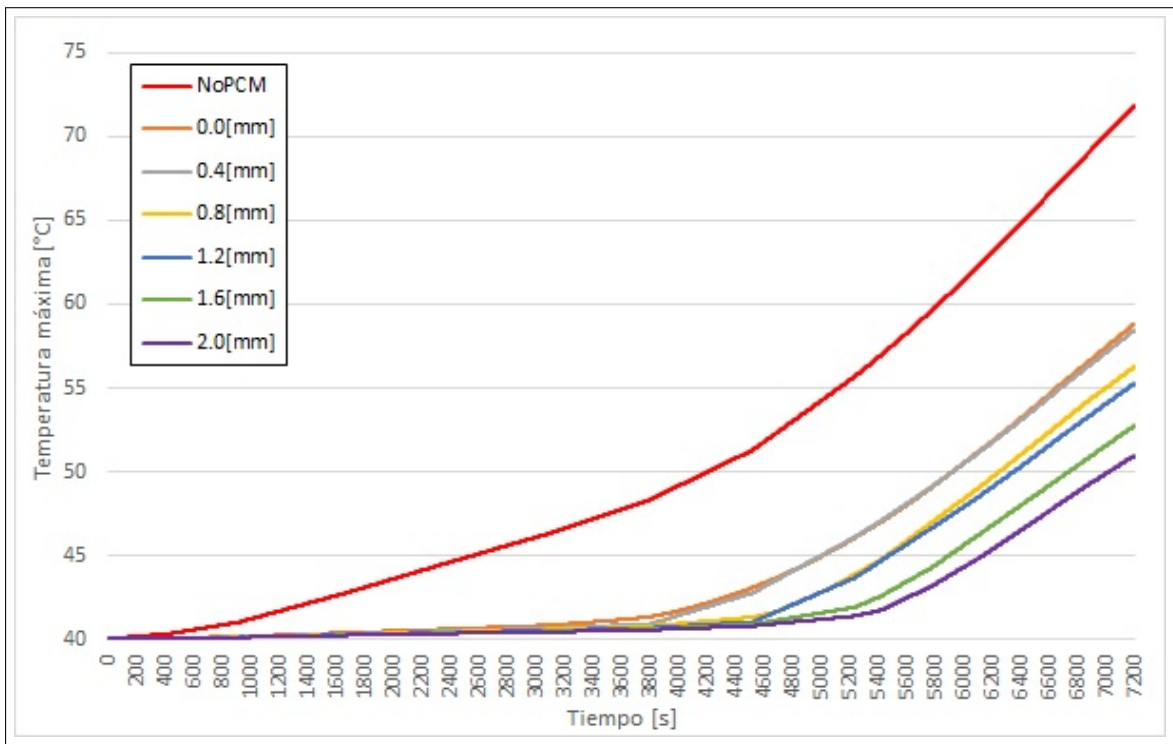


Figura A.3: Evolución de la temperatura máxima de las celdas, para una celda 18650, tasa de descarga 0.5C y temperatura inicial 40°C y X40 como PCM.

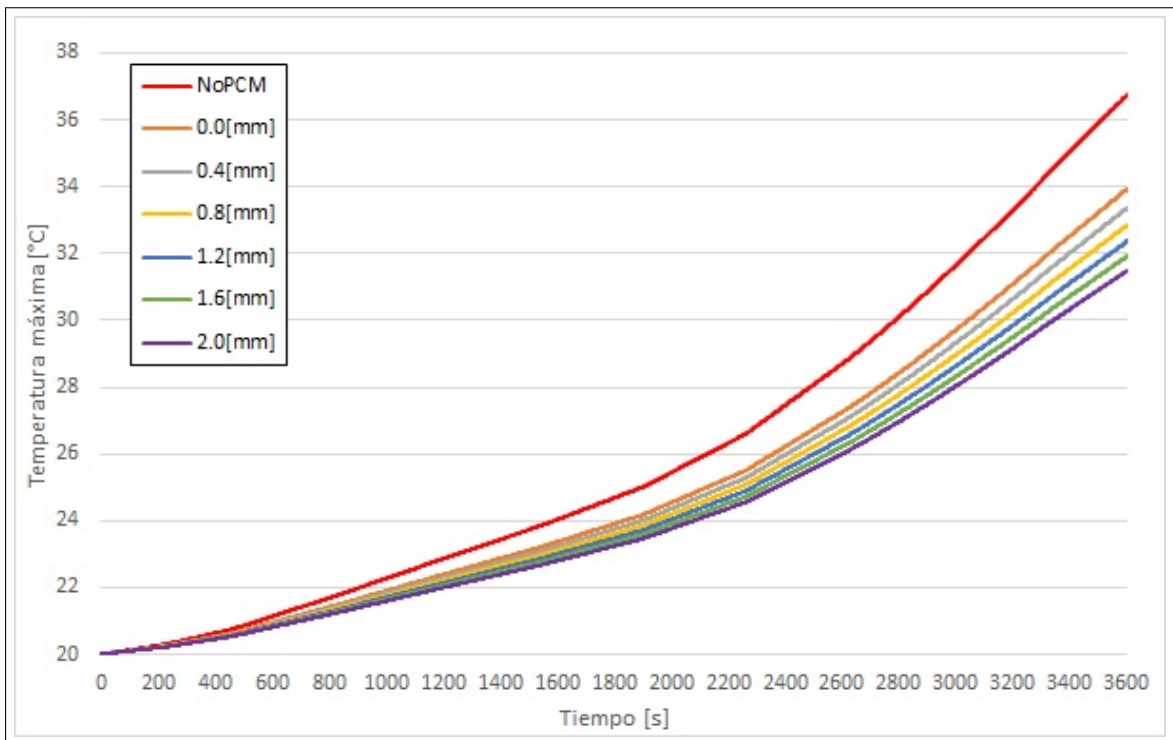


Figura A.4: Evolución de la temperatura máxima de las celdas, para una celda 18650, tasa de descarga 1C y temperatura inicial 20°C y X40 como PCM.

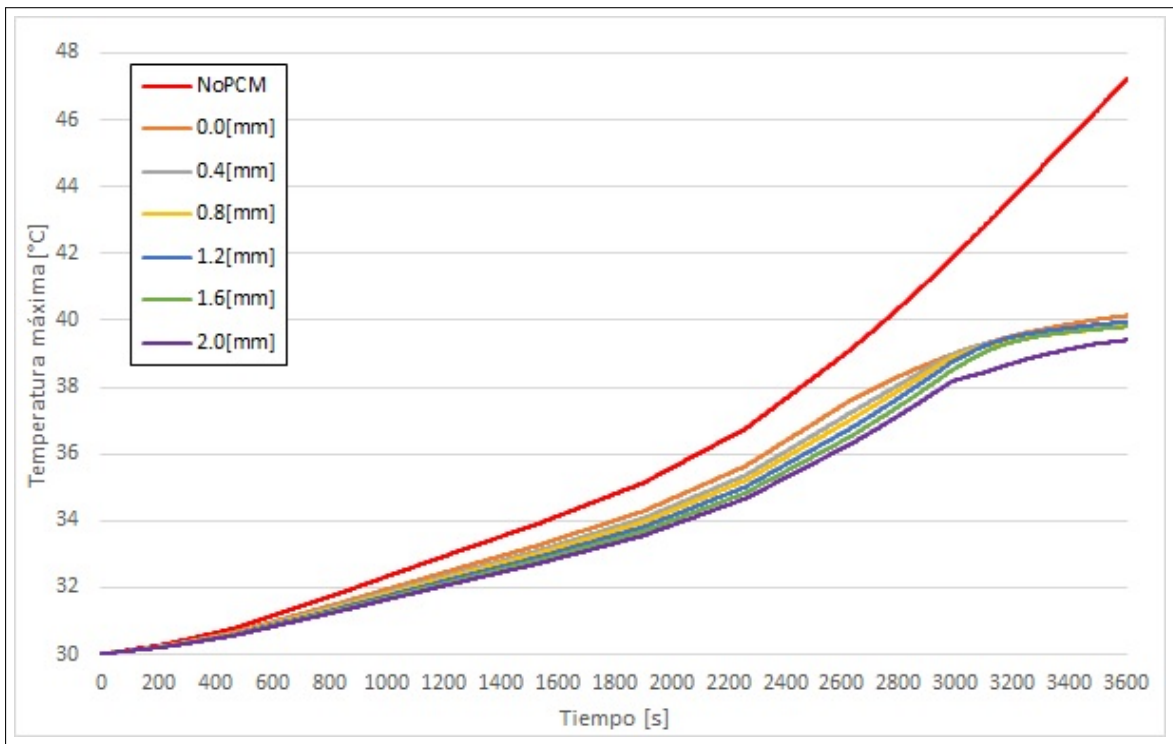


Figura A.5: Evolución de la temperatura máxima de las celdas, para una celda 18650, tasa de descarga 1C y temperatura inicial 30°C y X40 como PCM.

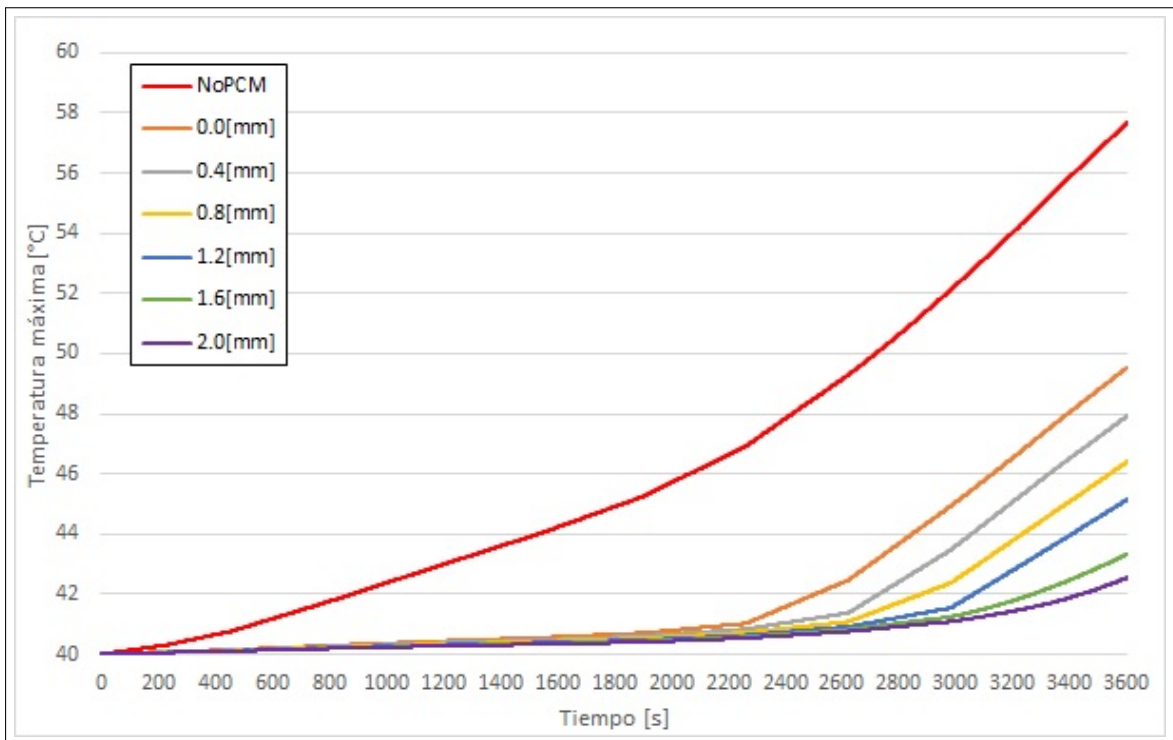


Figura A.6: Evolución de la temperatura máxima de las celdas, para una celda 18650, tasa de descarga 1C y temperatura inicial 40°C y X40 como PCM.

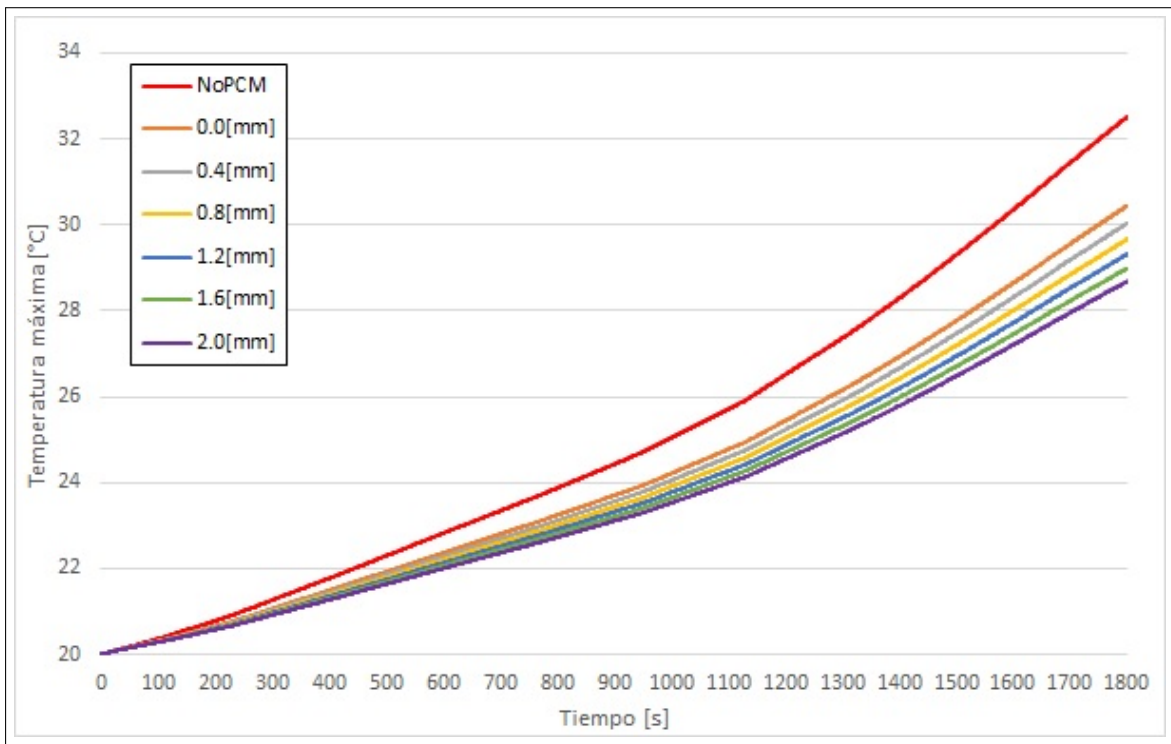


Figura A.7: Evolución de la temperatura máxima de las celdas, para una celda 18650, tasa de descarga 2C y temperatura inicial 20°C y X40 como PCM.

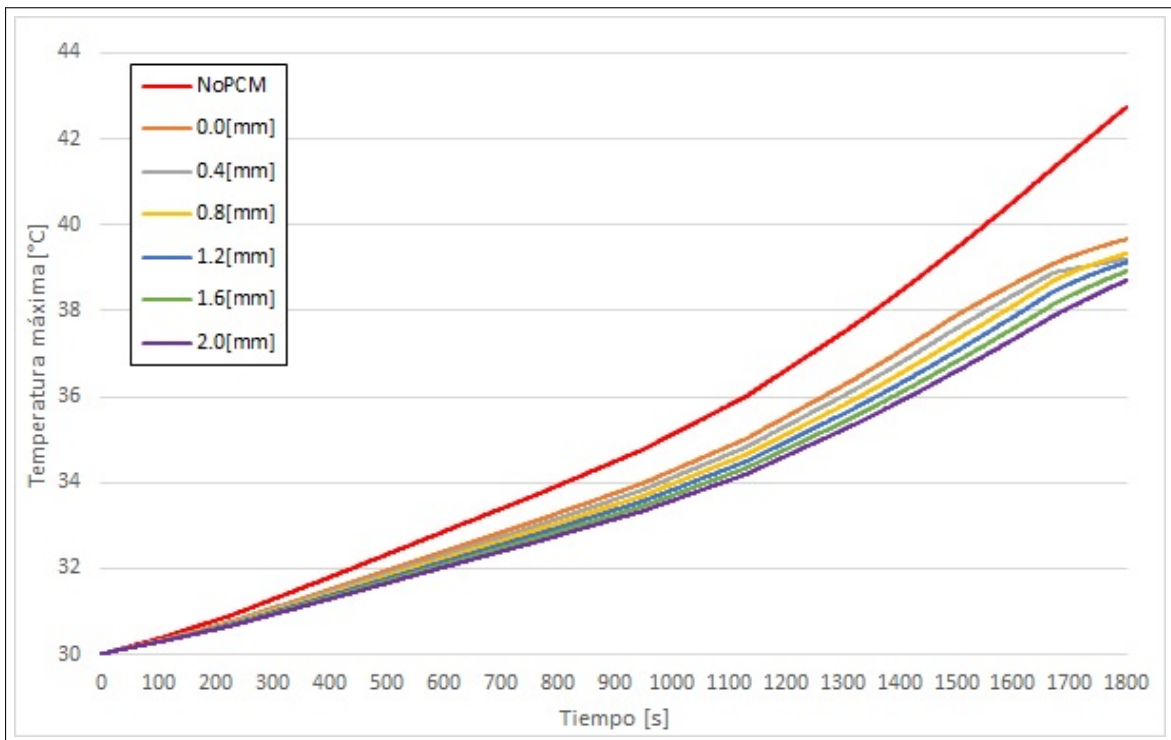


Figura A.8: Evolución de la temperatura máxima de las celdas, para una celda 18650, tasa de descarga 2C y temperatura inicial 30°C y X40 como PCM.

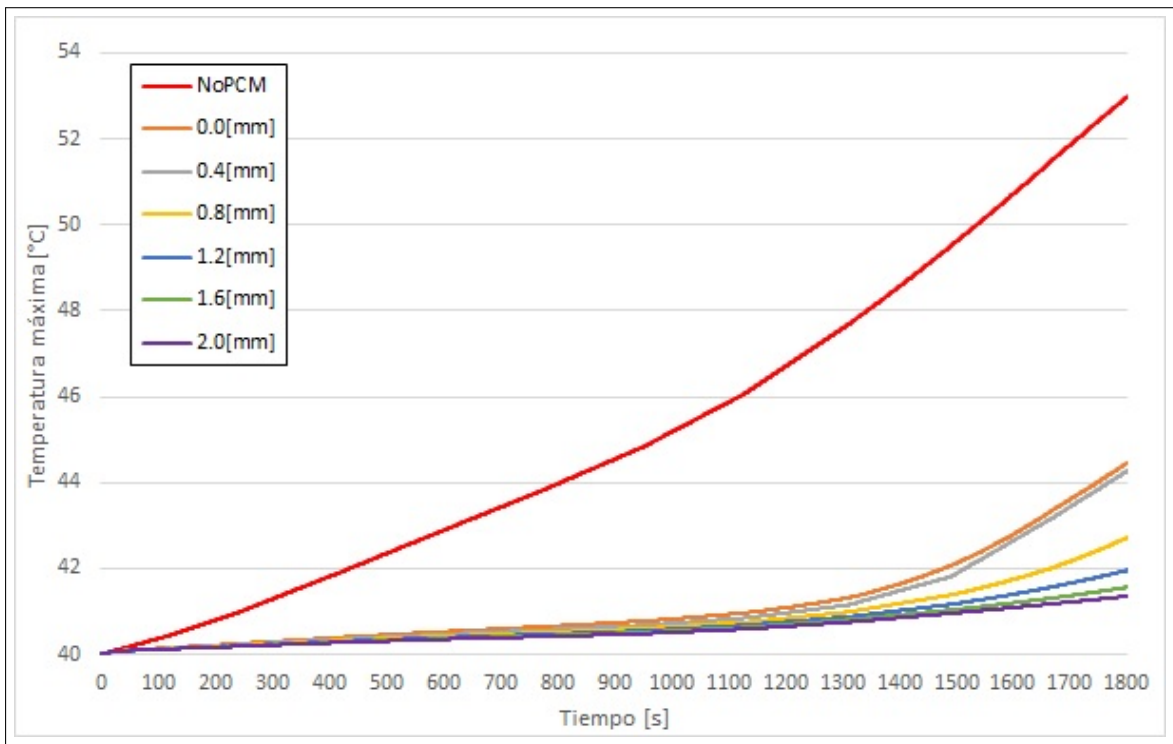


Figura A.9: Evolución de la temperatura máxima de las celdas, para una celda 18650, tasa de descarga 2C y temperatura inicial 40°C y X40 como PCM.

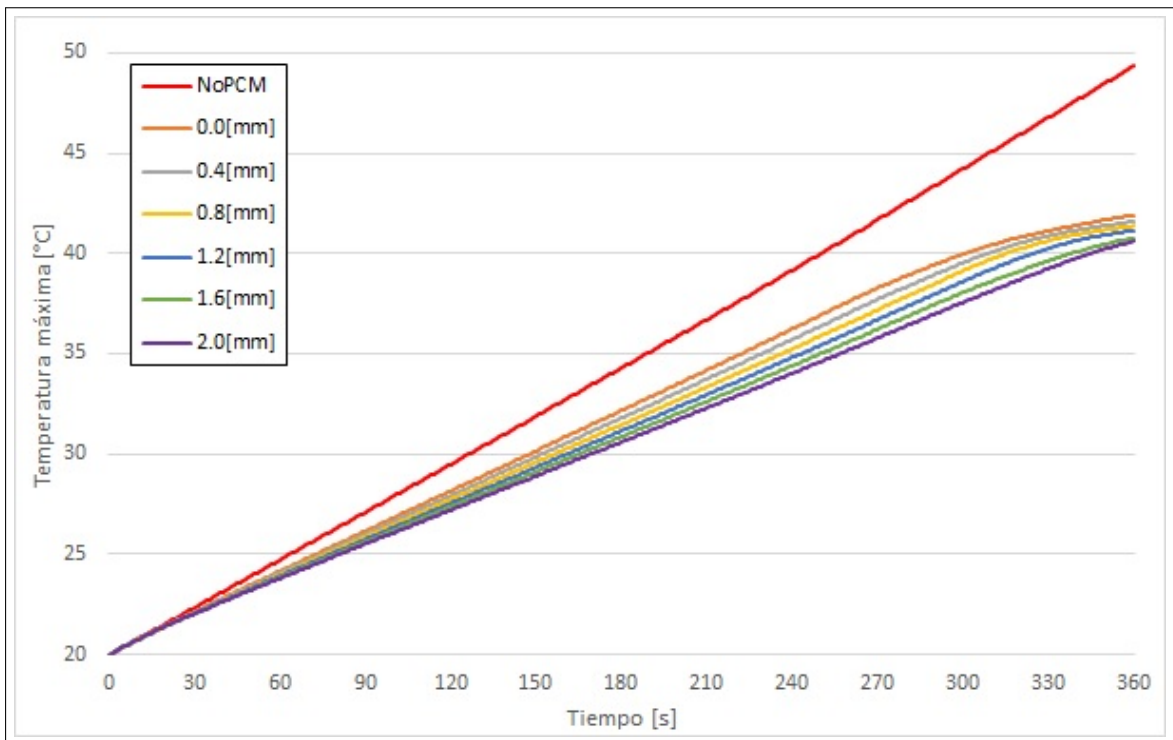


Figura A.10: Evolución de la temperatura máxima de las celdas, para una celda 18650, tasa de descarga 10C y temperatura inicial 20°C y X40 como PCM.

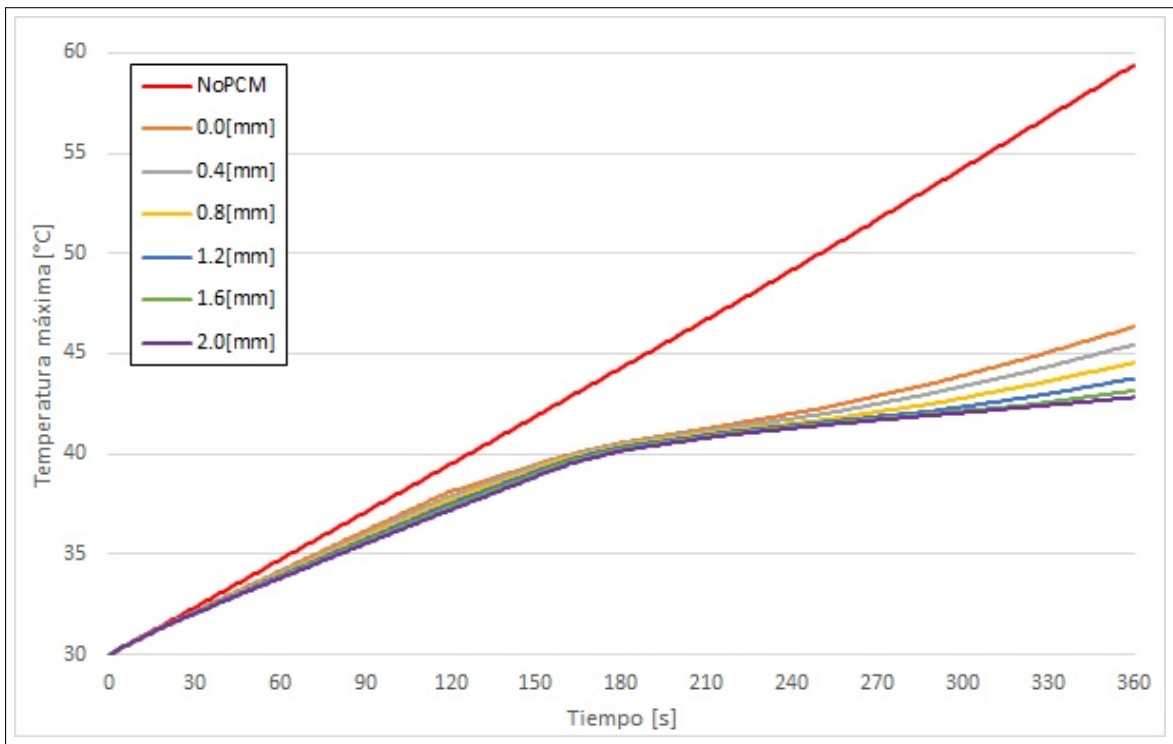


Figura A.11: Evolución de la temperatura máxima de las celdas, para una celda 18650, tasa de descarga 10C y temperatura inicial 30°C y X40 como PCM.

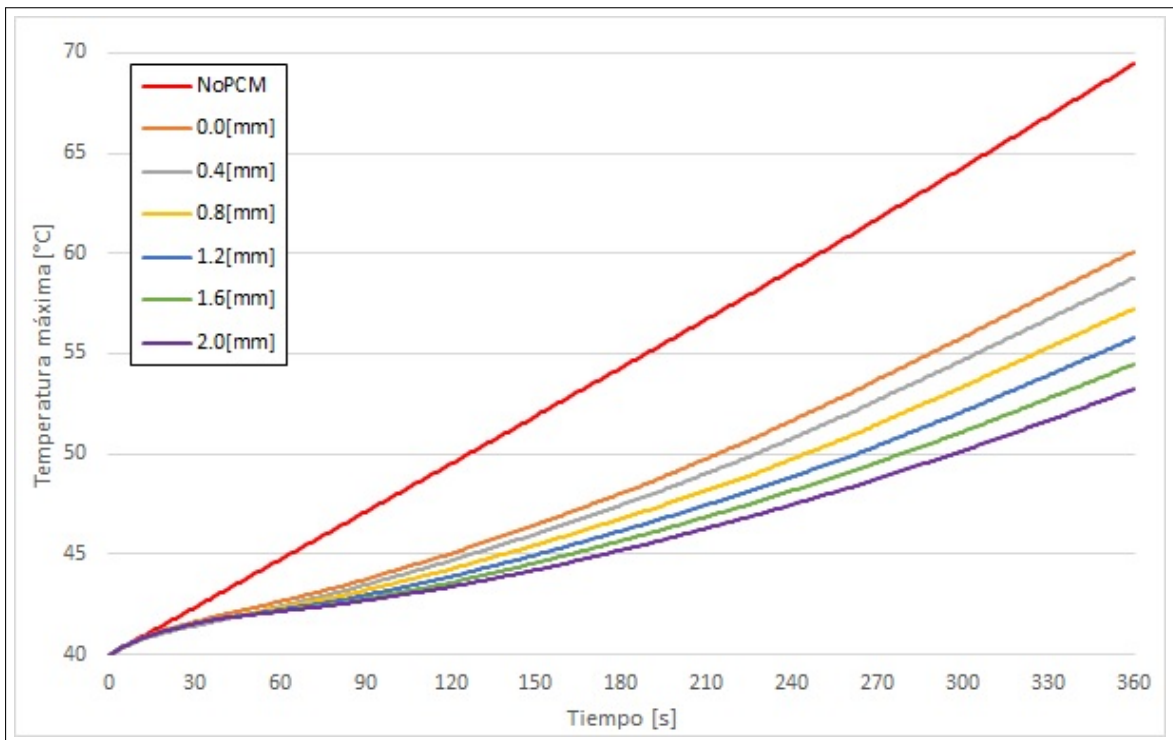


Figura A.12: Evolución de la temperatura máxima de las celdas, para una celda 18650, tasa de descarga 10C y temperatura inicial 40°C y X40 como PCM.

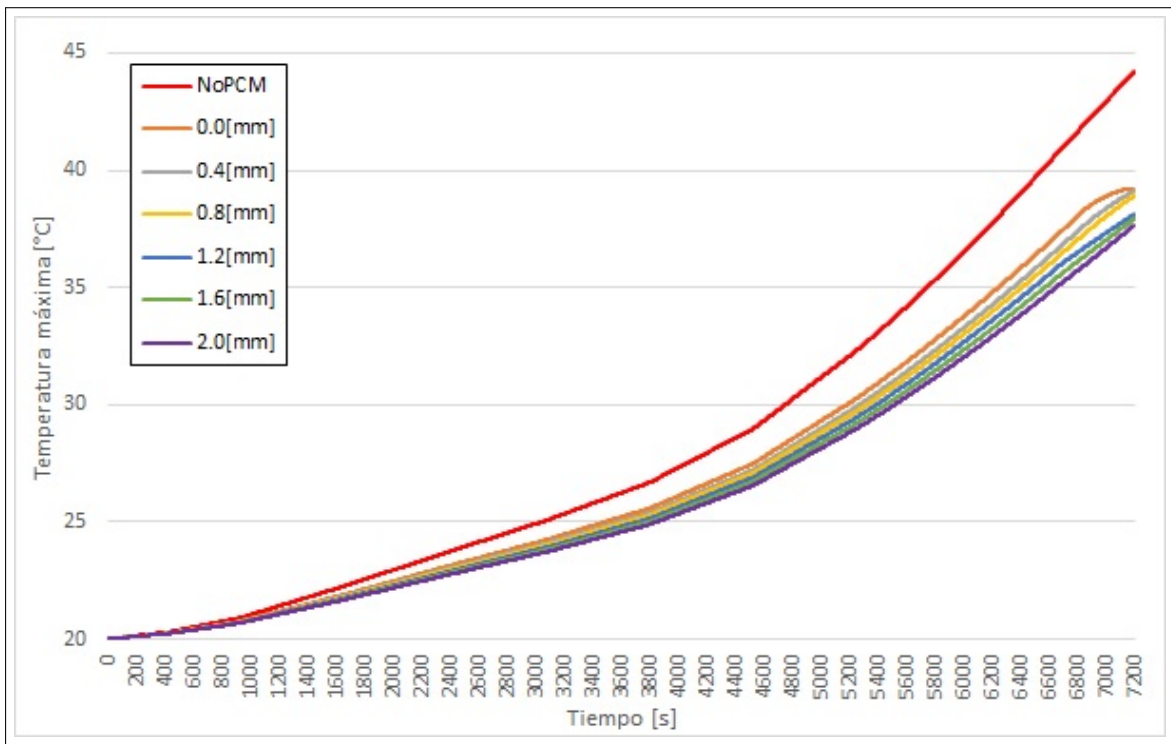


Figura A.13: Evolución de la temperatura máxima de las celdas, para una celda 26650, tasa de descarga 0.5C y temperatura inicial 20°C y X40 como PCM.

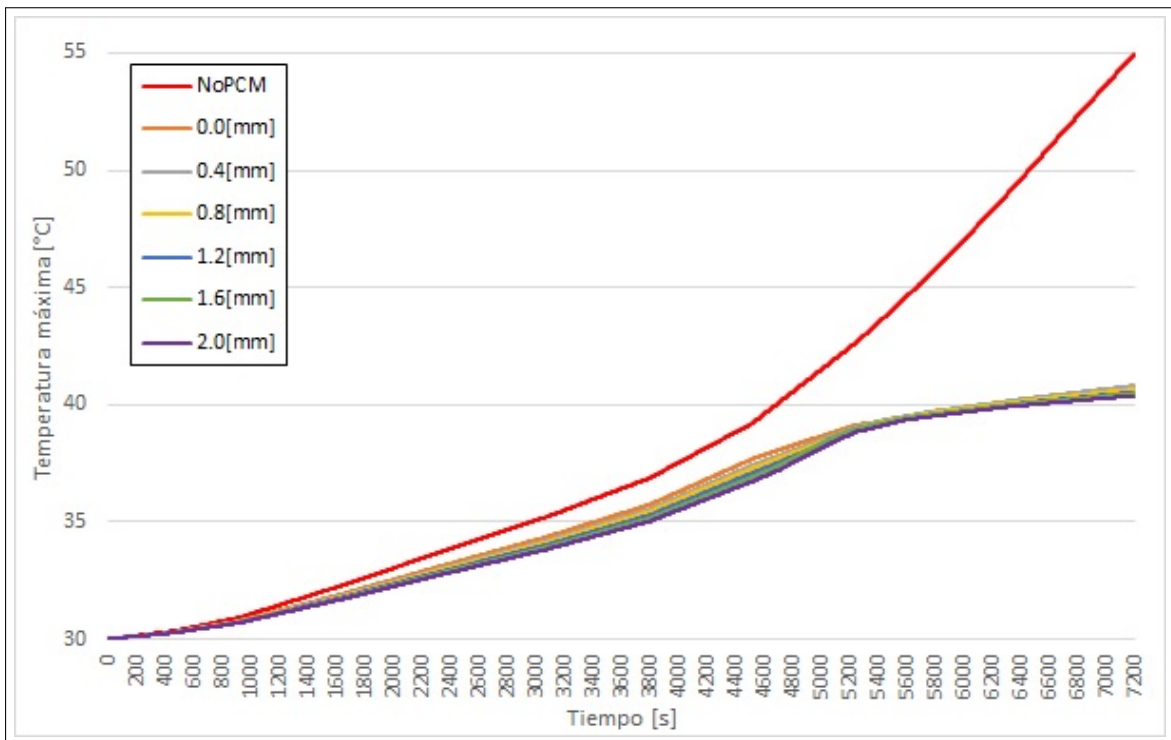


Figura A.14: Evolución de la temperatura máxima de las celdas, para una celda 26650, tasa de descarga 0.5C y temperatura inicial 30°C y X40 como PCM.

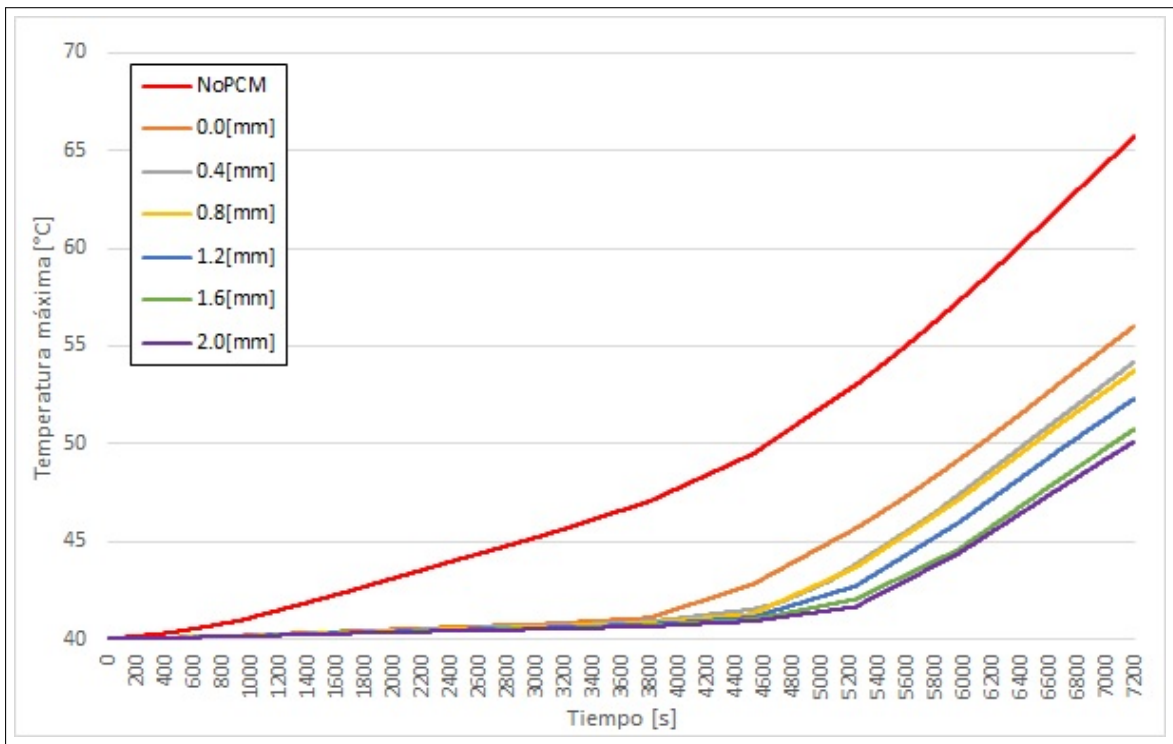


Figura A.15: Evolución de la temperatura máxima de las celdas, para una celda 26650, tasa de descarga 0.5C y temperatura inicial 40°C y X40 como PCM.

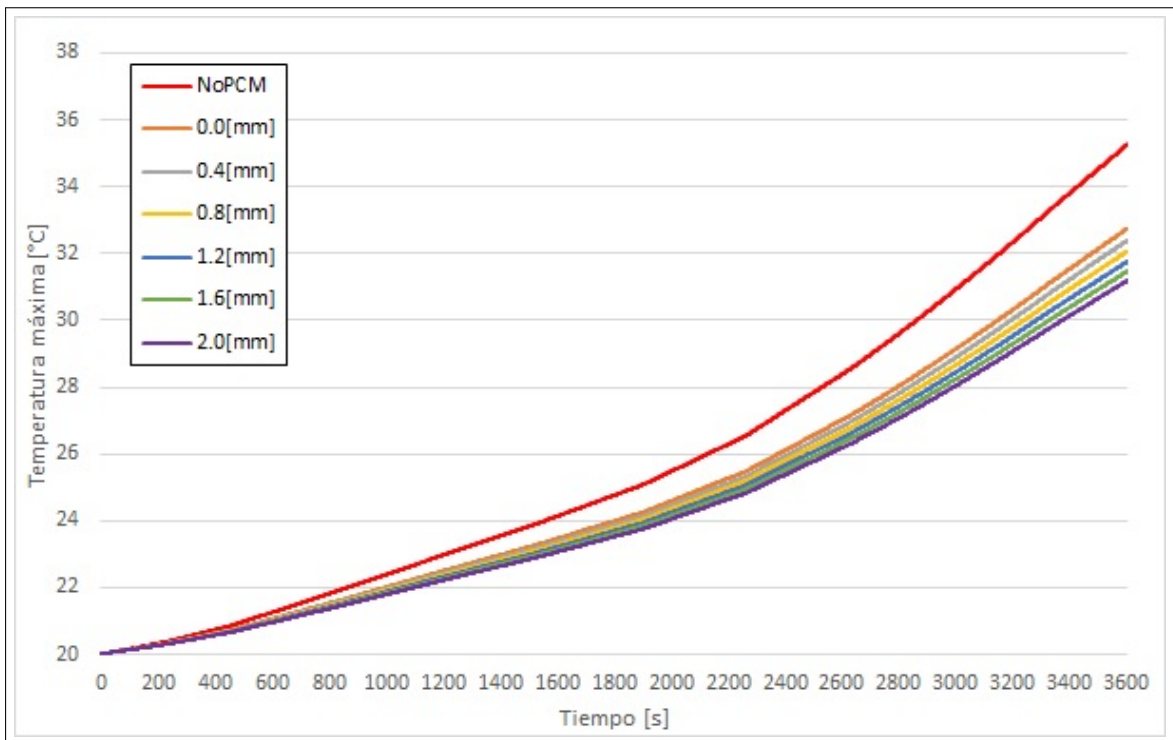


Figura A.16: Evolución de la temperatura máxima de las celdas, para una celda 26650, tasa de descarga 1C y temperatura inicial 20°C y X40 como PCM.

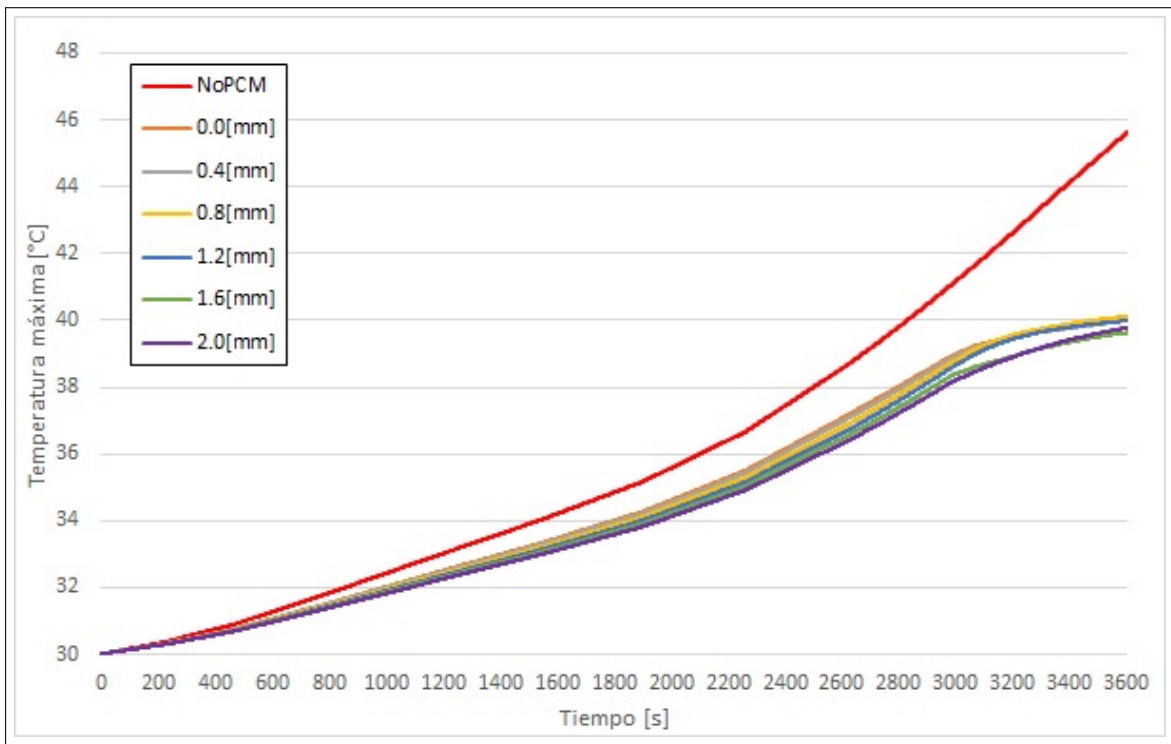


Figura A.17: Evolución de la temperatura máxima de las celdas, para una celda 26650, tasa de descarga 1C y temperatura inicial 30°C y X40 como PCM.

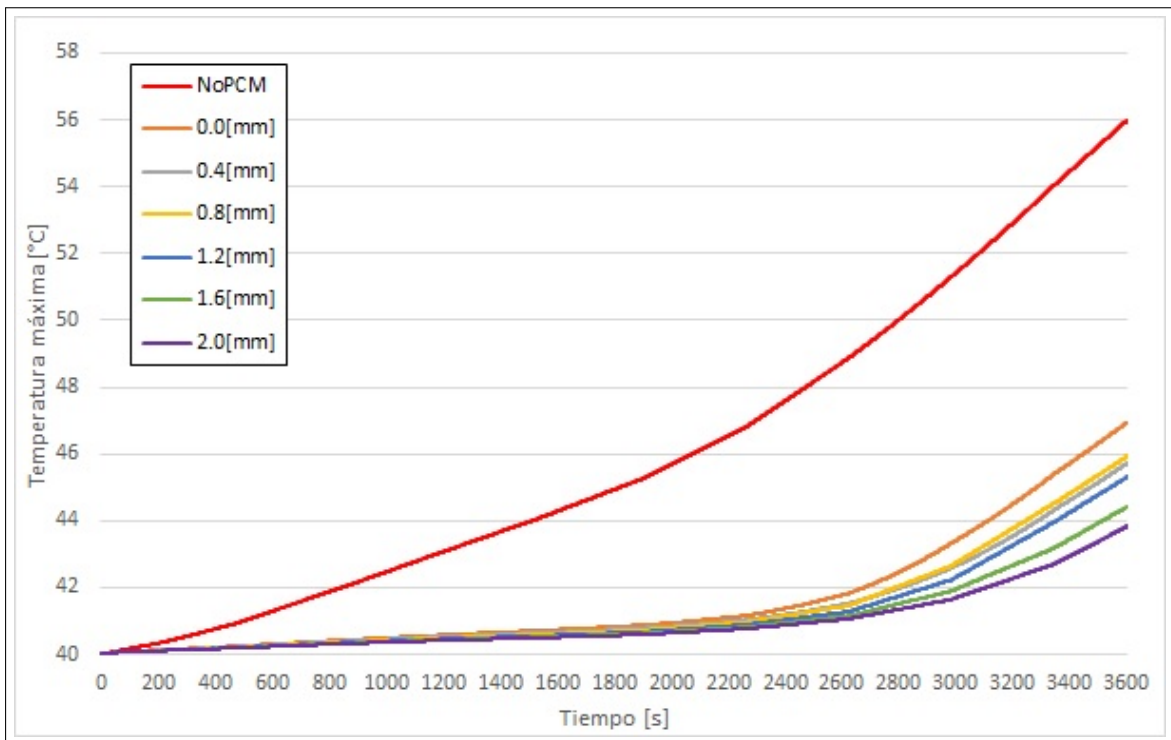


Figura A.18: Evolución de la temperatura máxima de las celdas, para una celda 26650, tasa de descarga 1C y temperatura inicial 40°C y X40 como PCM.

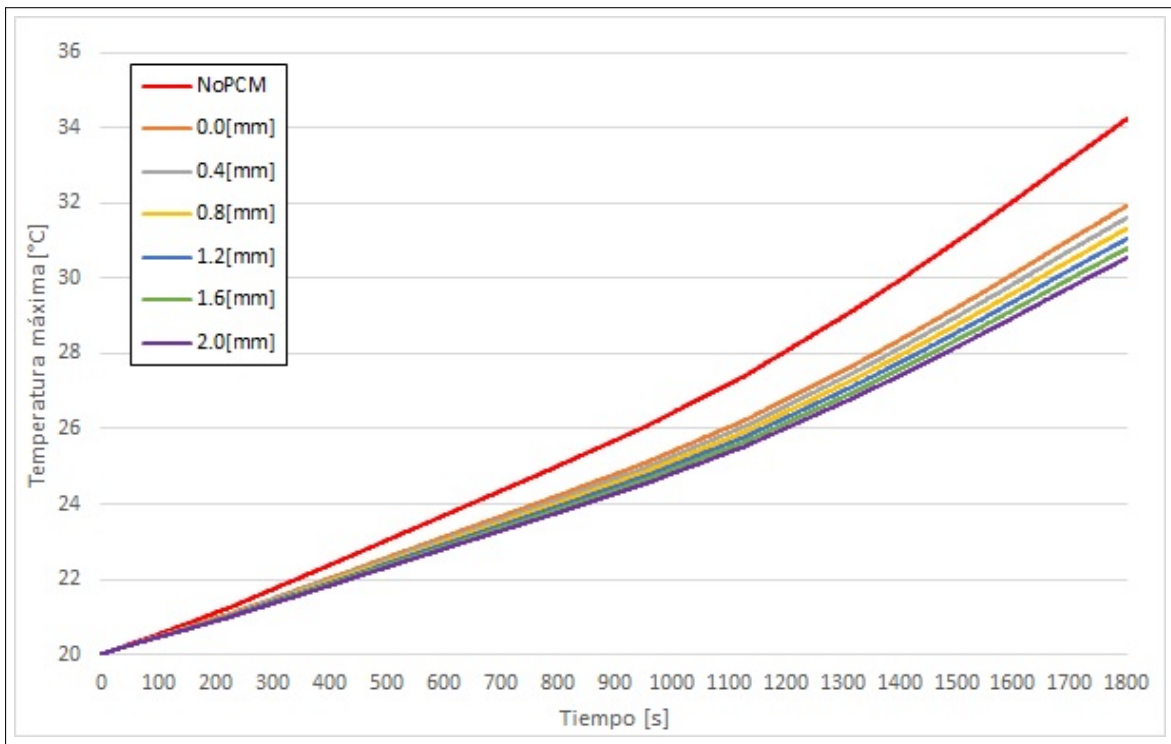


Figura A.19: Evolución de la temperatura máxima de las celdas, para una celda 26650, tasa de descarga 2C y temperatura inicial 20°C y X40 como PCM.

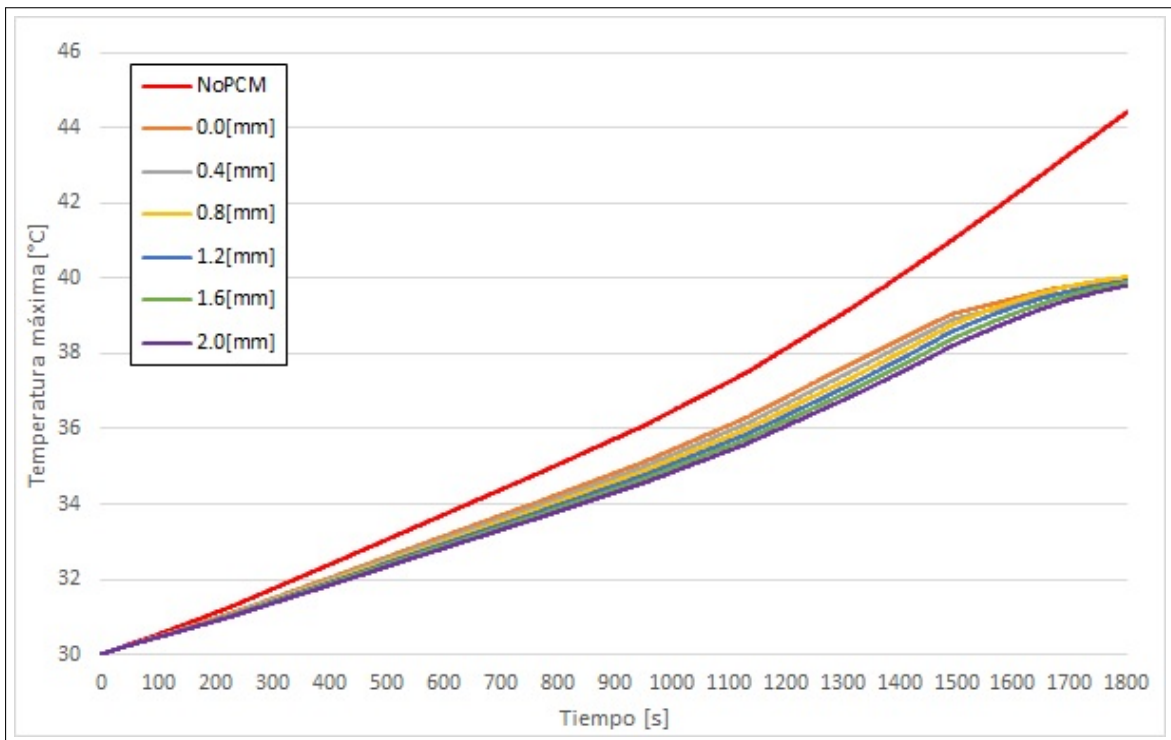


Figura A.20: Evolución de la temperatura máxima de las celdas, para una celda 26650, tasa de descarga 2C y temperatura inicial 30°C y X40 como PCM.

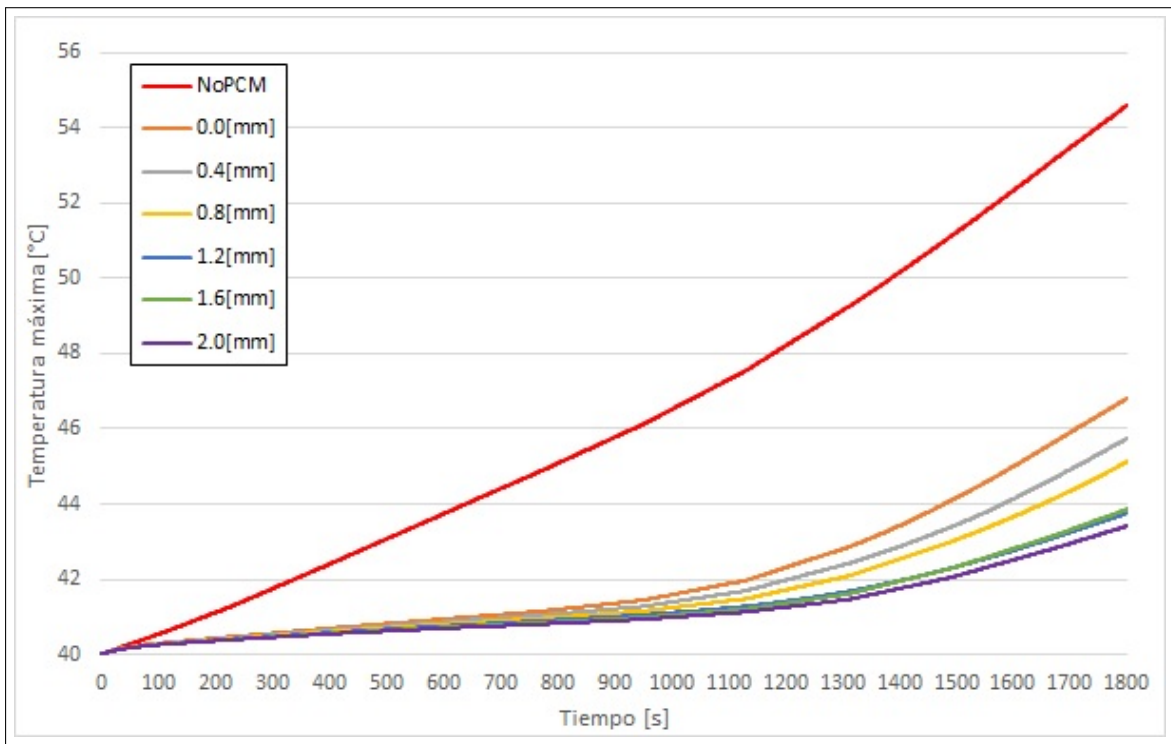


Figura A.21: Evolución de la temperatura máxima de las celdas, para una celda 26650, tasa de descarga 2C y temperatura inicial 40°C y X40 como PCM.

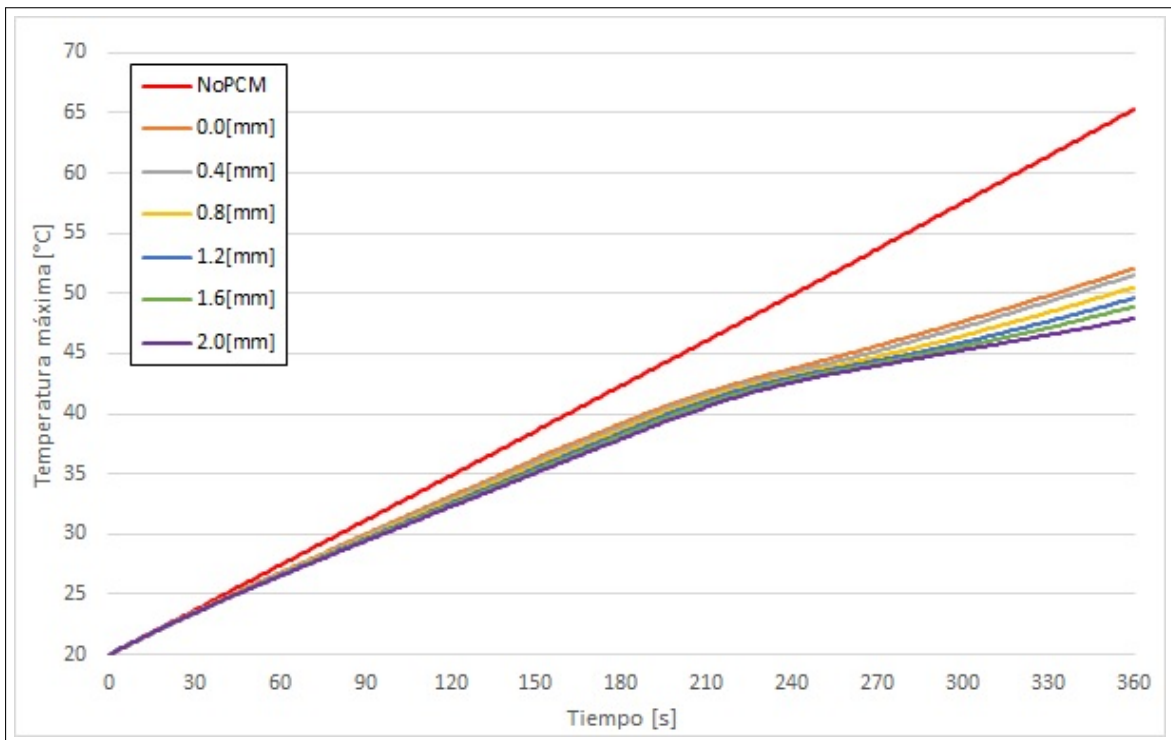


Figura A.22: Evolución de la temperatura máxima de las celdas, para una celda 26650, tasa de descarga 10C y temperatura inicial 20°C y X40 como PCM.

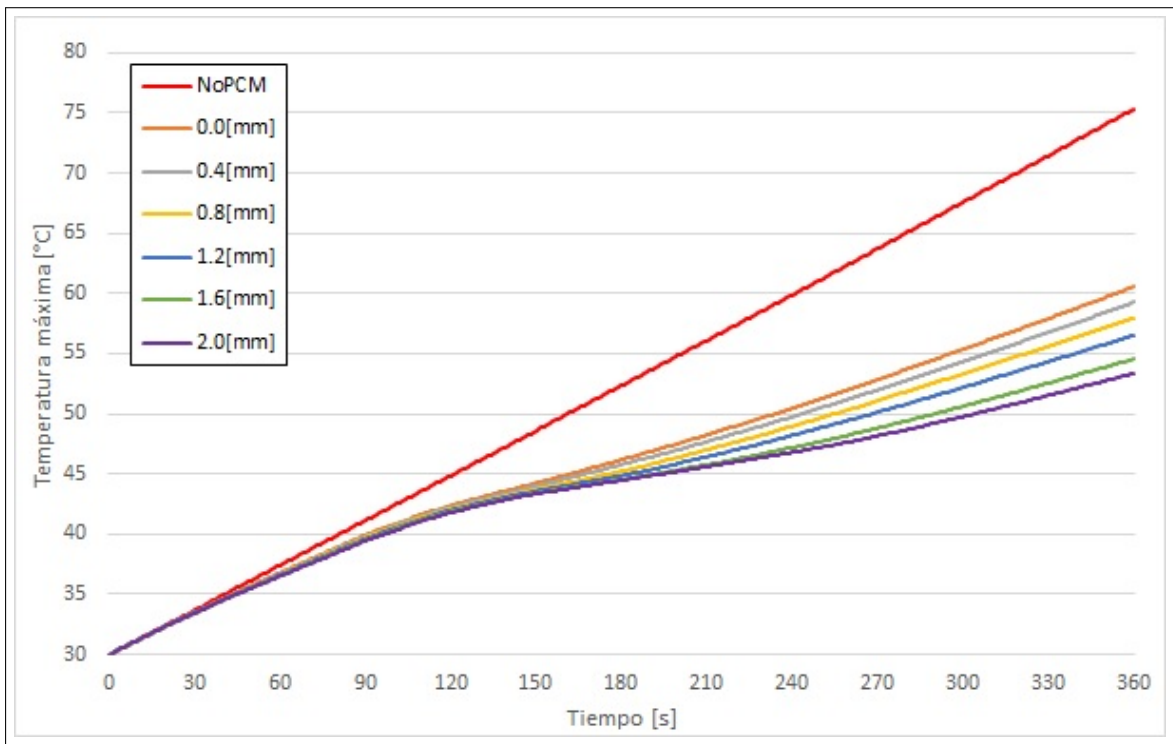


Figura A.23: Evolución de la temperatura máxima de las celdas, para una celda 26650, tasa de descarga 10C y temperatura inicial 30°C y X40 como PCM.

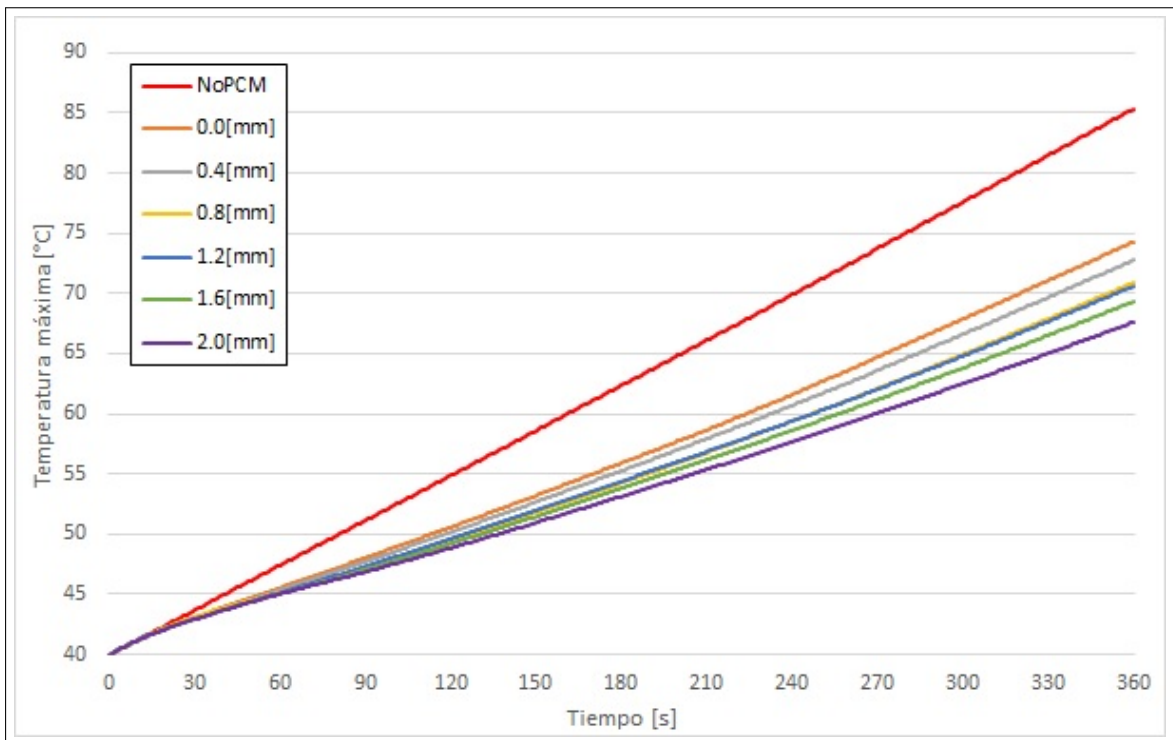


Figura A.24: Evolución de la temperatura máxima de las celdas, para una celda 26650, tasa de descarga 10C y temperatura inicial 40°C y X40 como PCM.

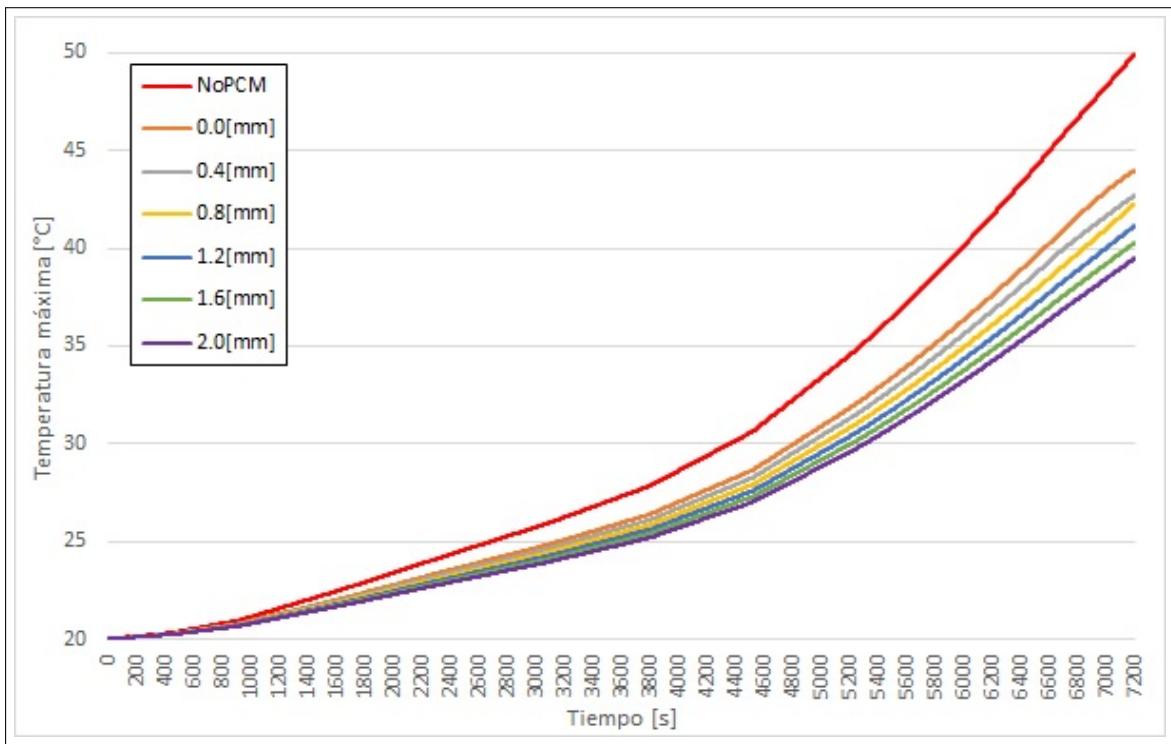


Figura A.25: Evolución de la temperatura máxima de las celdas, para una celda 18650, tasa de descarga 0.5C, temperatura inicial 20°Cy NPG como PCM.

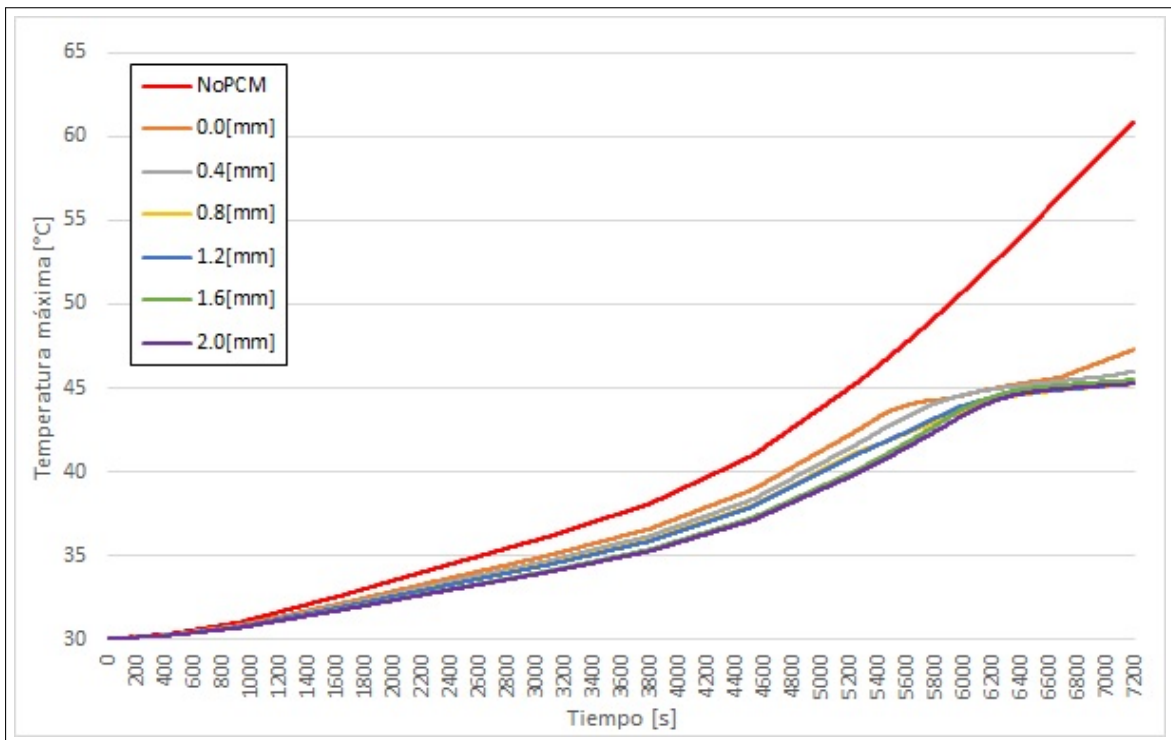


Figura A.26: Evolución de la temperatura máxima de las celdas, para una celda 18650, tasa de descarga 0.5C, temperatura inicial 30°Cy NPG como PCM.

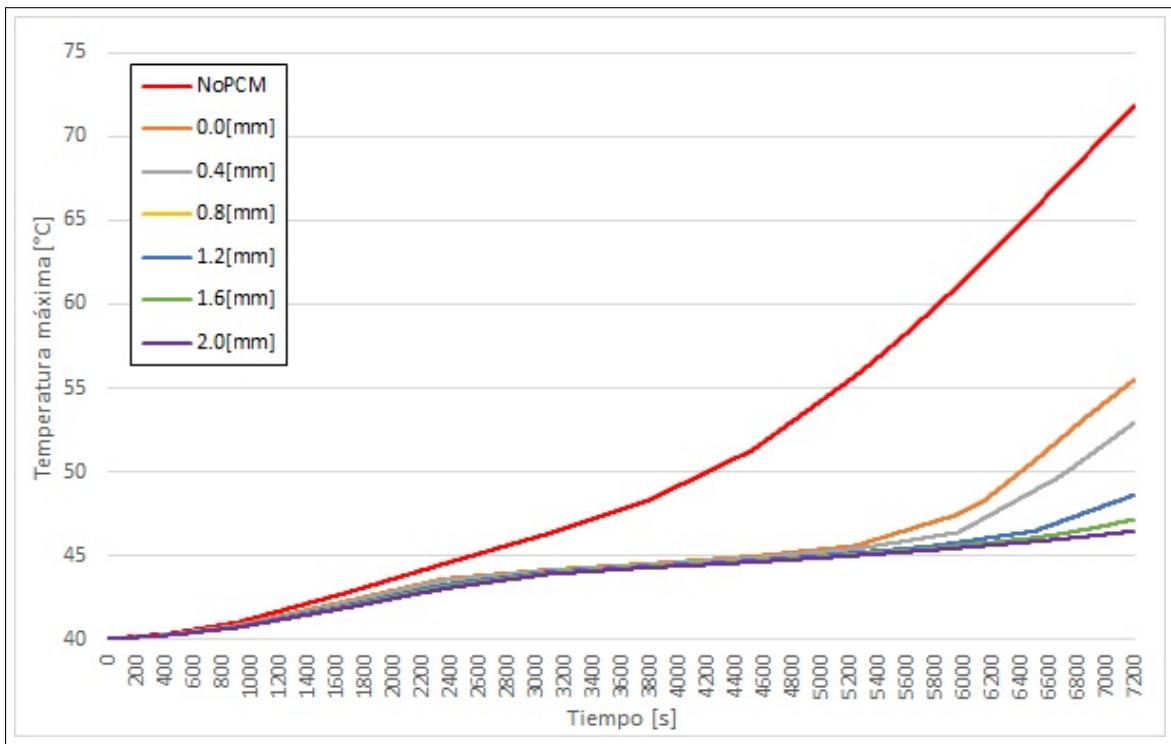


Figura A.27: Evolución de la temperatura máxima de las celdas, para una celda 18650, tasa de descarga 0.5C, temperatura inicial 40°Cy NPG como PCM.

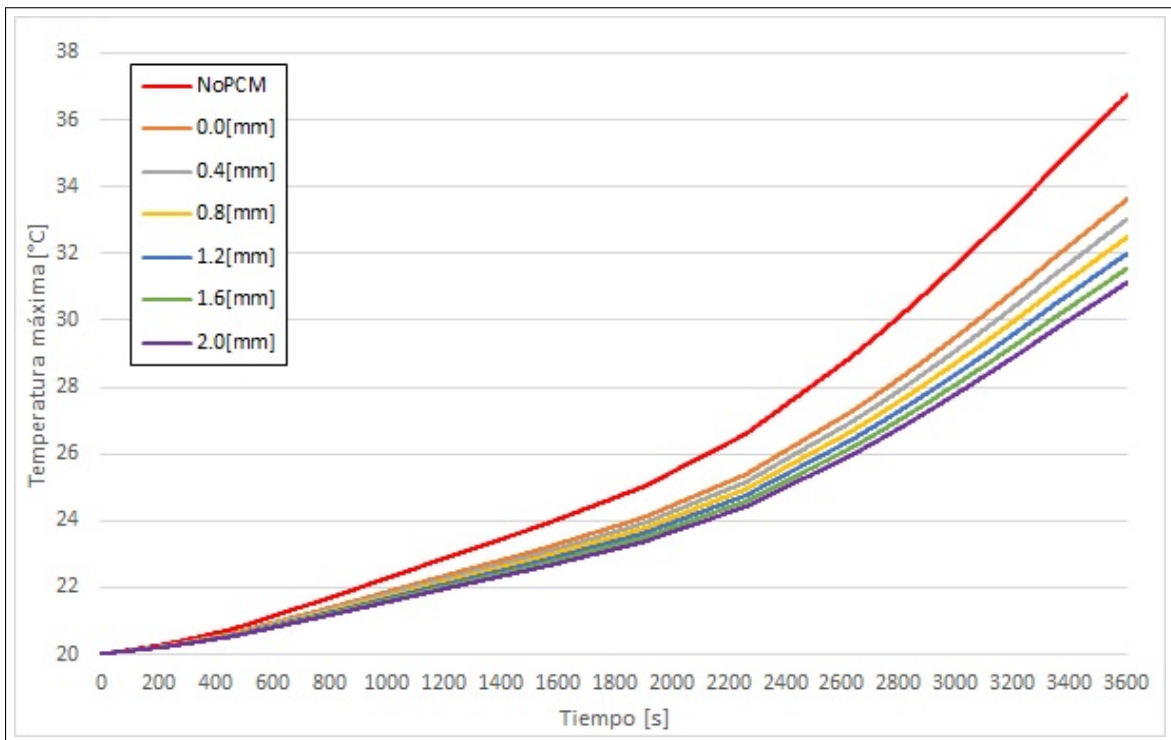


Figura A.28: Evolución de la temperatura máxima de las celdas, para una celda 18650, tasa de descarga 1C, temperatura inicial 20°Cy NPG como PCM.

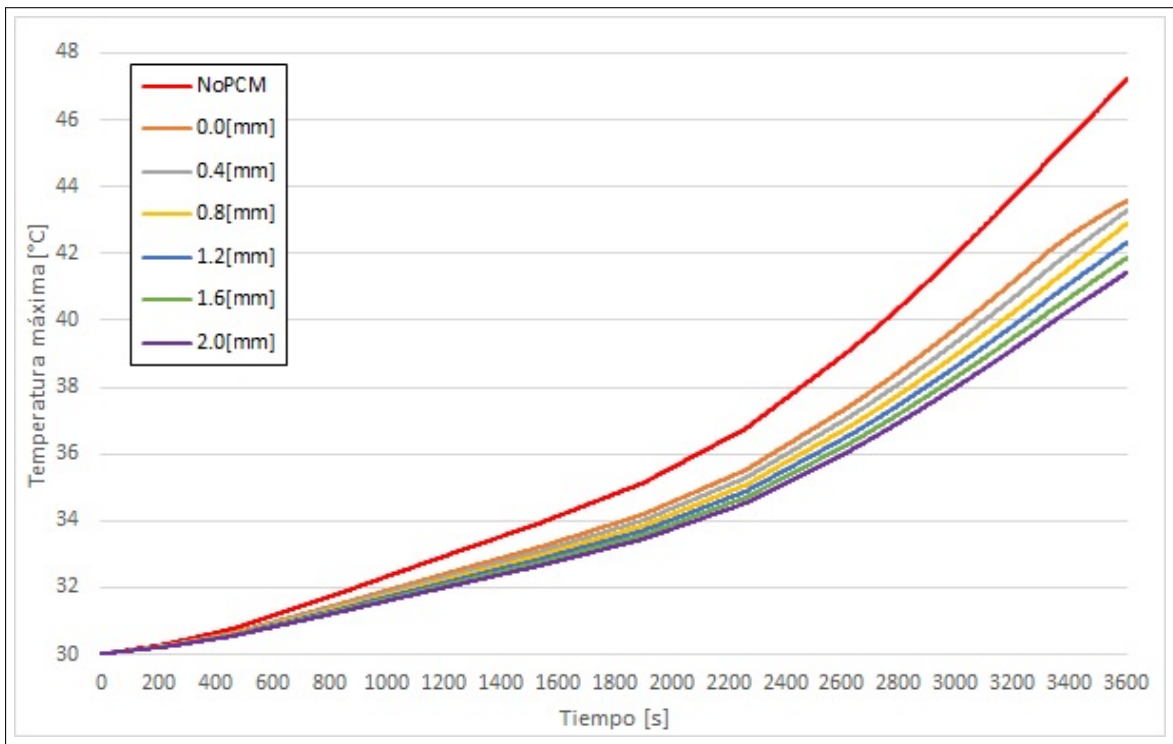


Figura A.29: Evolución de la temperatura máxima de las celdas, para una celda 18650, tasa de descarga 1C, temperatura inicial 30°C y NPG como PCM.

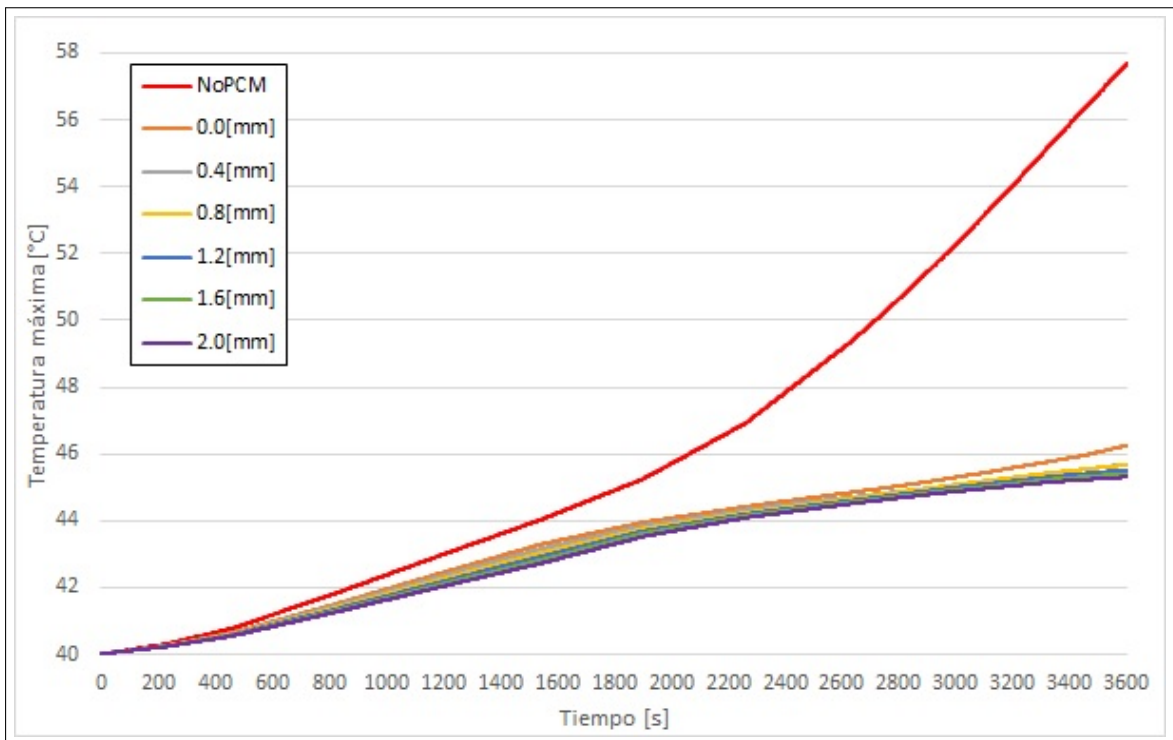


Figura A.30: Evolución de la temperatura máxima de las celdas, para una celda 18650, tasa de descarga 1C, temperatura inicial 40°C y NPG como PCM.

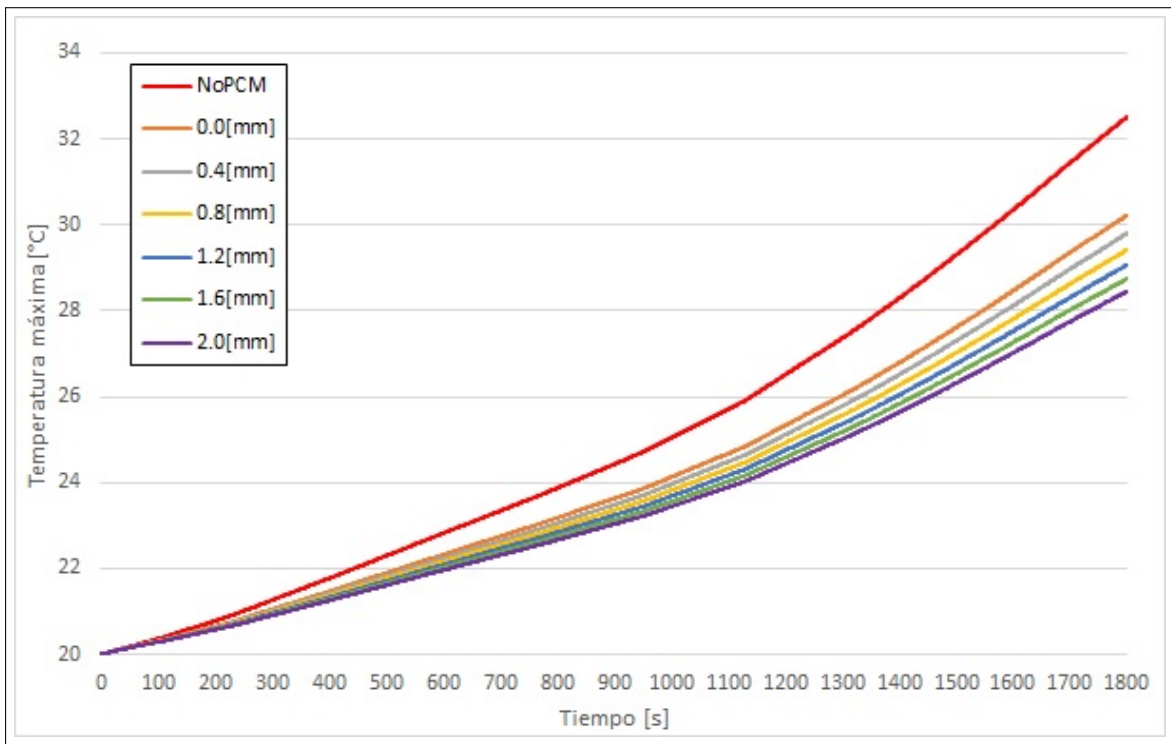


Figura A.31: Evolución de la temperatura máxima de las celdas, para una celda 18650, tasa de descarga 2C, temperatura inicial 20°C y NPG como PCM.

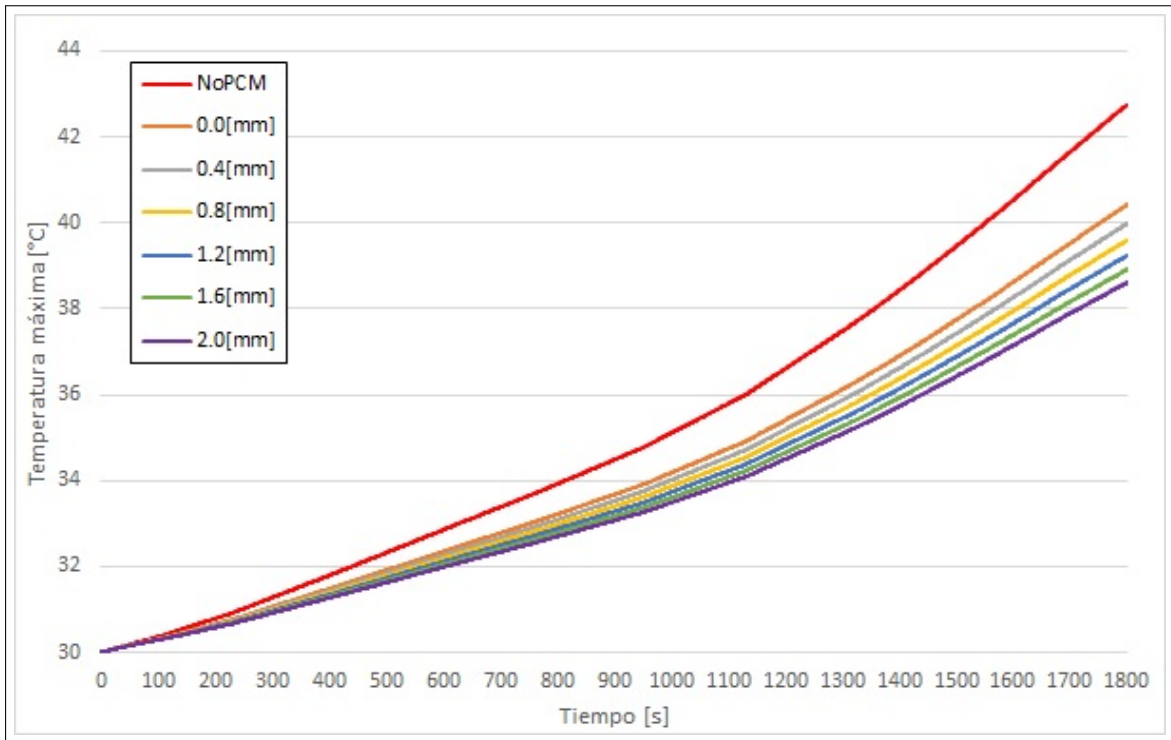


Figura A.32: Evolución de la temperatura máxima de las celdas, para una celda 18650, tasa de descarga 2C, temperatura inicial 30°C y NPG como PCM.

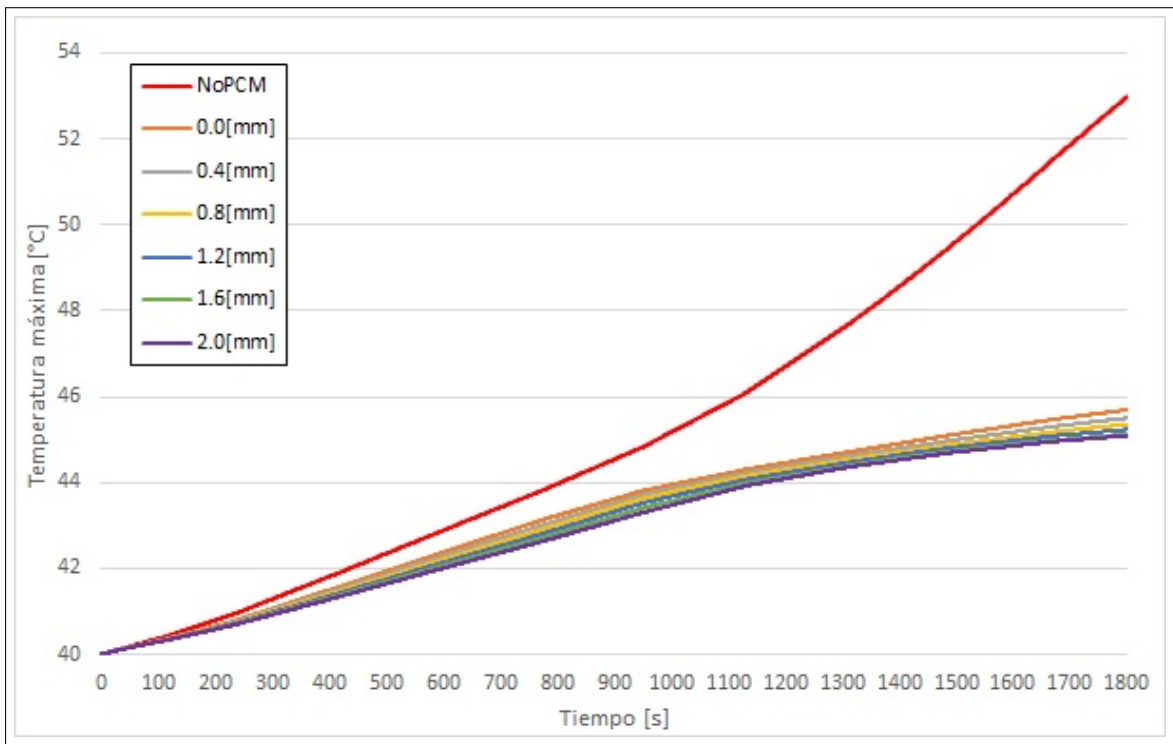


Figura A.33: Evolución de la temperatura máxima de las celdas, para una celda 18650, tasa de descarga 2C, temperatura inicial 40°C y NPG como PCM.

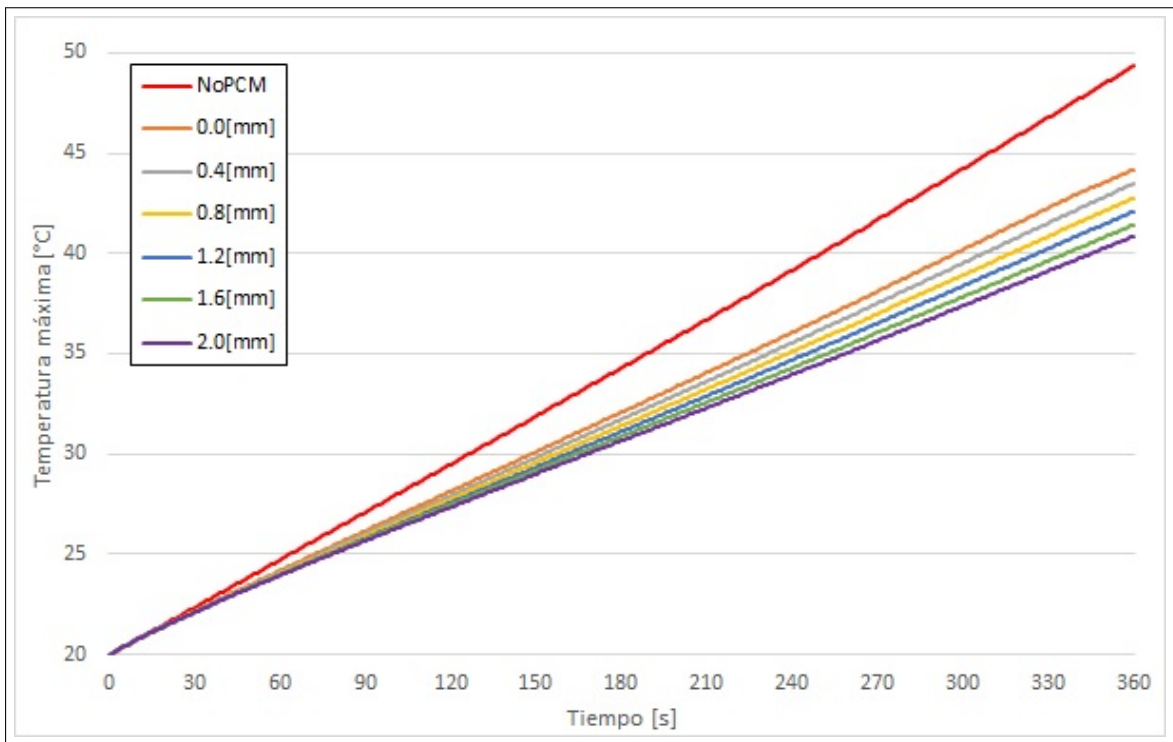


Figura A.34: Evolución de la temperatura máxima de las celdas, para una celda 18650, tasa de descarga 10C, temperatura inicial 20°C y NPG como PCM.

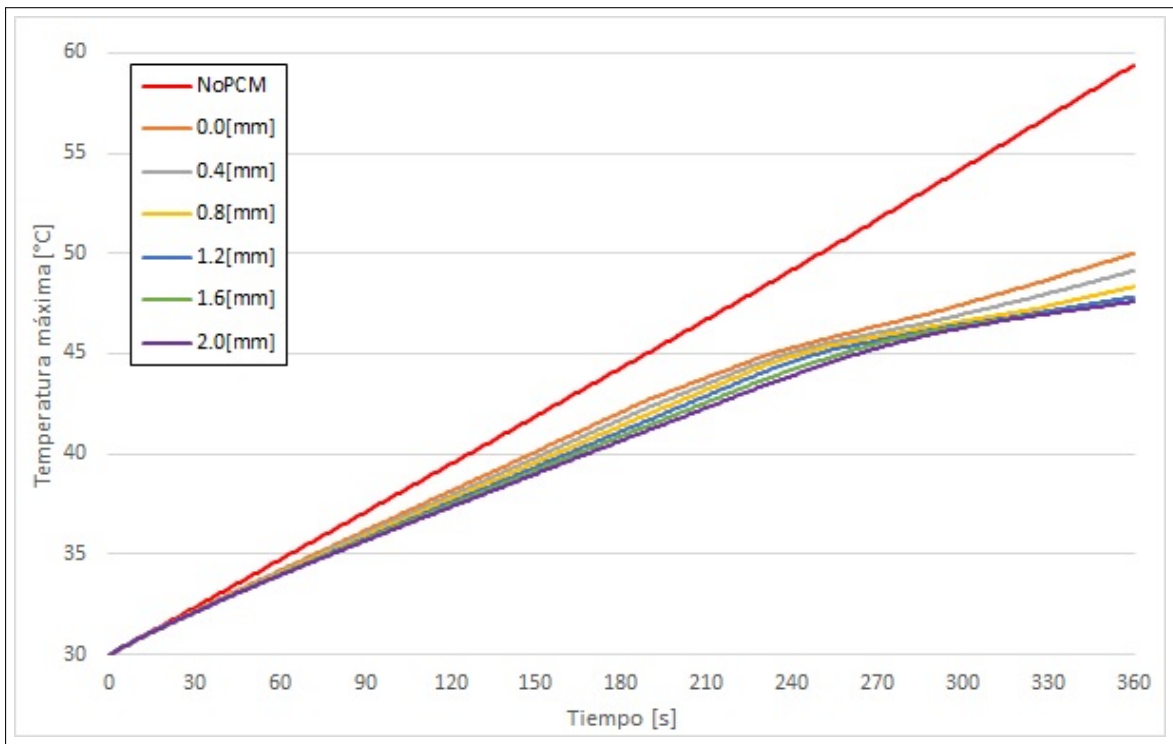


Figura A.35: Evolución de la temperatura máxima de las celdas, para una celda 18650, tasa de descarga 10C, temperatura inicial 30°C y NPG como PCM.

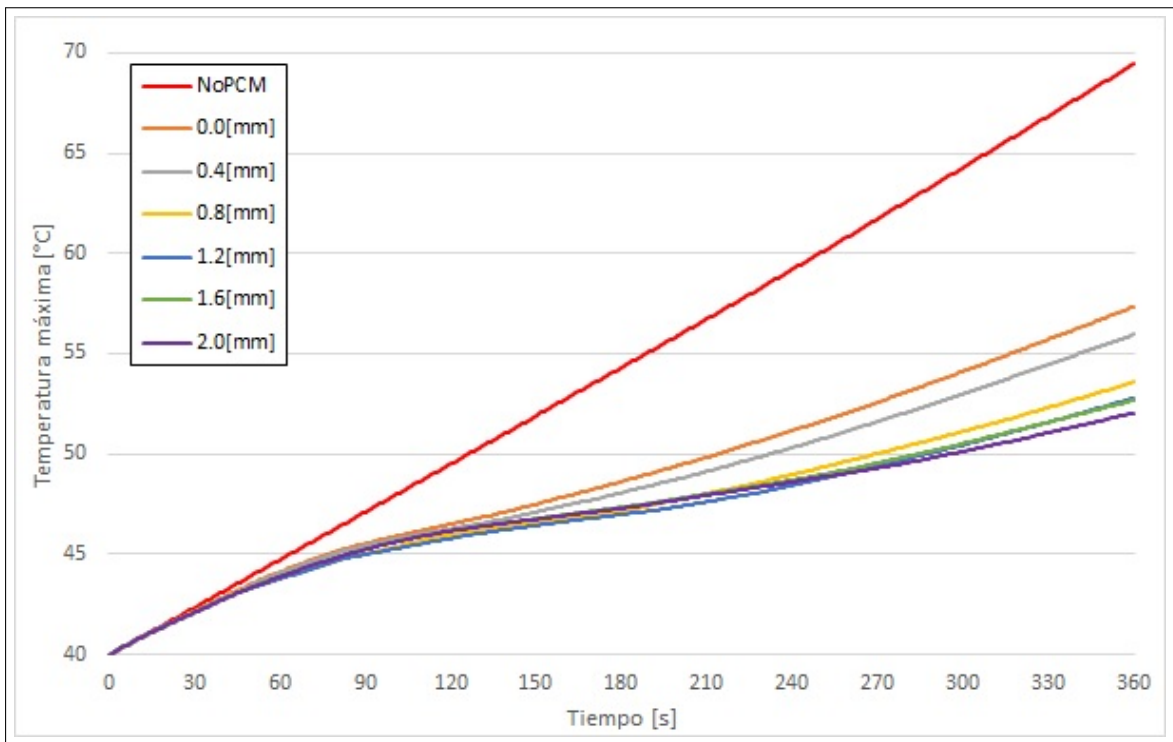


Figura A.36: Evolución de la temperatura máxima de las celdas, para una celda 18650, tasa de descarga 10C, temperatura inicial 40°C y NPG como PCM.

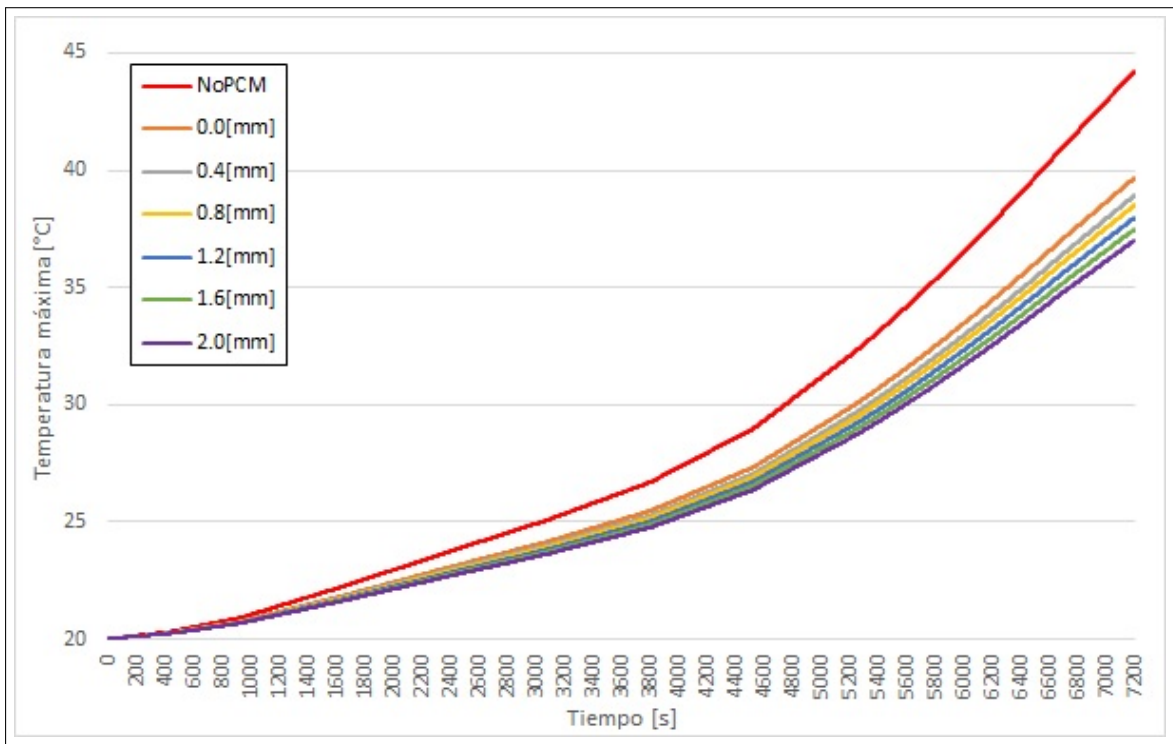


Figura A.37: Evolución de la temperatura máxima de las celdas, para una celda 26650, tasa de descarga 0.5C, temperatura inicial 20°Cy NPG como PCM.

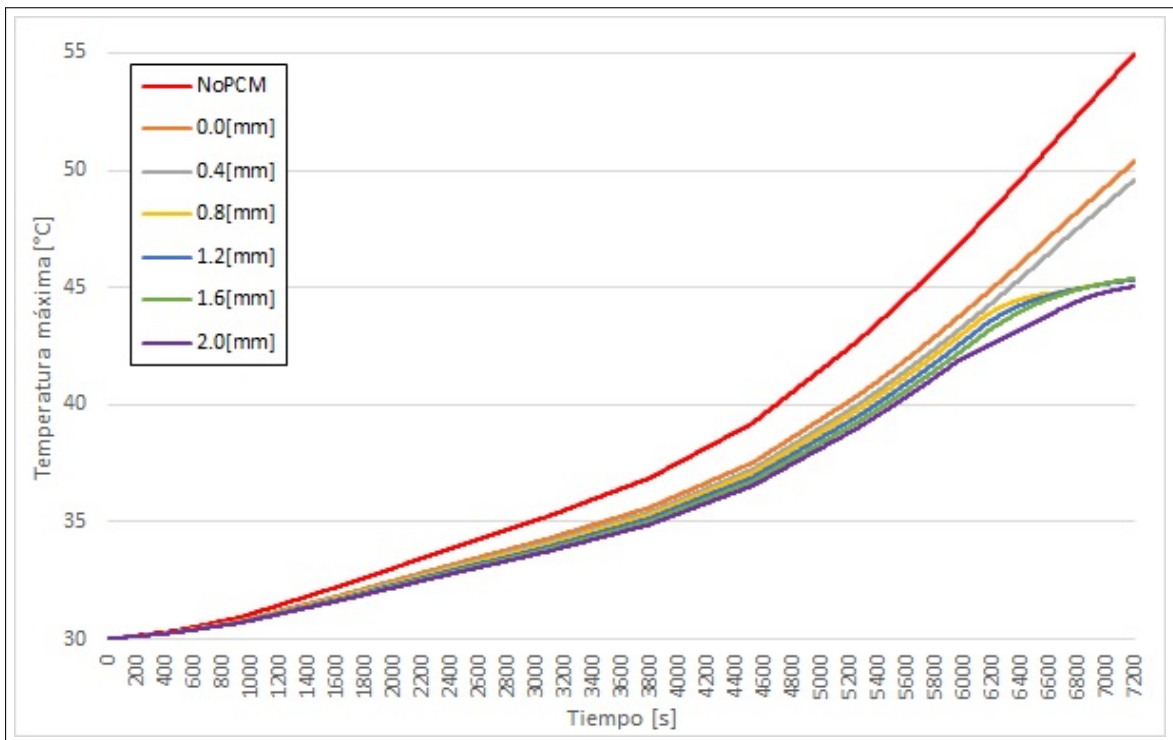


Figura A.38: Evolución de la temperatura máxima de las celdas, para una celda 26650, tasa de descarga 0.5C, temperatura inicial 30°Cy NPG como PCM.

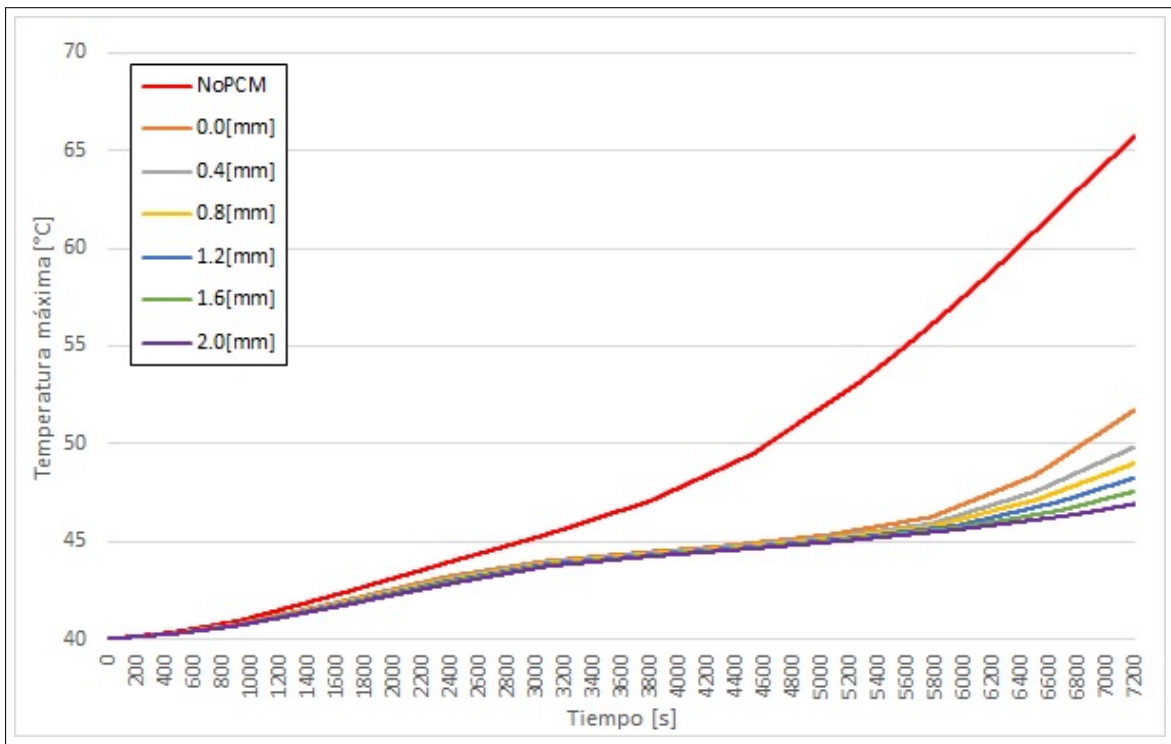


Figura A.39: Evolución de la temperatura máxima de las celdas, para una celda 26650, tasa de descarga 0.5C, temperatura inicial 40°Cy NPG como PCM.

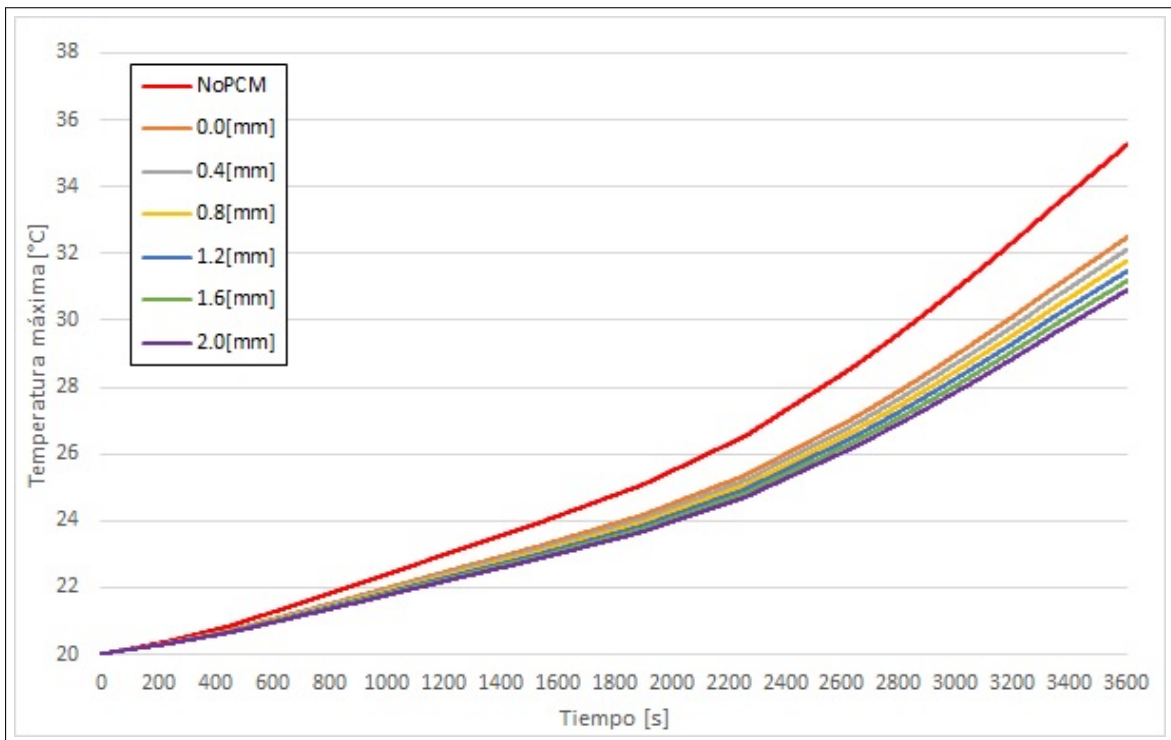


Figura A.40: Evolución de la temperatura máxima de las celdas, para una celda 26650, tasa de descarga 1C, temperatura inicial 20°Cy NPG como PCM.

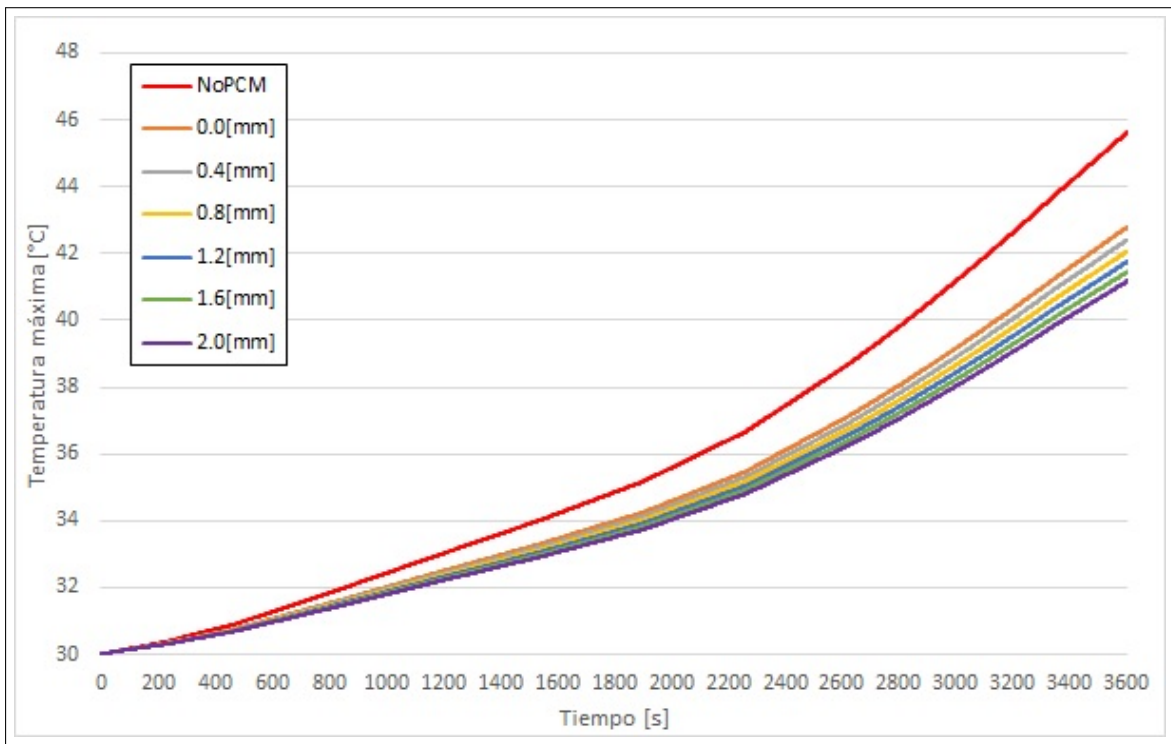


Figura A.41: Evolución de la temperatura máxima de las celdas, para una celda 26650, tasa de descarga 1C, temperatura inicial 30°Cy NPG como PCM.

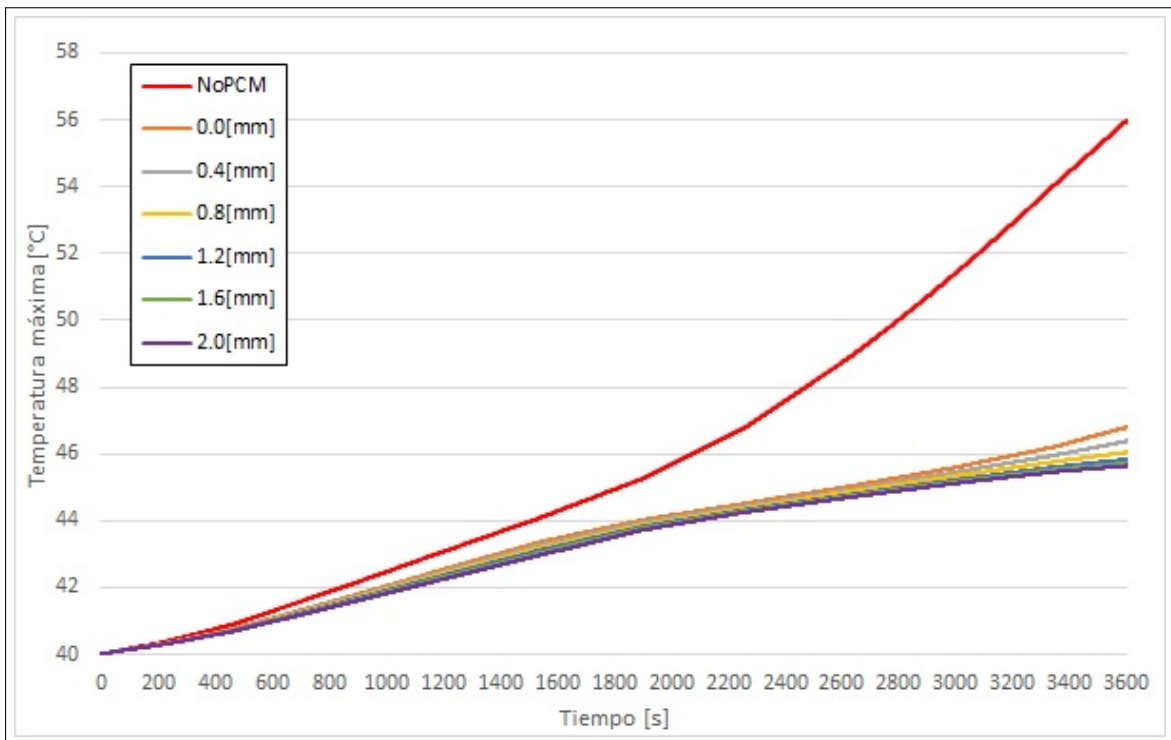


Figura A.42: Evolución de la temperatura máxima de las celdas, para una celda 26650, tasa de descarga 1C, temperatura inicial 40°Cy NPG como PCM.

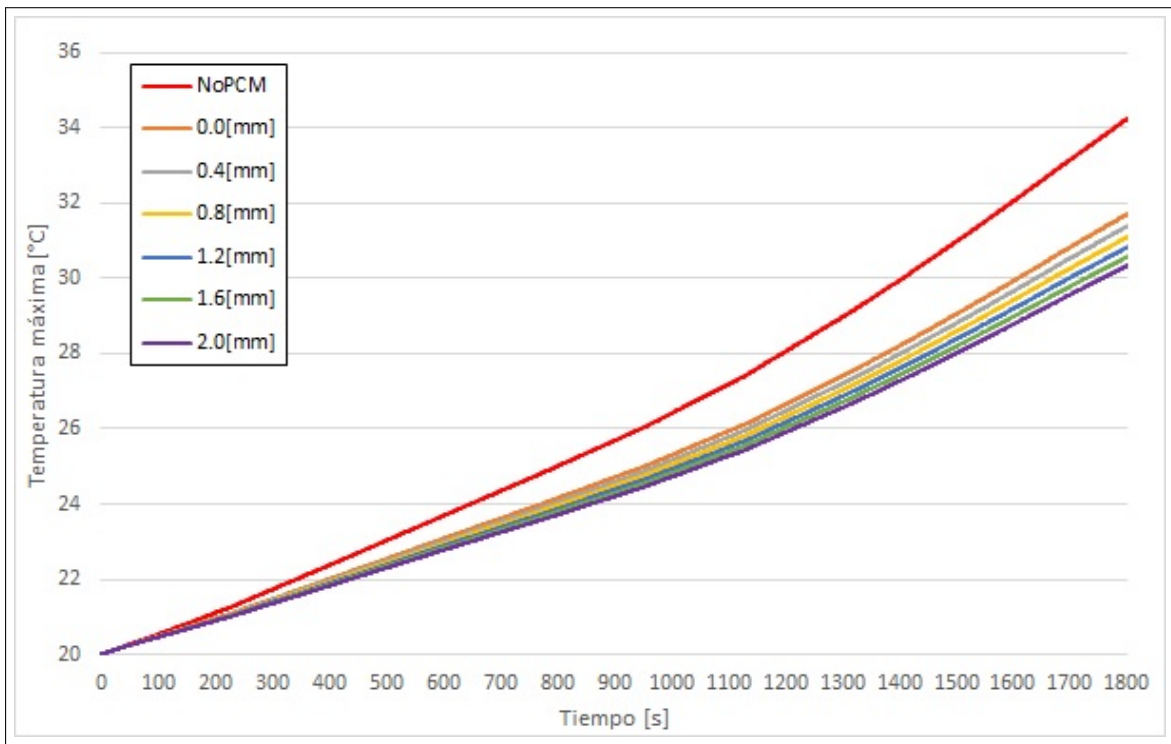


Figura A.43: Evolución de la temperatura máxima de las celdas, para una celda 26650, tasa de descarga 2C, temperatura inicial 20°C y NPG como PCM.

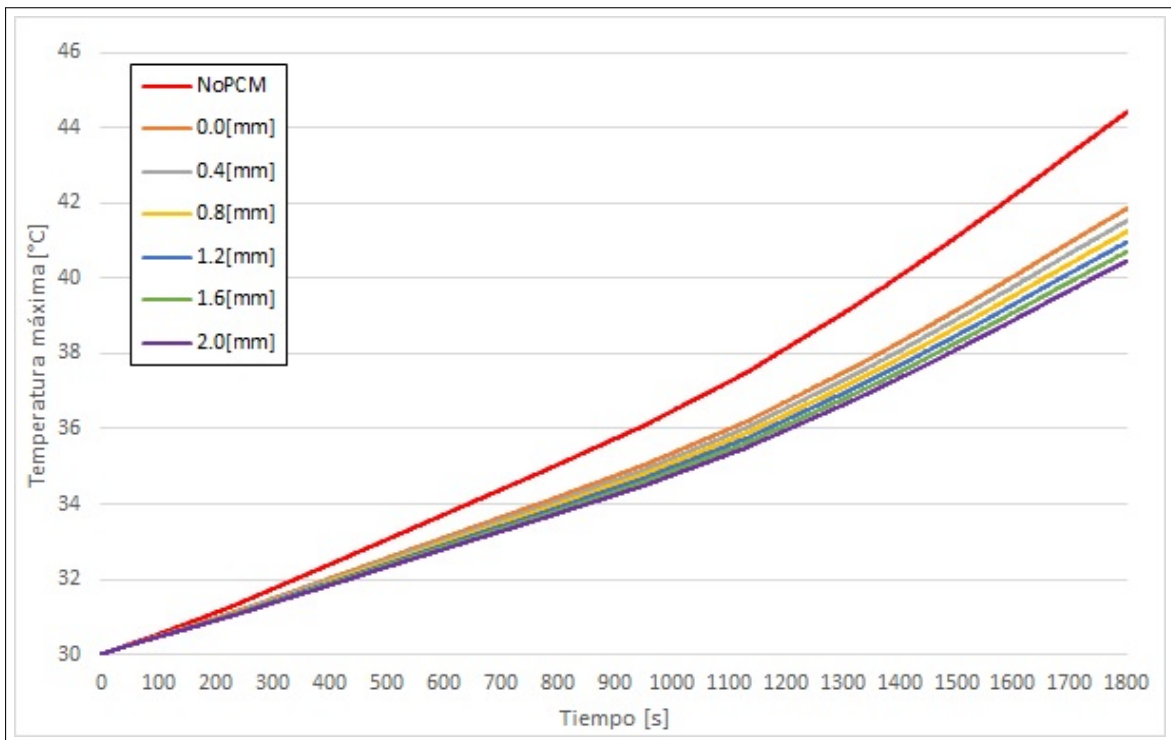


Figura A.44: Evolución de la temperatura máxima de las celdas, para una celda 26650, tasa de descarga 2C, temperatura inicial 30°C y NPG como PCM.

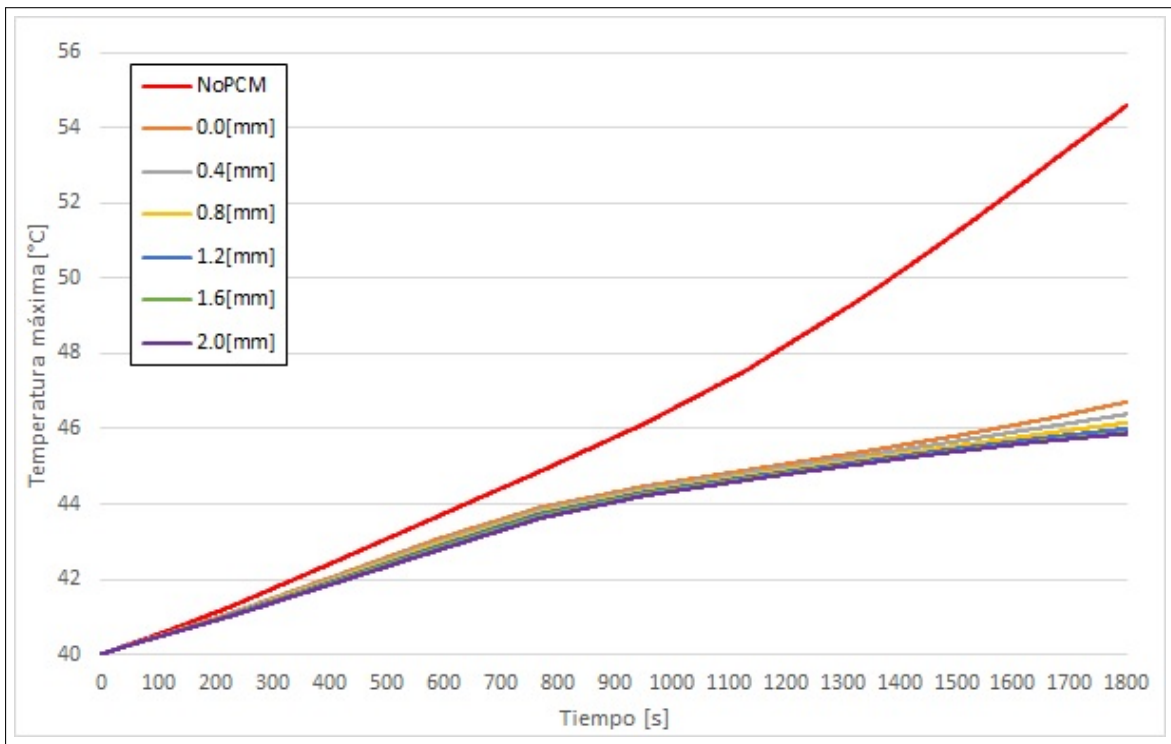


Figura A.45: Evolución de la temperatura máxima de las celdas, para una celda 26650, tasa de descarga 2C, temperatura inicial 40°C y NPG como PCM.

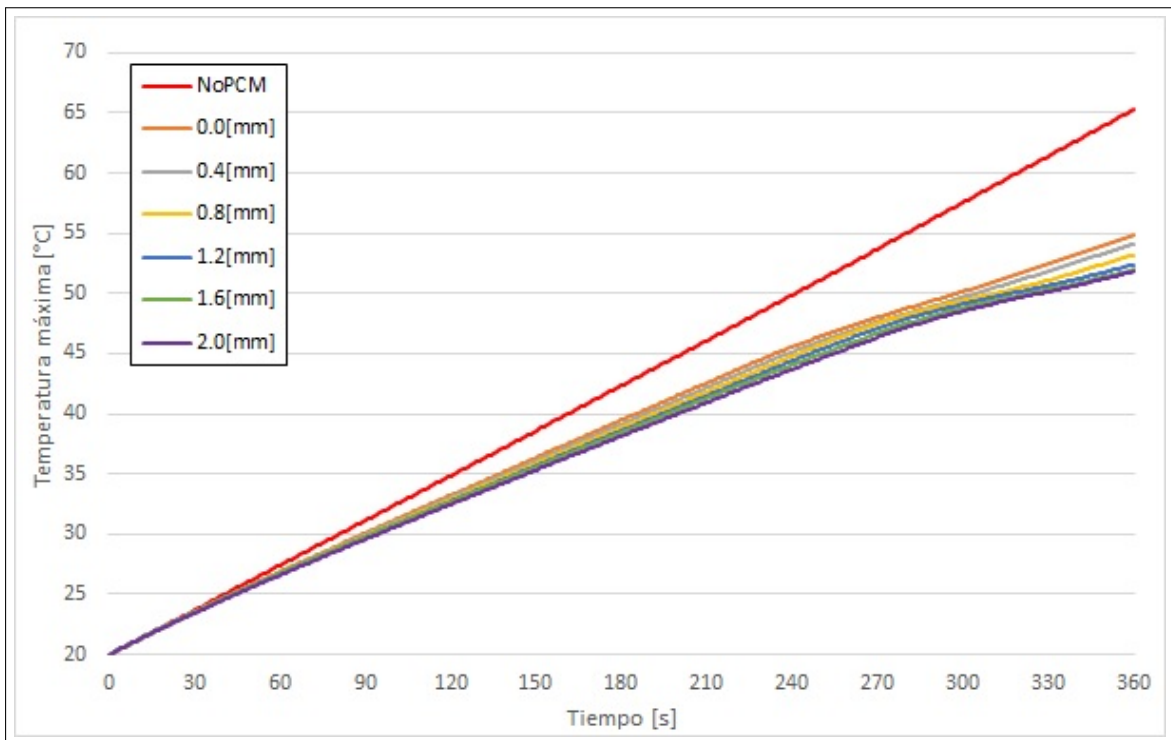


Figura A.46: Evolución de la temperatura máxima de las celdas, para una celda 26650, tasa de descarga 10C, temperatura inicial 20°C y NPG como PCM.

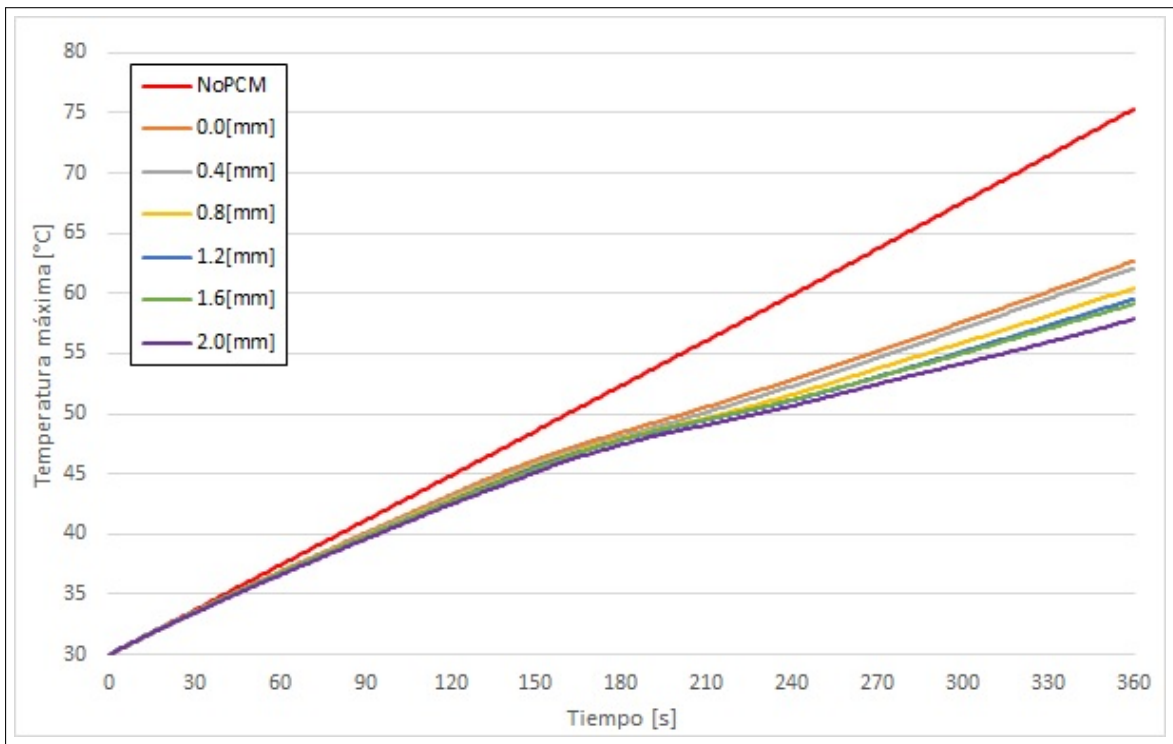


Figura A.47: Evolución de la temperatura máxima de las celdas, para una celda 26650, tasa de descarga 10C, temperatura inicial 30°C y NPG como PCM.

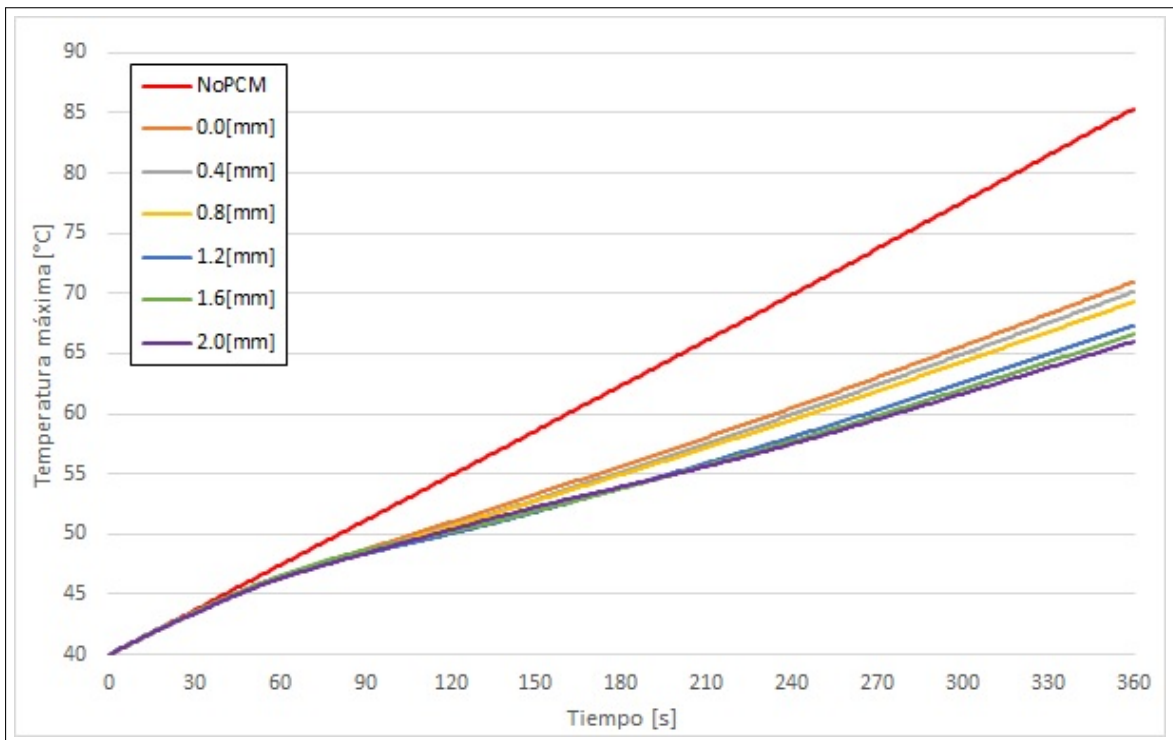
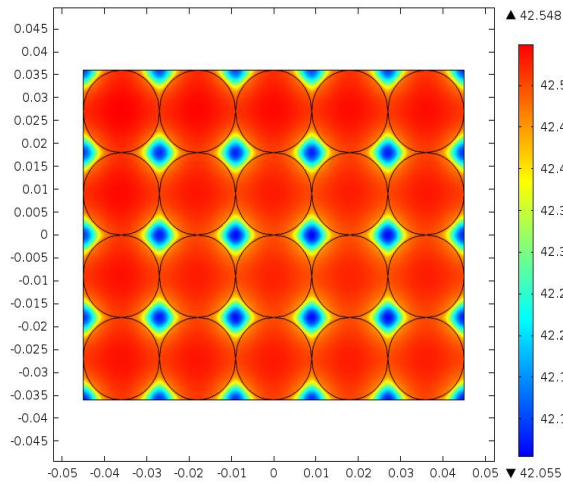


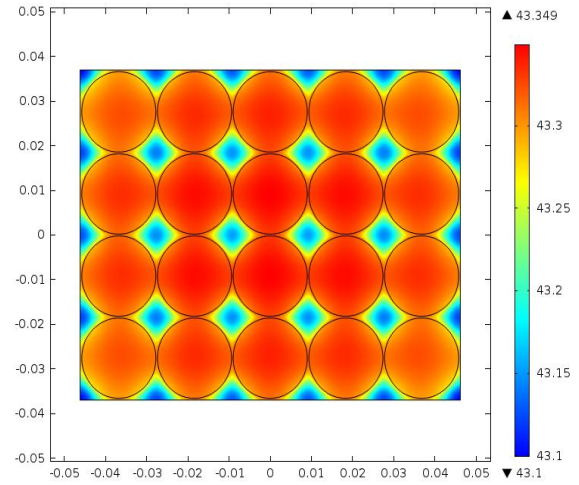
Figura A.48: Evolución de la temperatura máxima de las celdas, para una celda 26650, tasa de descarga 10C, temperatura inicial 40°C y NPG como PCM.

Apéndice **B**

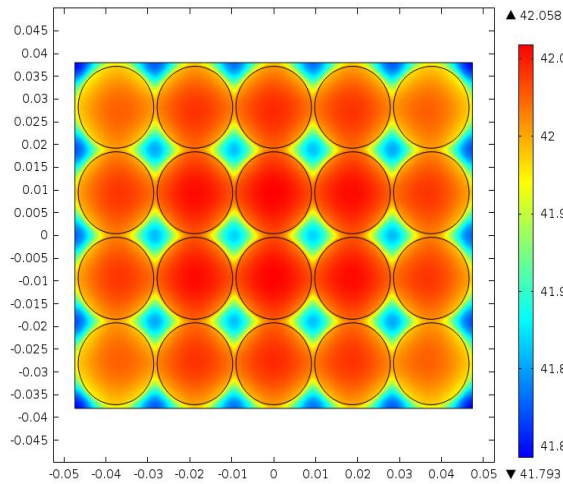
Distribuciones finales de temperatura para la
descarga



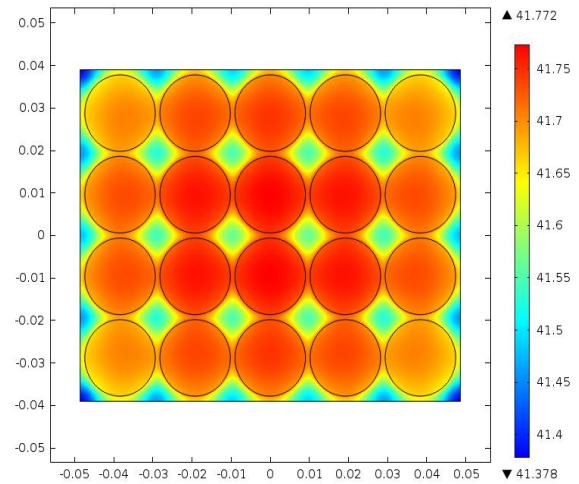
(a) $t = 2$ hr, $esp_{pcm} = 0.0$ mm.



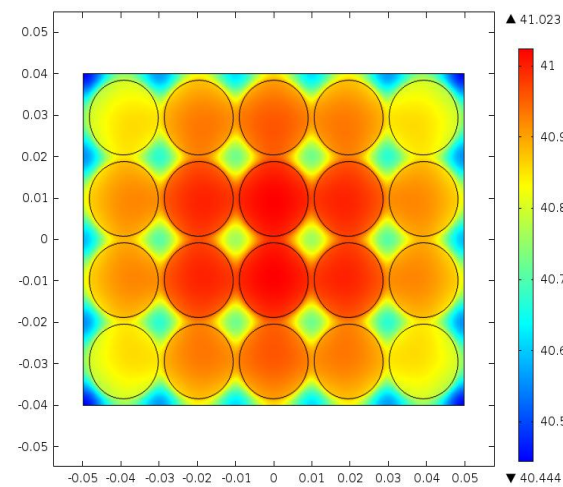
(b) $t = 2$ hr, $esp_{pcm} = 0.4$ mm.



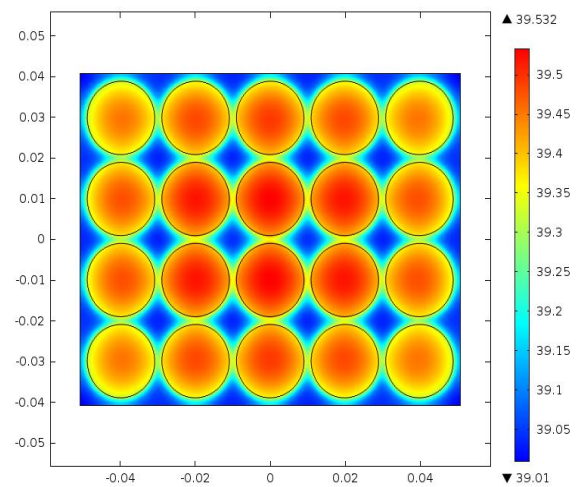
(c) $t = 2$ hr, $esp_{pcm} = 0.8$ mm.



(d) $t = 2$ hr, $esp_{pcm} = 1.2$ mm.

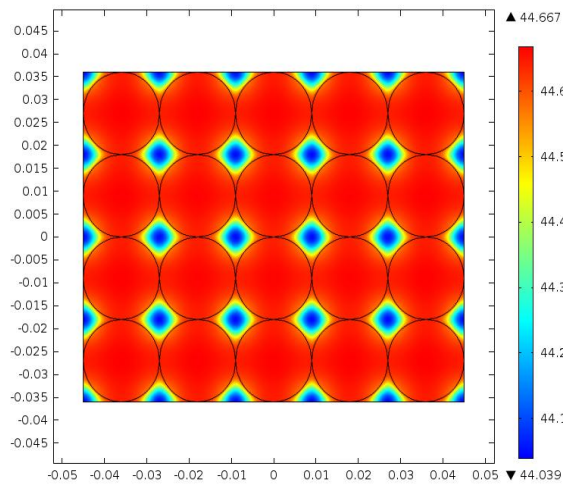


(e) $t = 2$ hr, $esp_{pcm} = 1.6$ mm.

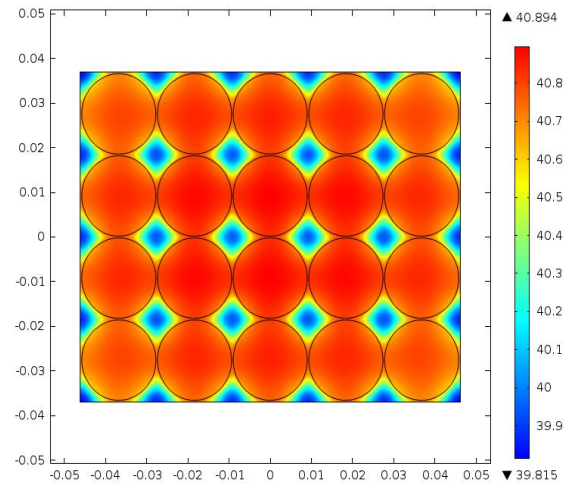


(f) $t = 2$ hr, $esp_{pcm} = 2.0$ mm.

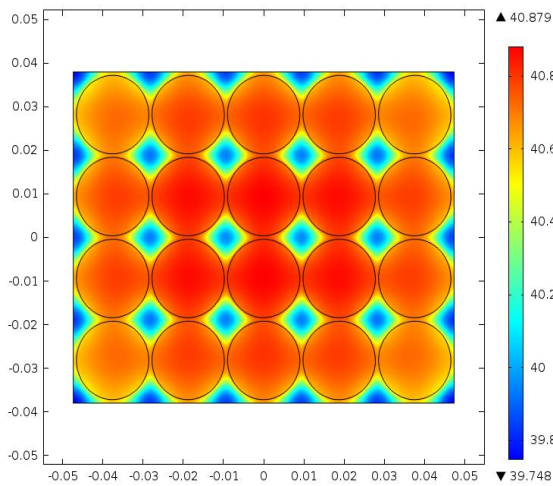
Figura B.1: Resultados para la celda 18650, tasa de descarga 0.5C, temperatura inicial 20°C y X40.



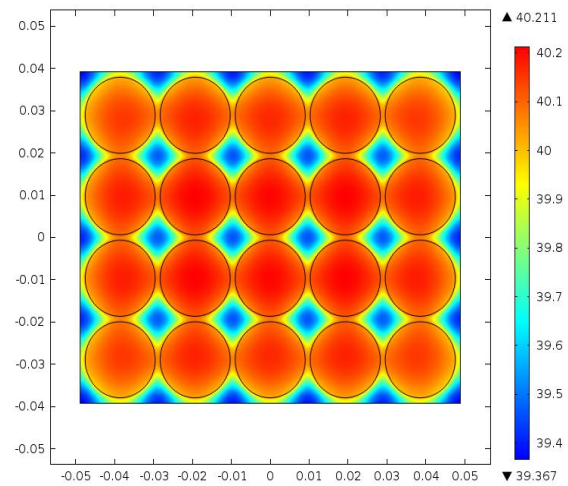
(a) $t = 2$ hr, $esp_{pcm} = 0.0$ mm.



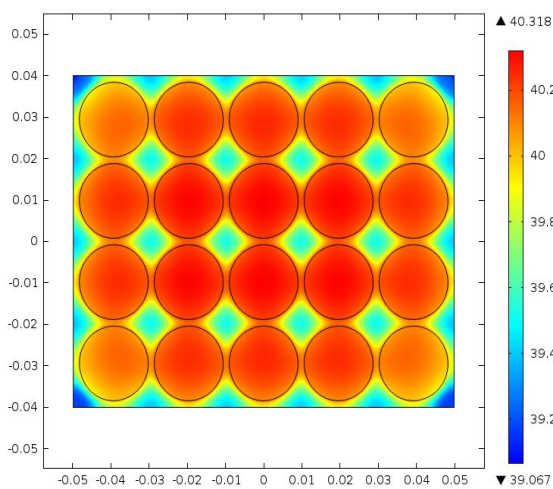
(b) $t = 2$ hr, $esp_{pcm} = 0.4$ mm.



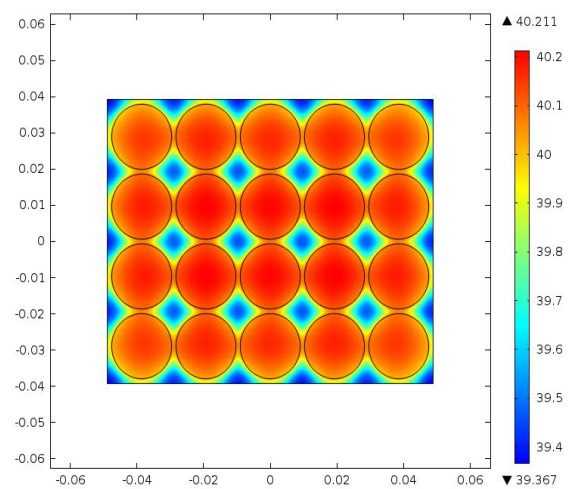
(c) $t = 2$ hr, $esp_{pcm} = 0.8$ mm.



(d) $t = 2$ hr, $esp_{pcm} = 1.2$ mm.

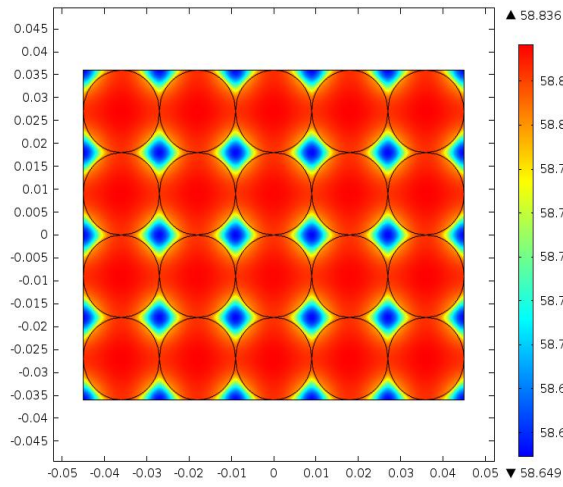


(e) $t = 2$ hr, $esp_{pcm} = 1.6$ mm.

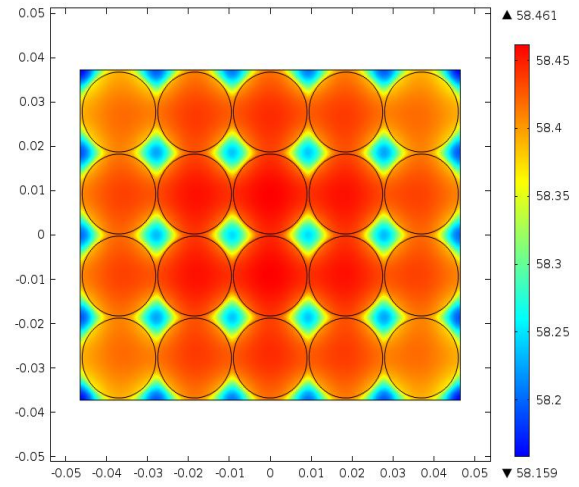


(f) $t = 2$ hr, $esp_{pcm} = 2.0$ mm.

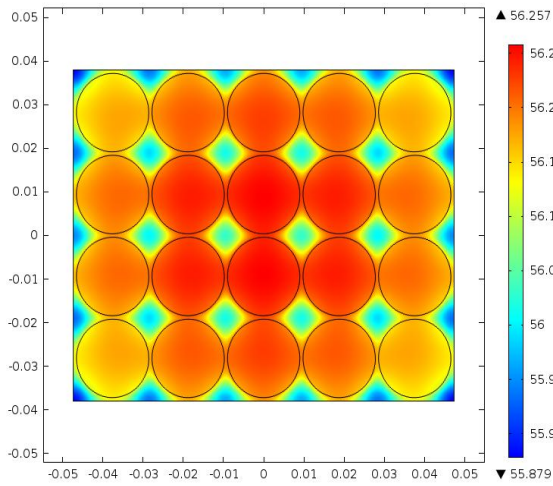
Figura B.2: Resultados para la celda 18650, tasa de descarga 0.5C, temperatura inicial 30°C y X40.



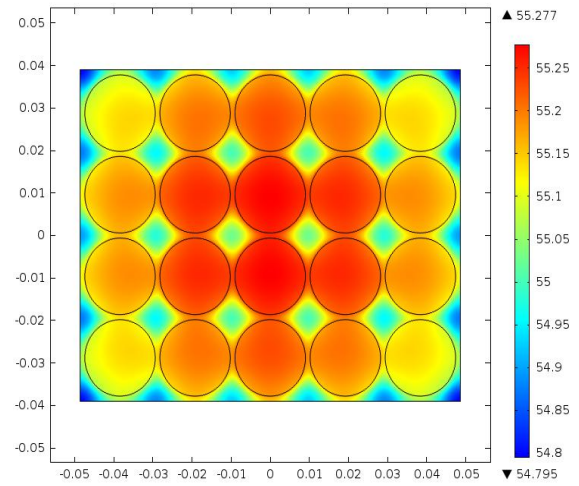
(a) $t = 2 \text{ hr}$, $\text{esp}_{pcm} = 0.0 \text{ mm}$.



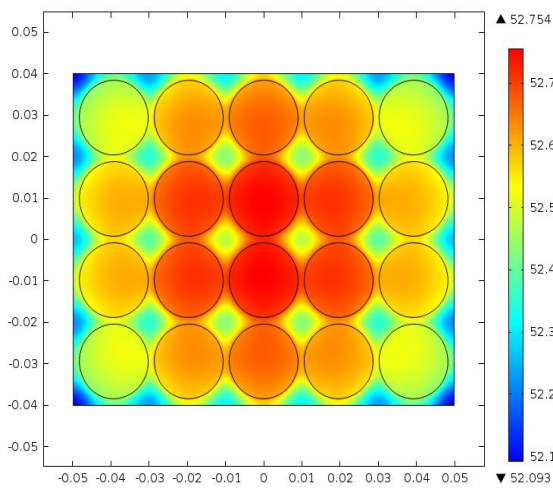
(b) $t = 2 \text{ hr}$, $\text{esp}_{pcm} = 0.4 \text{ mm}$.



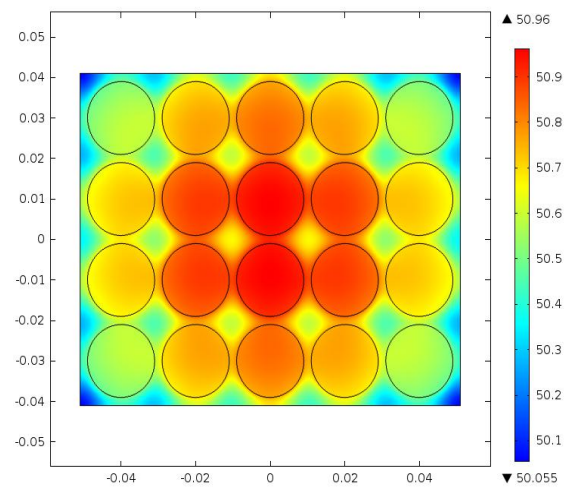
(c) $t = 2 \text{ hr}$, $\text{esp}_{pcm} = 0.8 \text{ mm}$.



(d) $t = 2 \text{ hr}$, $\text{esp}_{pcm} = 1.2 \text{ mm}$.

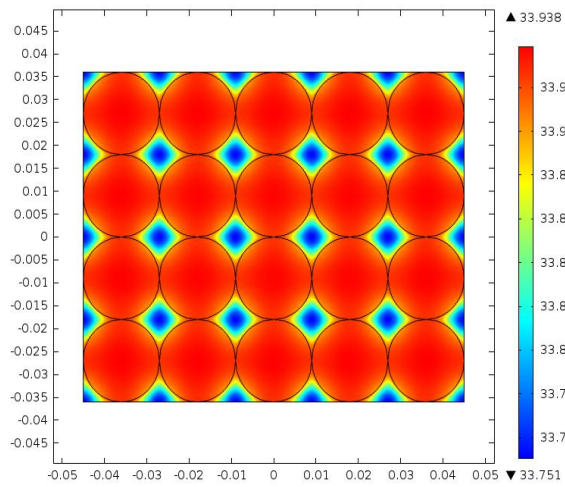


(e) $t = 2 \text{ hr}$, $\text{esp}_{pcm} = 1.6 \text{ mm}$.

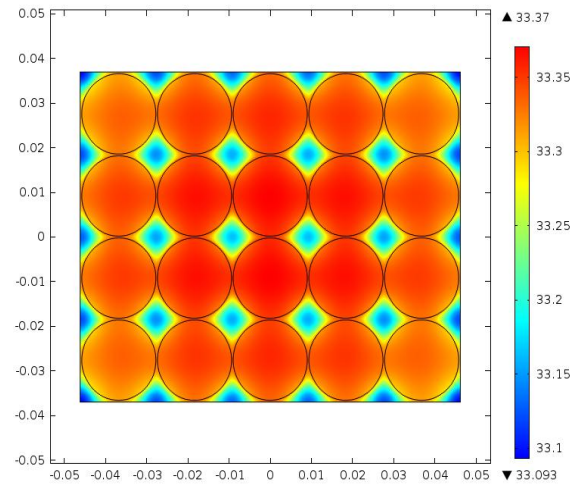


(f) $t = 2 \text{ hr}$, $\text{esp}_{pcm} = 2.0 \text{ mm}$.

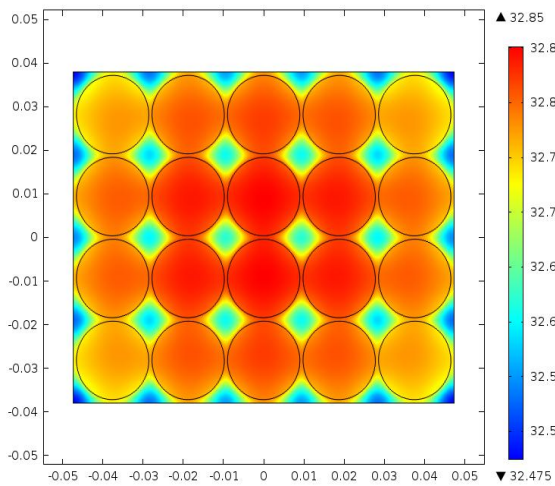
Figura B.3: Resultados para la celda 18650, tasa de descarga 0.5C, temperatura inicial 40°C y X40.



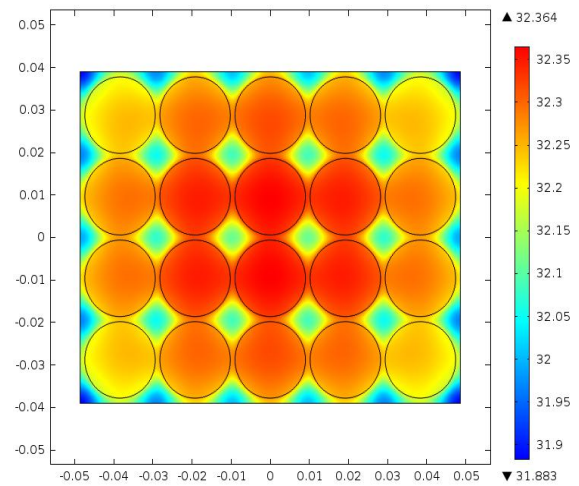
(a) $t = 1 \text{ hr}$, $\text{esp}_{pcm} = 0.0 \text{ mm}$.



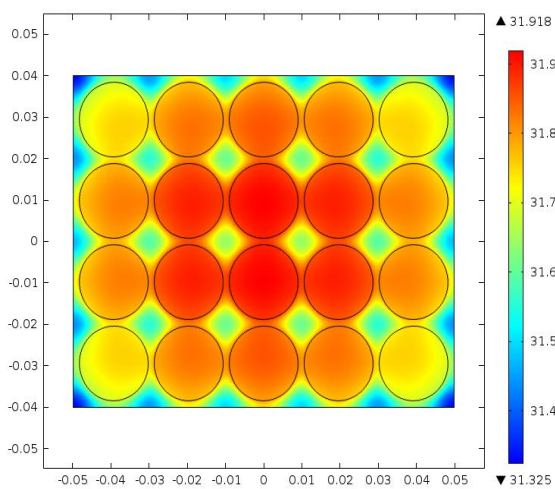
(b) $t = 1 \text{ hr}$, $\text{esp}_{pcm} = 0.4 \text{ mm}$.



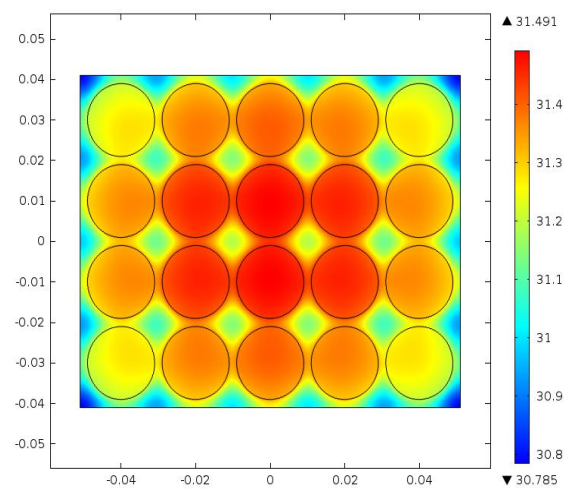
(c) $t = 1 \text{ hr}$, $\text{esp}_{pcm} = 0.8 \text{ mm}$.



(d) $t = 1 \text{ hr}$, $\text{esp}_{pcm} = 1.2 \text{ mm}$.

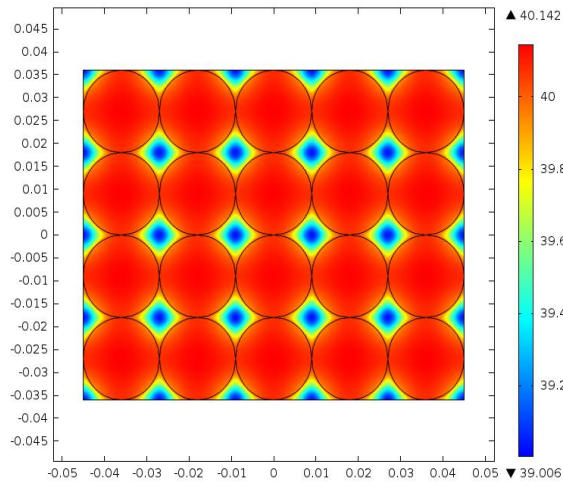


(e) $t = 1 \text{ hr}$, $\text{esp}_{pcm} = 1.6 \text{ mm}$.

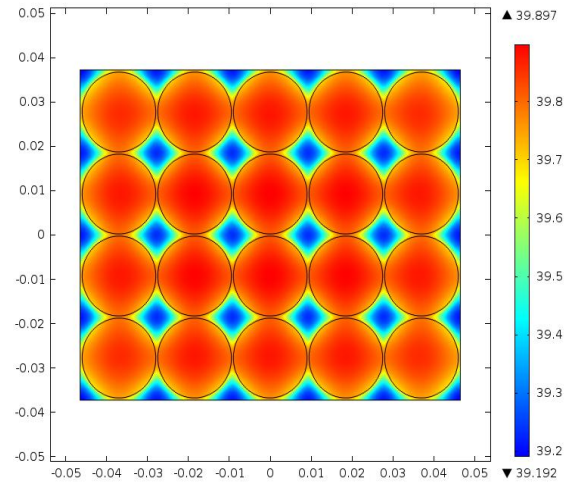


(f) $t = 1 \text{ hr}$, $\text{esp}_{pcm} = 2.0 \text{ mm}$.

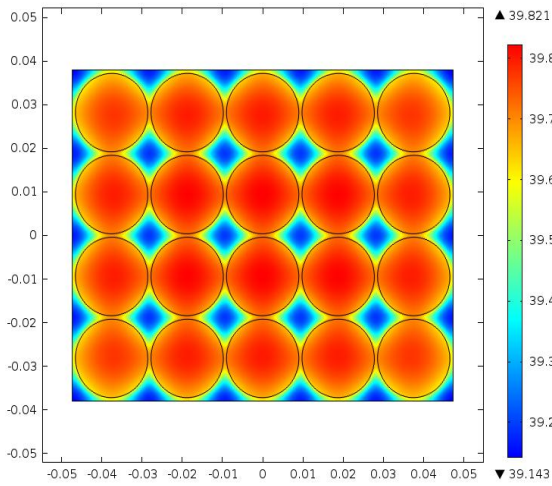
Figura B.4: Resultados para la celda 18650, tasa de descarga 1C, temperatura inicial 20°C y X40.



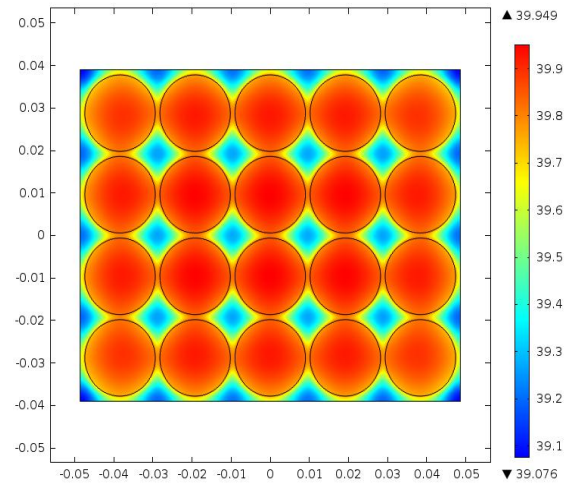
(a) $t = 1 \text{ hr}$, $\text{esp}_{pcm} = 0.0 \text{ mm}$.



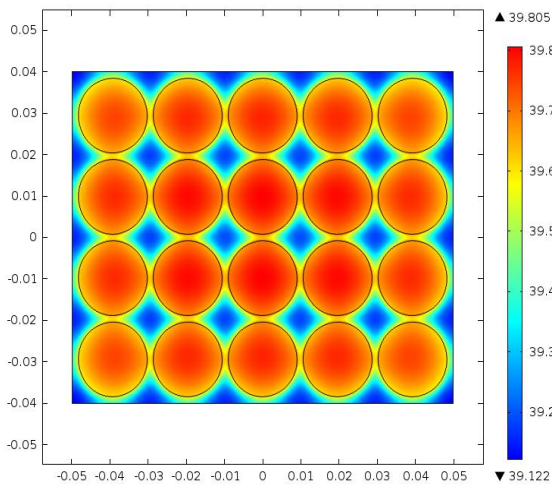
(b) $t = 1 \text{ hr}$, $\text{esp}_{pcm} = 0.4 \text{ mm}$.



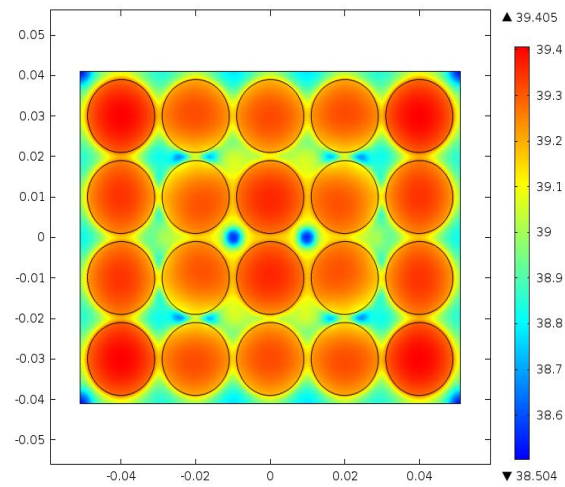
(c) $t = 1 \text{ hr}$, $\text{esp}_{pcm} = 0.8 \text{ mm}$.



(d) $t = 1 \text{ hr}$, $\text{esp}_{pcm} = 1.2 \text{ mm}$.

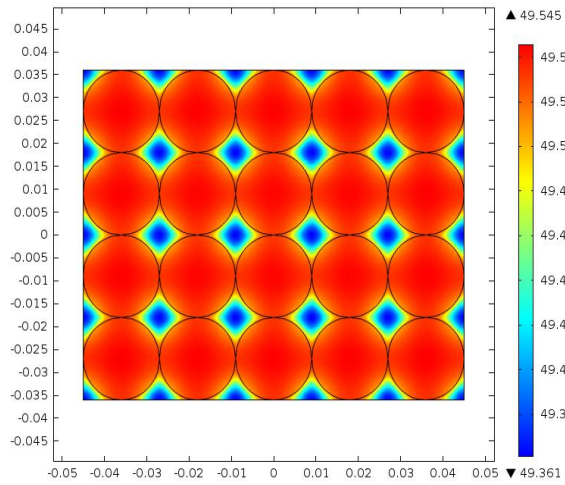


(e) $t = 1 \text{ hr}$, $\text{esp}_{pcm} = 1.6 \text{ mm}$.

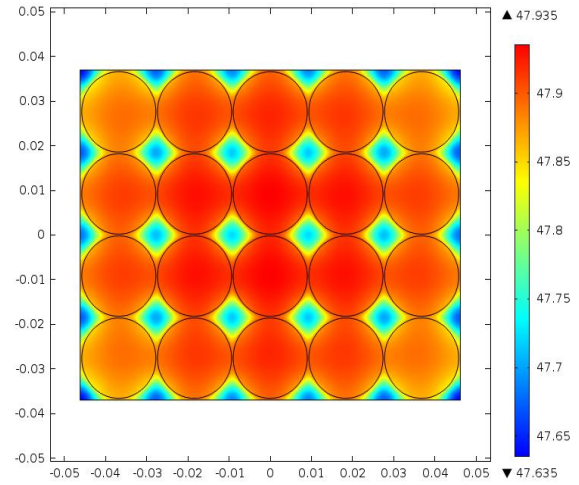


(f) $t = 1 \text{ hr}$, $\text{esp}_{pcm} = 2.0 \text{ mm}$.

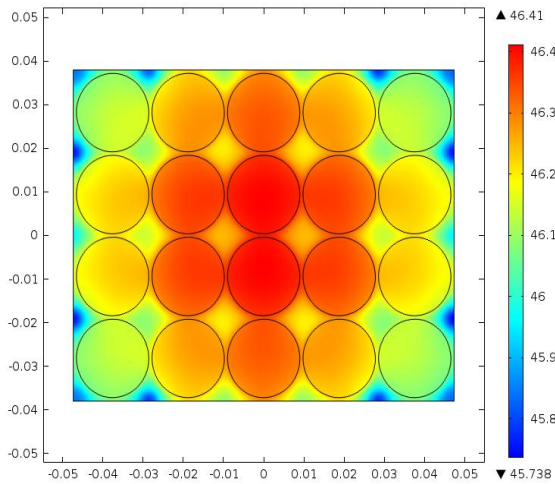
Figura B.5: Resultados para la celda 18650, tasa de descarga 1C, temperatura inicial 30°C y X40.



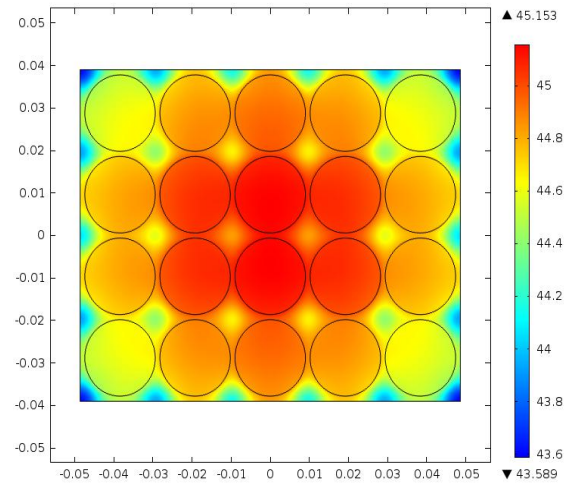
(a) $t = 1 \text{ hr}$, $\text{esp}_{pcm} = 0.0 \text{ mm}$.



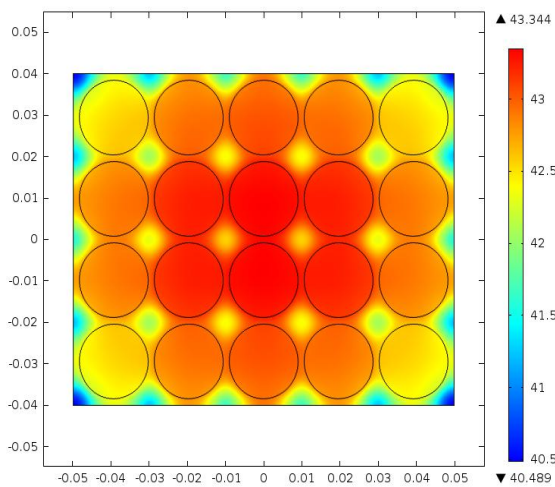
(b) $t = 1 \text{ hr}$, $\text{esp}_{pcm} = 0.4 \text{ mm}$.



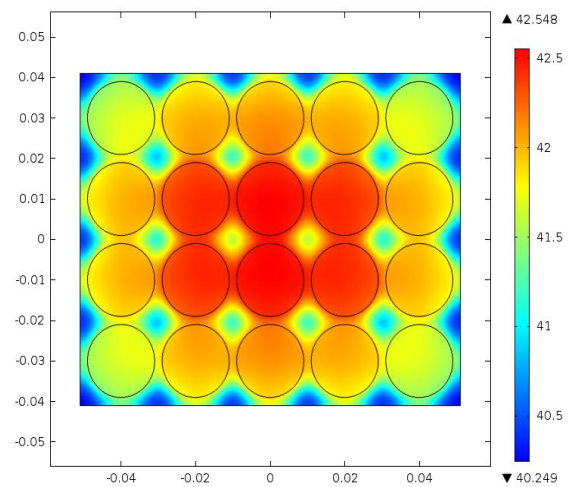
(c) $t = 1 \text{ hr}$, $\text{esp}_{pcm} = 0.8 \text{ mm}$.



(d) $t = 1 \text{ hr}$, $\text{esp}_{pcm} = 1.2 \text{ mm}$.

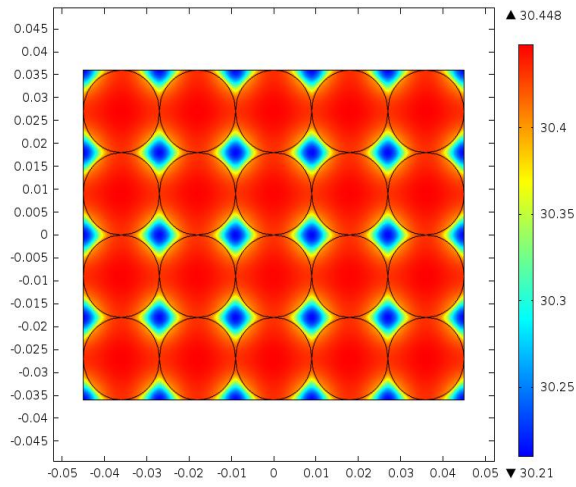


(e) $t = 1 \text{ hr}$, $\text{esp}_{pcm} = 1.6 \text{ mm}$.

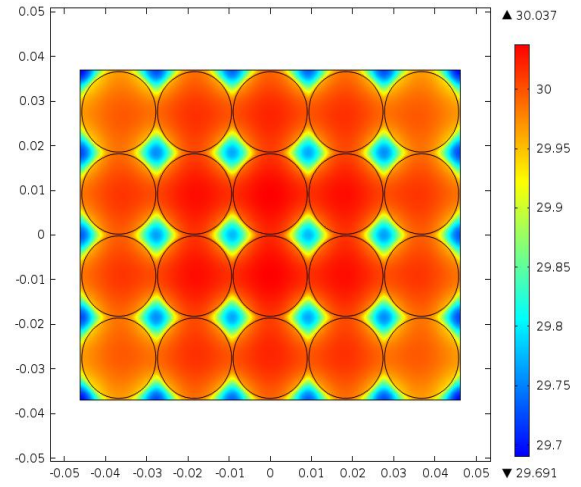


(f) $t = 1 \text{ hr}$, $\text{esp}_{pcm} = 2.0 \text{ mm}$.

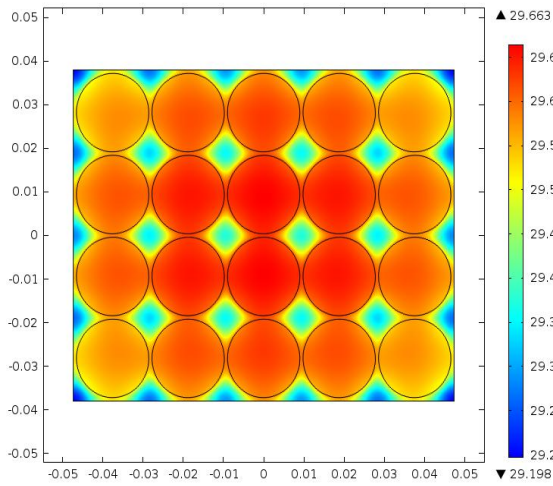
Figura B.6: Resultados para la celda 18650, tasa de descarga 1C, temperatura inicial 40°C y X40.



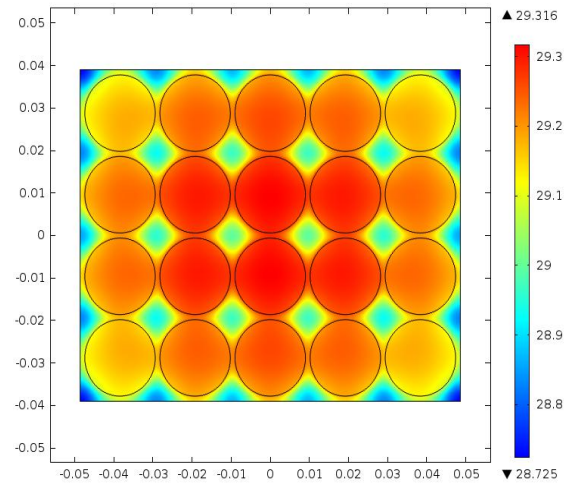
(a) $t = 30 \text{ min}$, $\text{esp}_{pcm} = 0.0 \text{ mm}$.



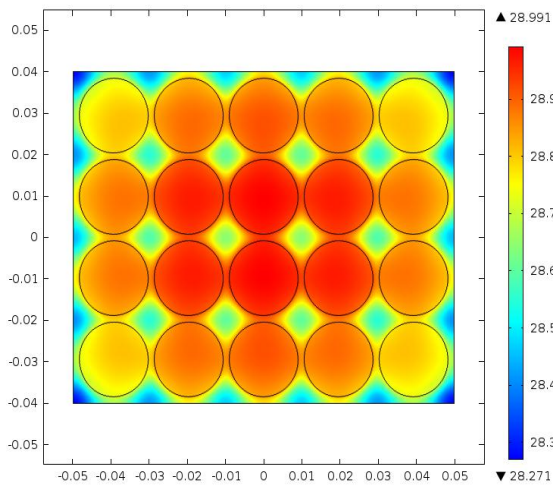
(b) $t = 30 \text{ min}$, $\text{esp}_{pcm} = 0.4 \text{ mm}$.



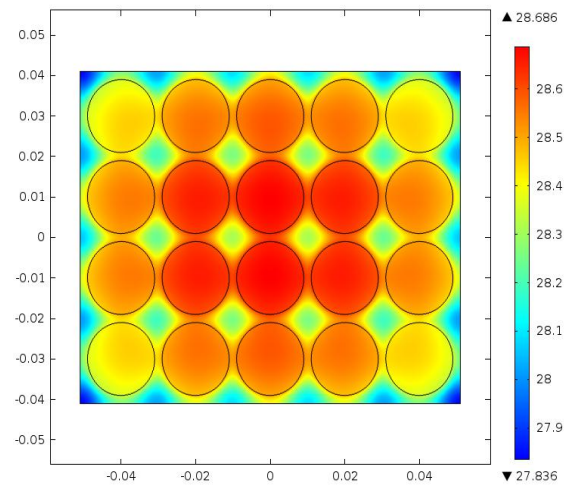
(c) $t = 30 \text{ min}$, $\text{esp}_{pcm} = 0.8 \text{ mm}$.



(d) $t = 30 \text{ min}$, $\text{esp}_{pcm} = 1.2 \text{ mm}$.

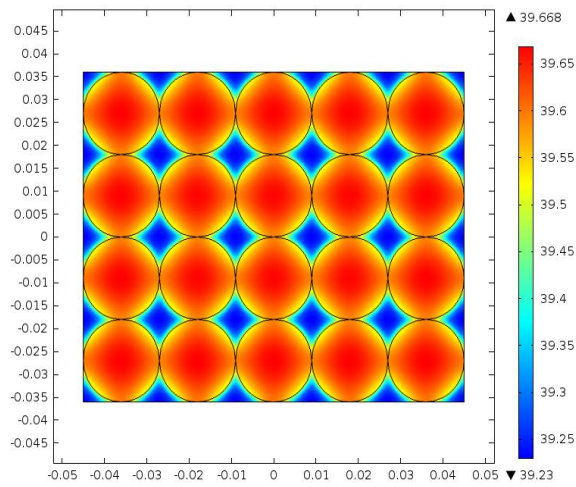


(e) $t = 30 \text{ min}$, $\text{esp}_{pcm} = 1.6 \text{ mm}$.

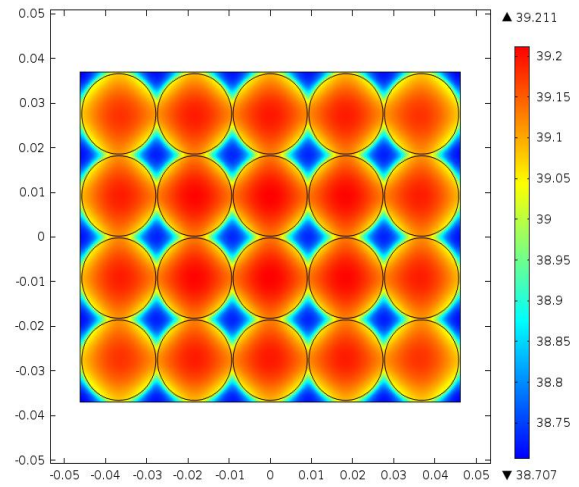


(f) $t = 30 \text{ min}$, $\text{esp}_{pcm} = 2.0 \text{ mm}$.

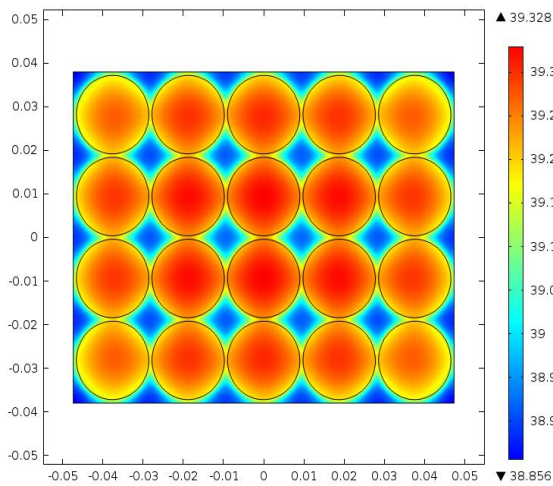
Figura B.7: Resultados para la celda 18650, tasa de descarga 2C, temperatura inicial 20°C y X40.



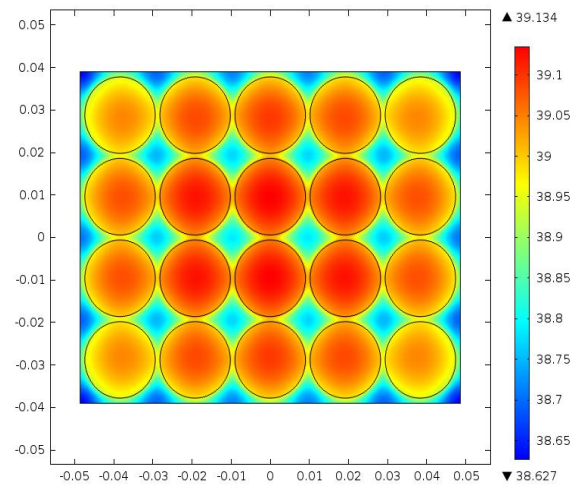
(a) $t = 30 \text{ min}$, $\text{esp}_{pcm} = 0.0 \text{ mm}$.



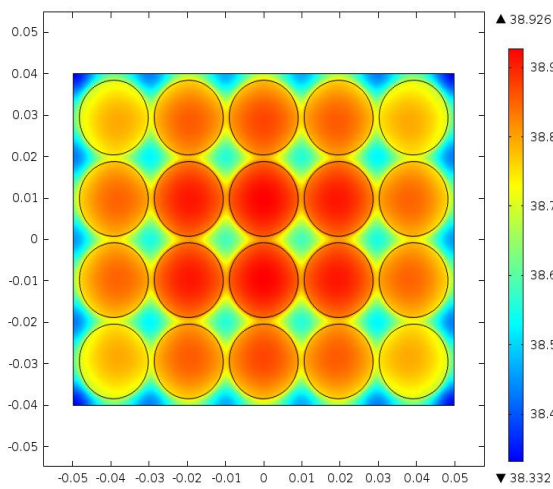
(b) $t = 30 \text{ min}$, $\text{esp}_{pcm} = 0.4 \text{ mm}$.



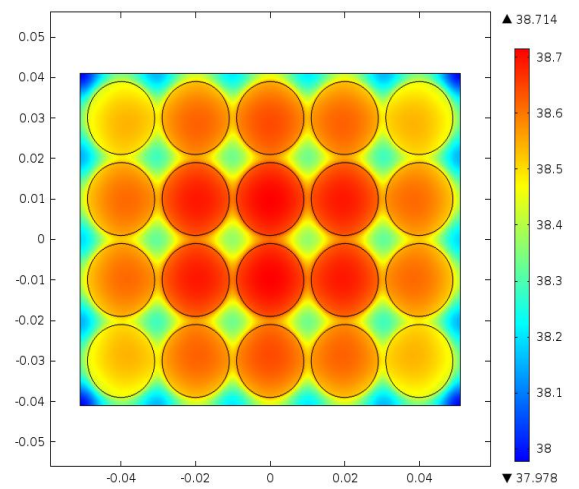
(c) $t = 30 \text{ min}$, $\text{esp}_{pcm} = 0.8 \text{ mm}$.



(d) $t = 30 \text{ min}$, $\text{esp}_{pcm} = 1.2 \text{ mm}$.

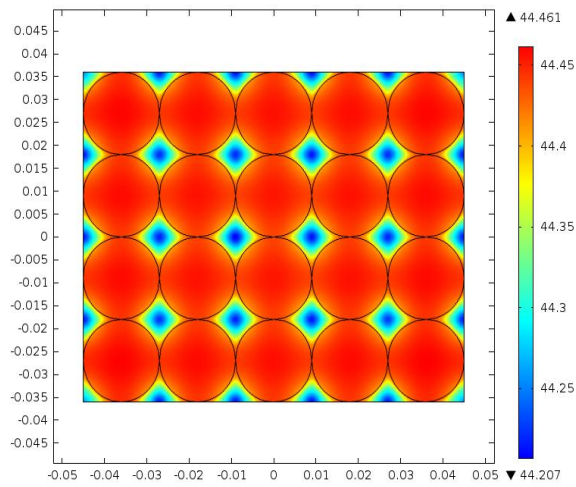


(e) $t = 30 \text{ min}$, $\text{esp}_{pcm} = 1.6 \text{ mm}$.

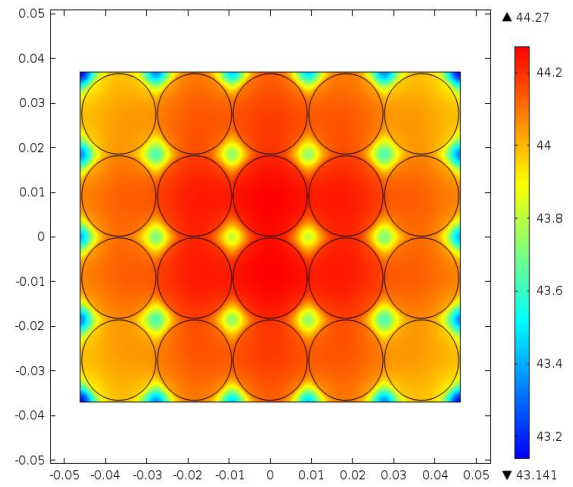


(f) $t = 30 \text{ min}$, $\text{esp}_{pcm} = 2.0 \text{ mm}$.

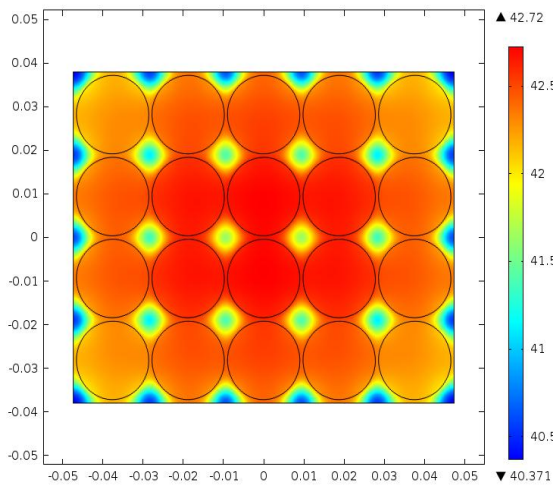
Figura B.8: Resultados para la celda 18650, tasa de descarga 2C, temperatura inicial 30°C y X40.



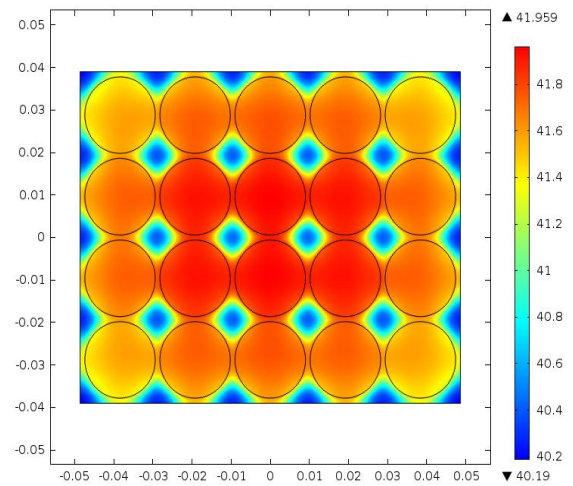
(a) $t = 30 \text{ min}$, $\text{esp}_{pcm} = 0.0 \text{ mm}$.



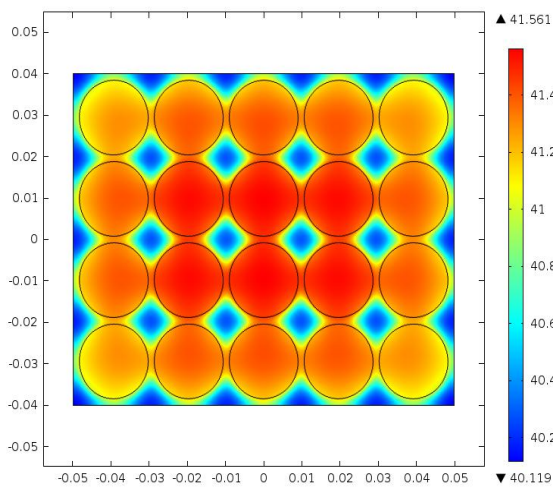
(b) $t = 30 \text{ min}$, $\text{esp}_{pcm} = 0.4 \text{ mm}$.



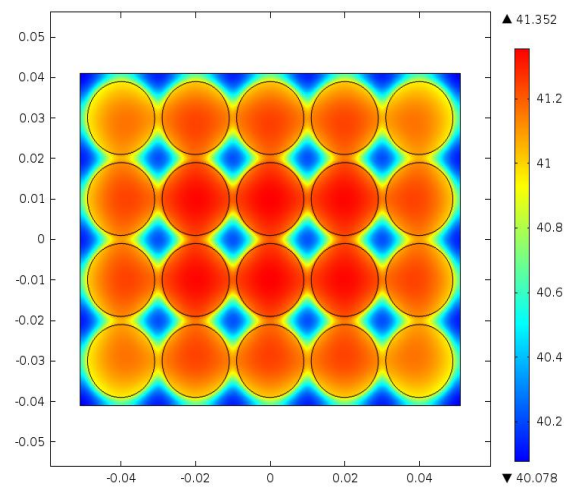
(c) $t = 30 \text{ min}$, $\text{esp}_{pcm} = 0.8 \text{ mm}$.



(d) $t = 30 \text{ min}$, $\text{esp}_{pcm} = 1.2 \text{ mm}$.

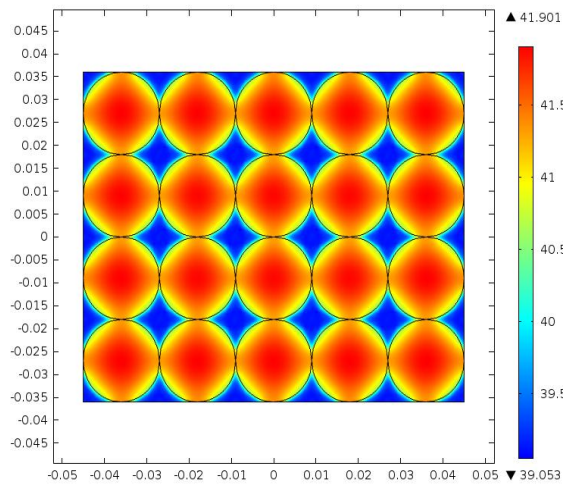


(e) $t = 30 \text{ min}$, $\text{esp}_{pcm} = 1.6 \text{ mm}$.

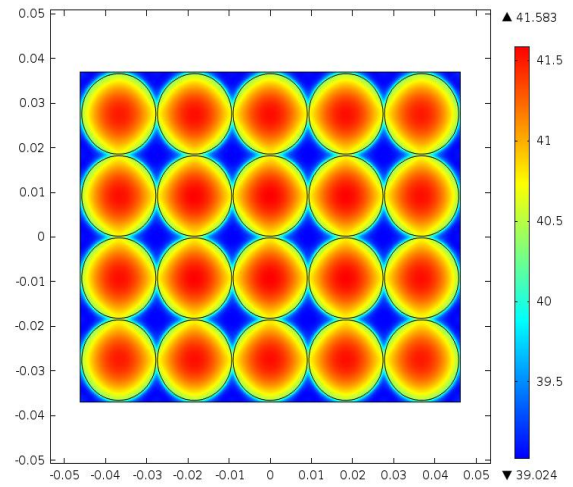


(f) $t = 30 \text{ min}$, $\text{esp}_{pcm} = 2.0 \text{ mm}$.

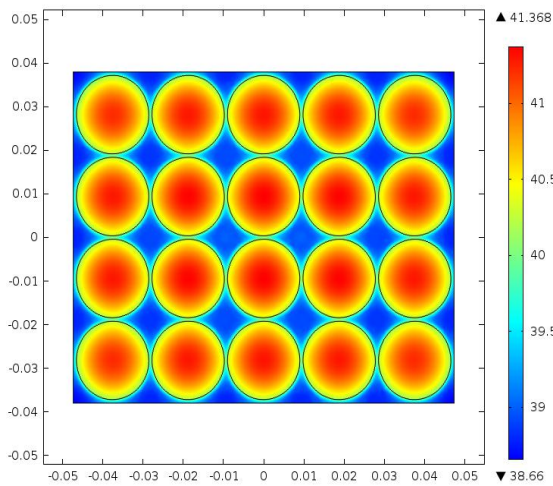
Figura B.9: Resultados para la celda 18650, tasa de descarga 2C, temperatura inicial 40°C y X40.



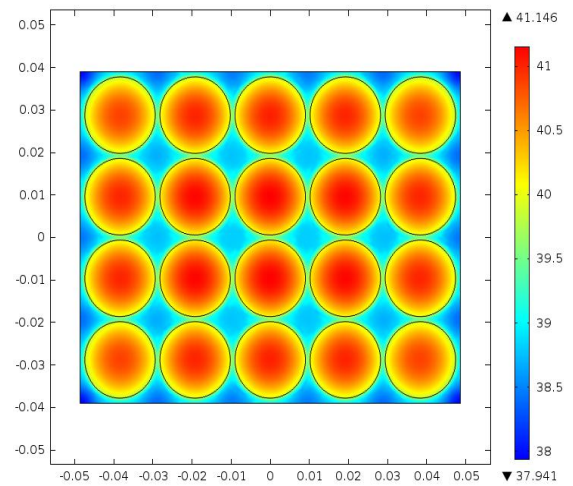
(a) $t = 6 \text{ min}$, $\text{esp}_{pcm} = 0.0 \text{ mm}$.



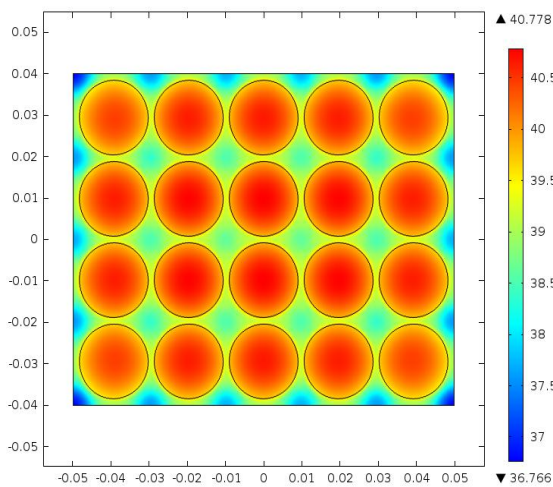
(b) $t = 6 \text{ min}$, $\text{esp}_{pcm} = 0.4 \text{ mm}$.



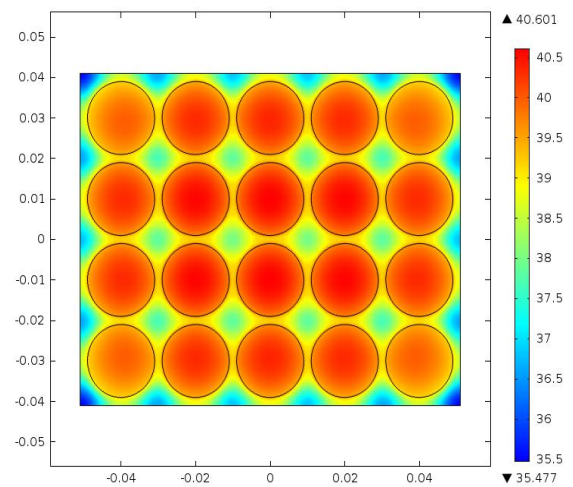
(c) $t = 6 \text{ min}$, $\text{esp}_{pcm} = 0.8 \text{ mm}$.



(d) $t = 6 \text{ min}$, $\text{esp}_{pcm} = 1.2 \text{ mm}$.

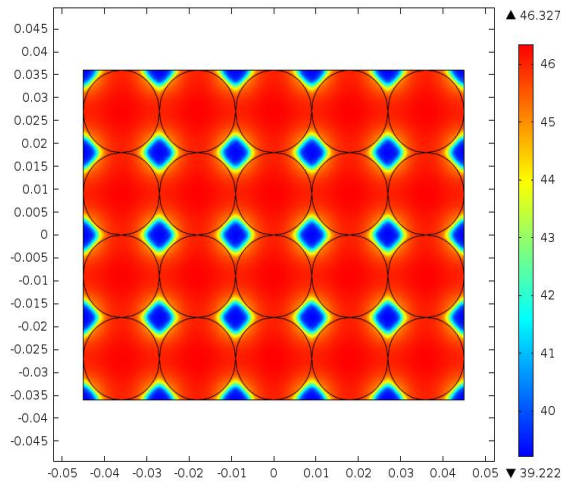


(e) $t = 6 \text{ min}$, $\text{esp}_{pcm} = 1.6 \text{ mm}$.

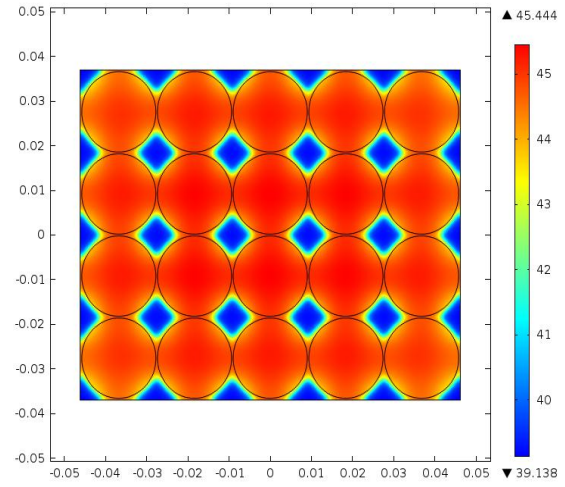


(f) $t = 6 \text{ min}$, $\text{esp}_{pcm} = 2.0 \text{ mm}$.

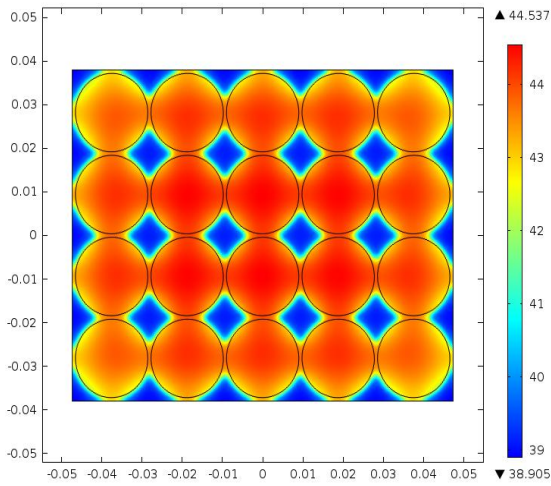
Figura B.10: Resultados para la celda 18650, tasa de descarga 10C, temperatura inicial 20°C y X40.



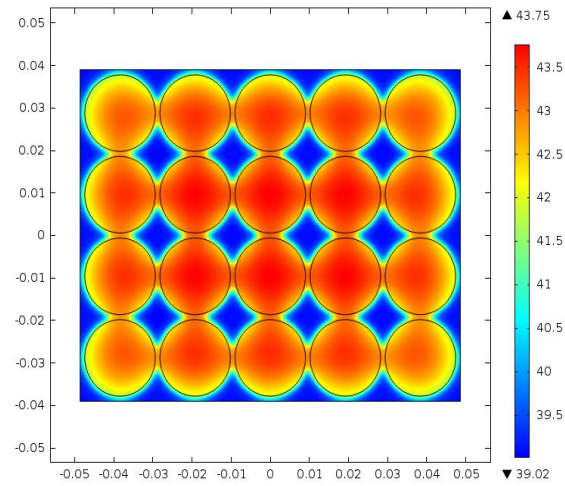
(a) $t = 6 \text{ min}$, $\text{esp}_{pcm} = 0.0 \text{ mm}$.



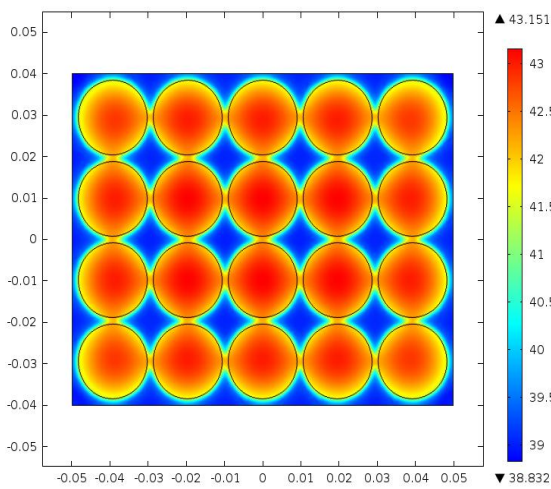
(b) $t = 6 \text{ min}$, $\text{esp}_{pcm} = 0.4 \text{ mm}$.



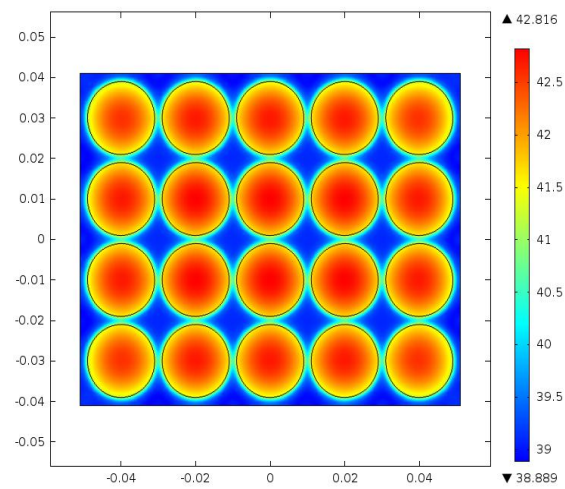
(c) $t = 6 \text{ min}$, $\text{esp}_{pcm} = 0.8 \text{ mm}$.



(d) $t = 6 \text{ min}$, $\text{esp}_{pcm} = 1.2 \text{ mm}$.

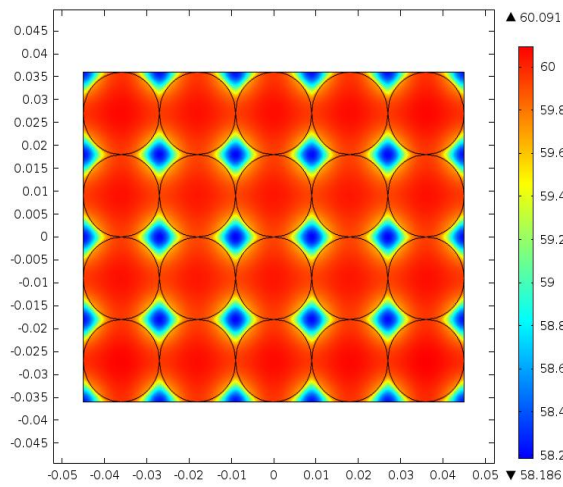


(e) $t = 6 \text{ min}$, $\text{esp}_{pcm} = 1.6 \text{ mm}$.

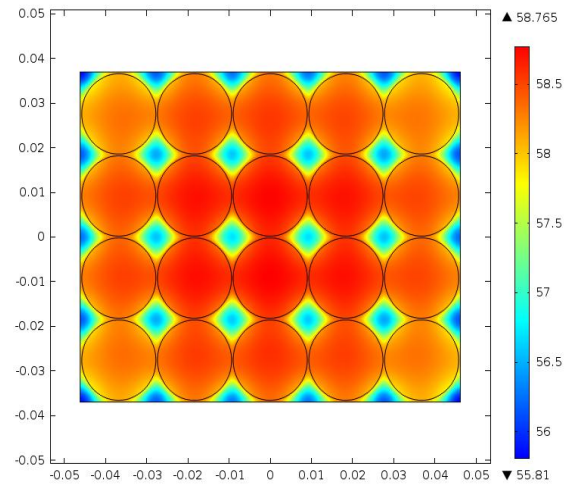


(f) $t = 6 \text{ min}$, $\text{esp}_{pcm} = 2.0 \text{ mm}$.

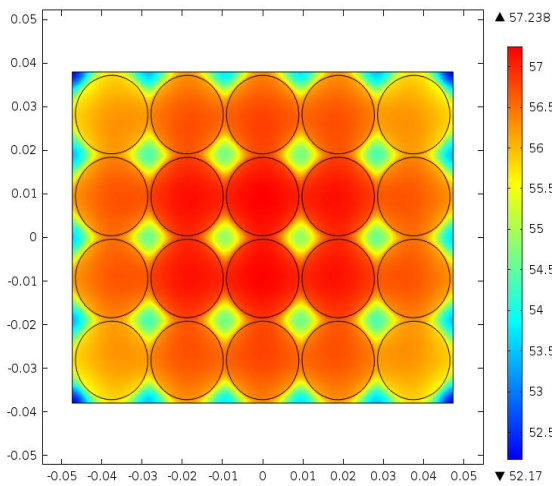
Figura B.11: Resultados para la celda 18650, tasa de descarga 10C, temperatura inicial 30°C y X40.



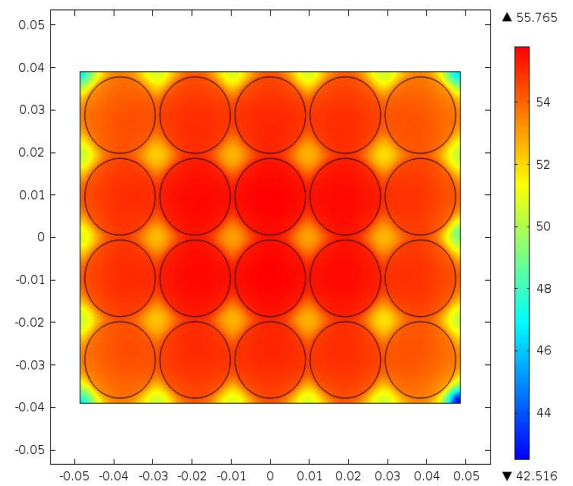
(a) $t = 6 \text{ min}$, $\text{esp}_{pcm} = 0.0 \text{ mm}$.



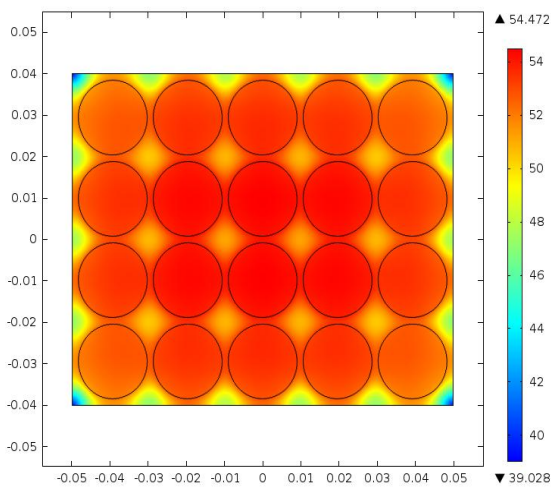
(b) $t = 6 \text{ min}$, $\text{esp}_{pcm} = 0.4 \text{ mm}$.



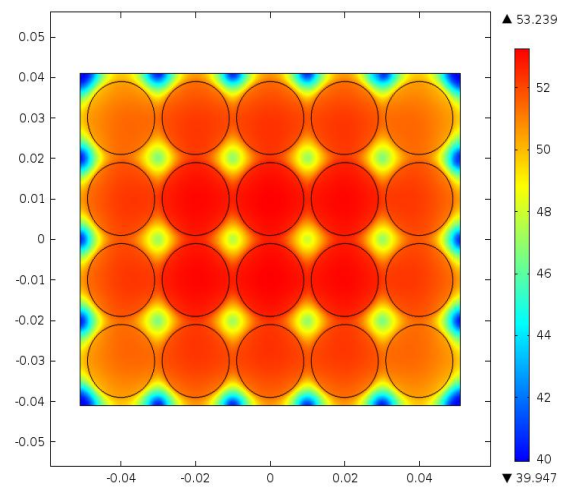
(c) $t = 6 \text{ min}$, $\text{esp}_{pcm} = 0.8 \text{ mm}$.



(d) $t = 6 \text{ min}$, $\text{esp}_{pcm} = 1.2 \text{ mm}$.

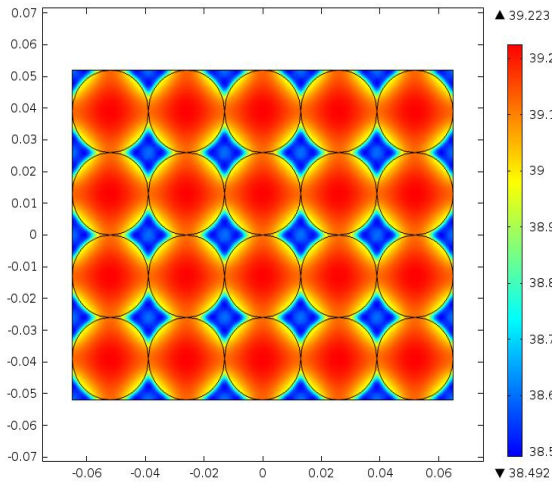


(e) $t = 6 \text{ min}$, $\text{esp}_{pcm} = 1.6 \text{ mm}$.

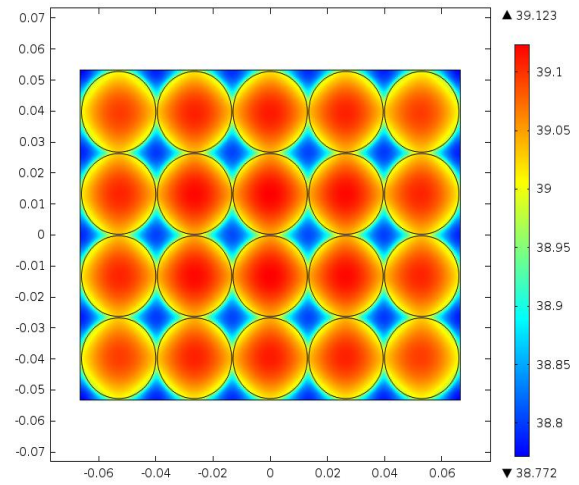


(f) $t = 6 \text{ min}$, $\text{esp}_{pcm} = 2.0 \text{ mm}$.

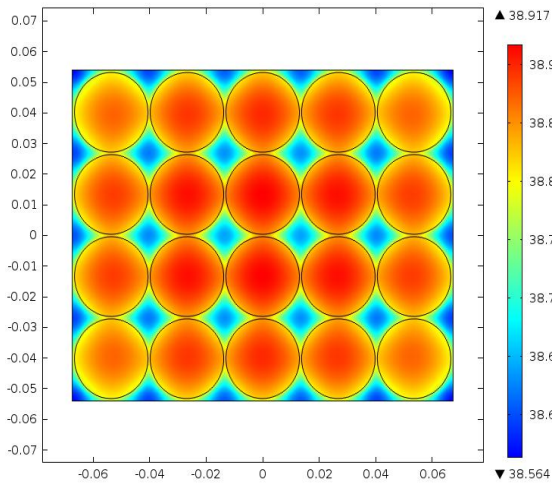
Figura B.12: Resultados para la celda 18650, tasa de descarga 10C, temperatura inicial 40°C y X40.



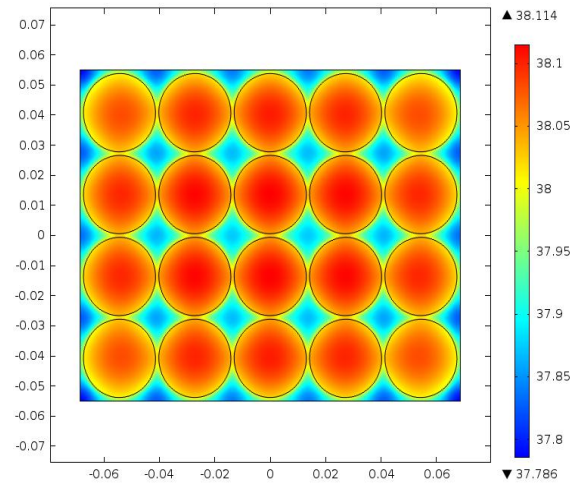
(a) $t = 2 \text{ hr}$, $\text{esp}_{pcm} = 0.0 \text{ mm}$.



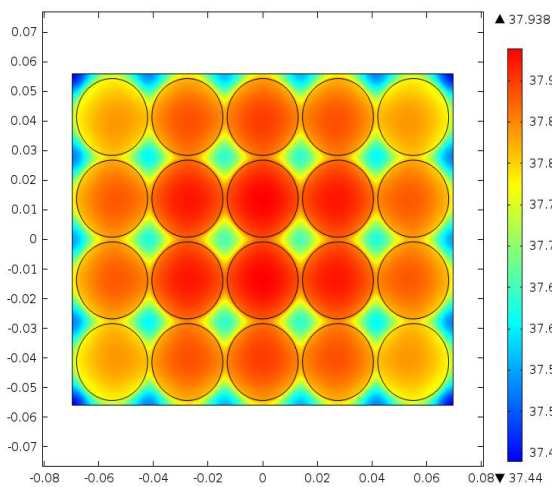
(b) $t = 2 \text{ hr}$, $\text{esp}_{pcm} = 0.4 \text{ mm}$.



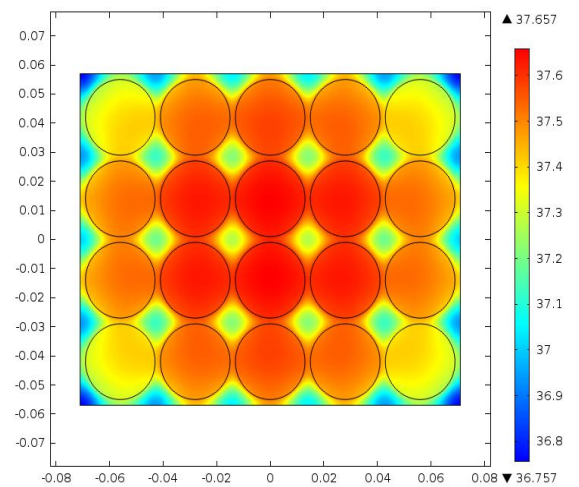
(c) $t = 2 \text{ hr}$, $\text{esp}_{pcm} = 0.8 \text{ mm}$.



(d) $t = 2 \text{ hr}$, $\text{esp}_{pcm} = 1.2 \text{ mm}$.

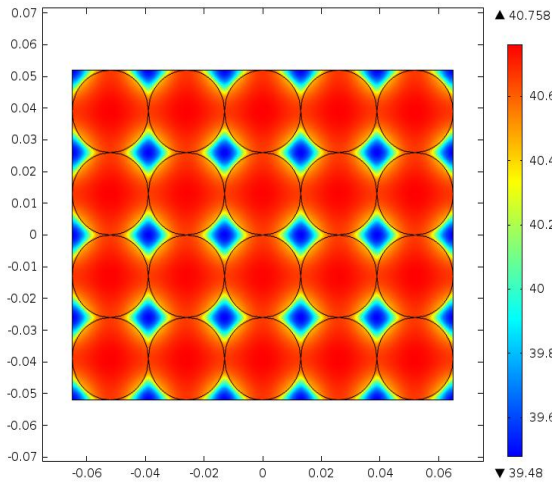


(e) $t = 2 \text{ hr}$, $\text{esp}_{pcm} = 1.6 \text{ mm}$.

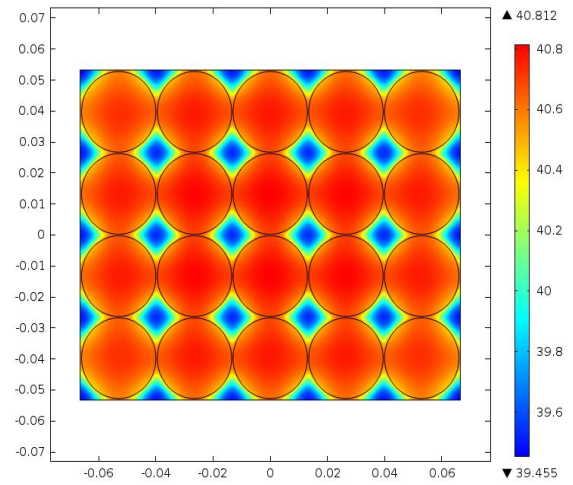


(f) $t = 2 \text{ hr}$, $\text{esp}_{pcm} = 2.0 \text{ mm}$.

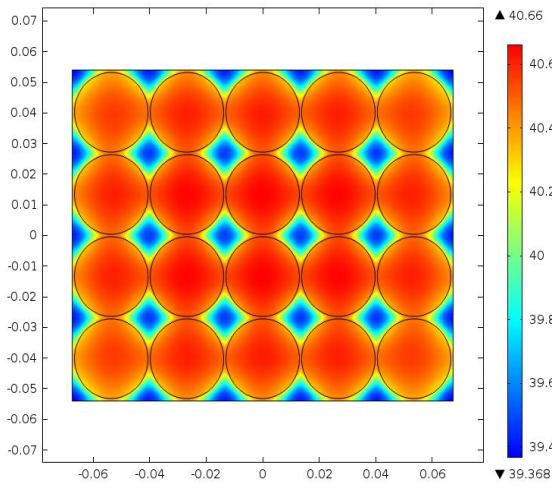
Figura B.13: Resultados para la celda 26650, tasa de descarga 0.5C, temperatura inicial 20°C y X40.



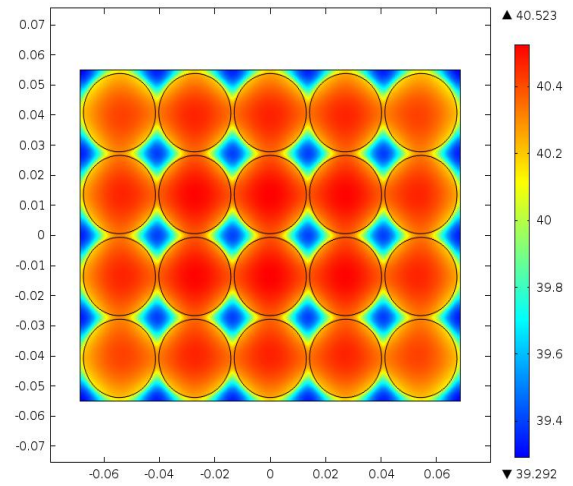
(a) $t = 2 \text{ hr}$, $\text{esp}_{pcm} = 0.0 \text{ mm}$.



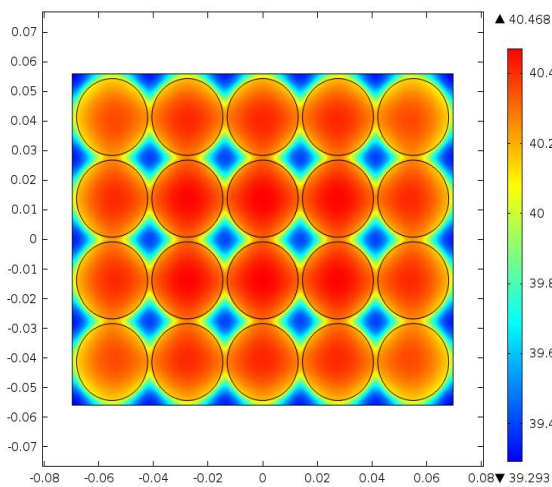
(b) $t = 2 \text{ hr}$, $\text{esp}_{pcm} = 0.4 \text{ mm}$.



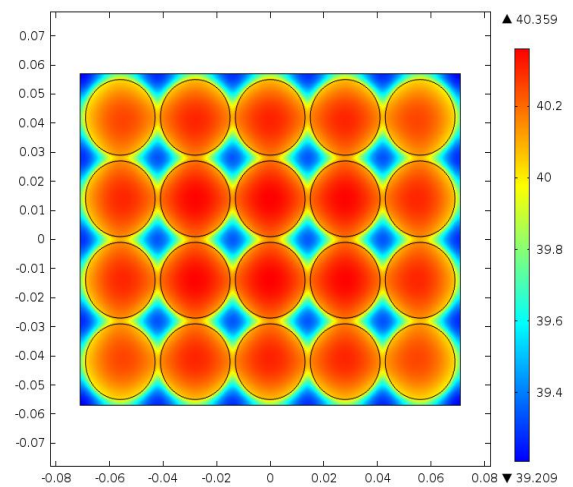
(c) $t = 2 \text{ hr}$, $\text{esp}_{pcm} = 0.8 \text{ mm}$.



(d) $t = 2 \text{ hr}$, $\text{esp}_{pcm} = 1.2 \text{ mm}$.

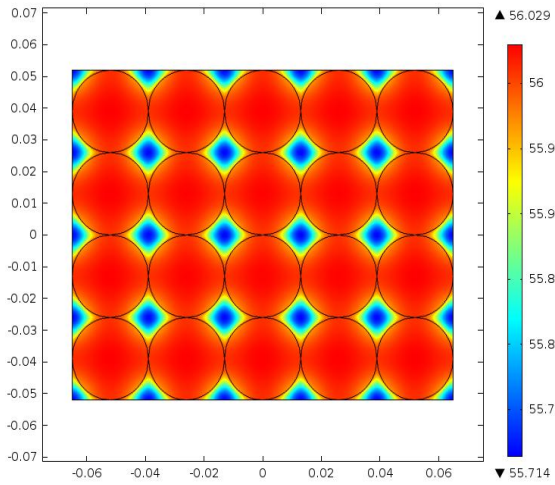


(e) $t = 2 \text{ hr}$, $\text{esp}_{pcm} = 1.6 \text{ mm}$.

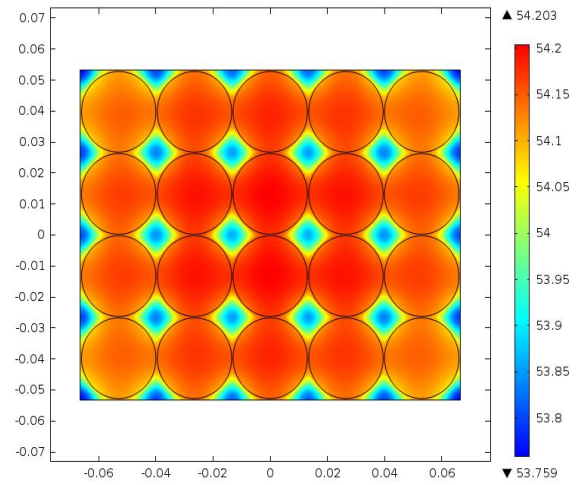


(f) $t = 2 \text{ hr}$, $\text{esp}_{pcm} = 2.0 \text{ mm}$.

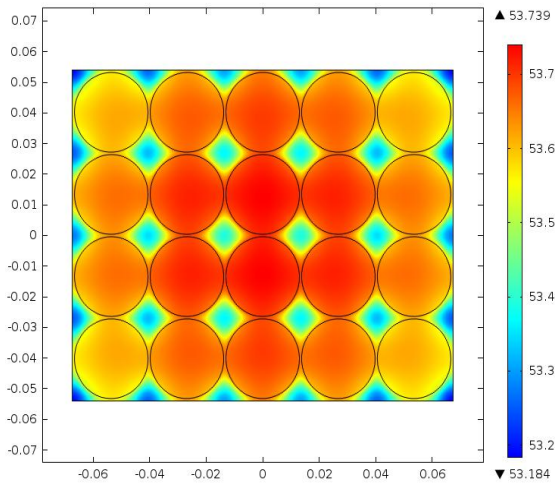
Figura B.14: Resultados para la celda 26650, tasa de descarga 0.5C, temperatura inicial 30°C y X40.



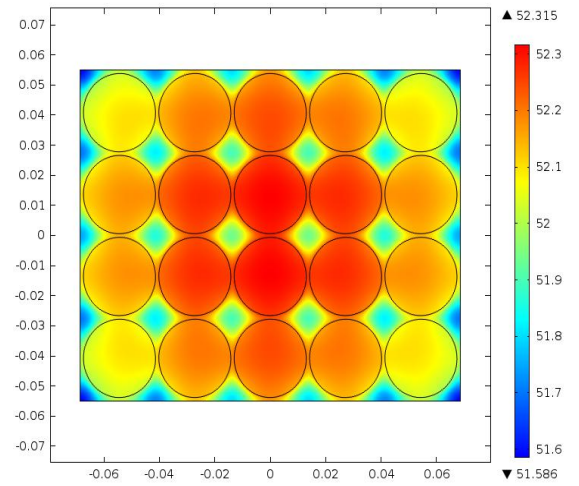
(a) $t = 2 \text{ hr}$, $\text{esp}_{pcm} = 0.0 \text{ mm}$.



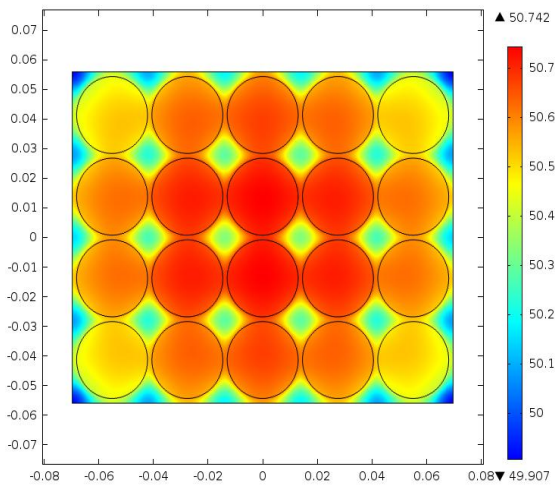
(b) $t = 2 \text{ hr}$, $\text{esp}_{pcm} = 0.4 \text{ mm}$.



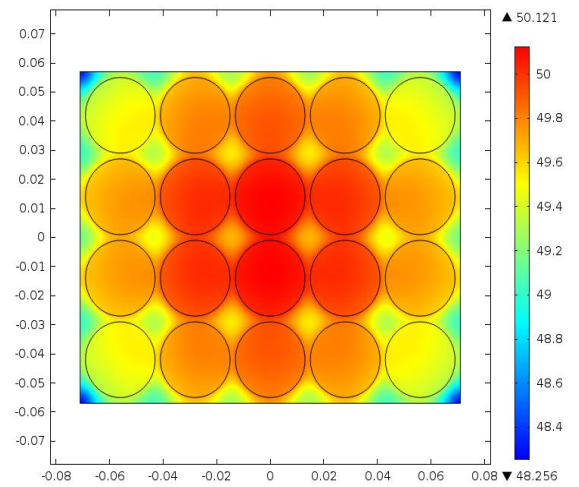
(c) $t = 2 \text{ hr}$, $\text{esp}_{pcm} = 0.8 \text{ mm}$.



(d) $t = 2 \text{ hr}$, $\text{esp}_{pcm} = 1.2 \text{ mm}$.

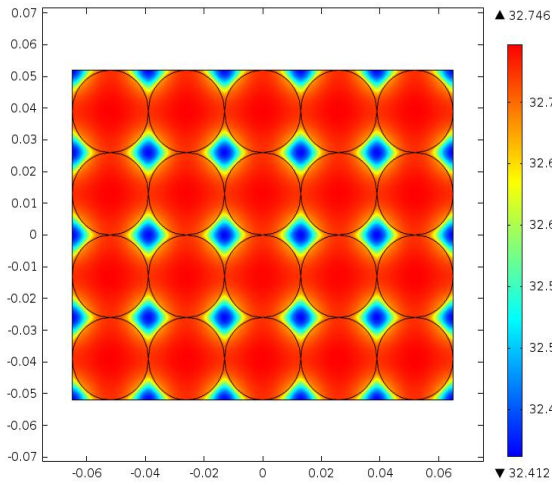


(e) $t = 2 \text{ hr}$, $\text{esp}_{pcm} = 1.6 \text{ mm}$.

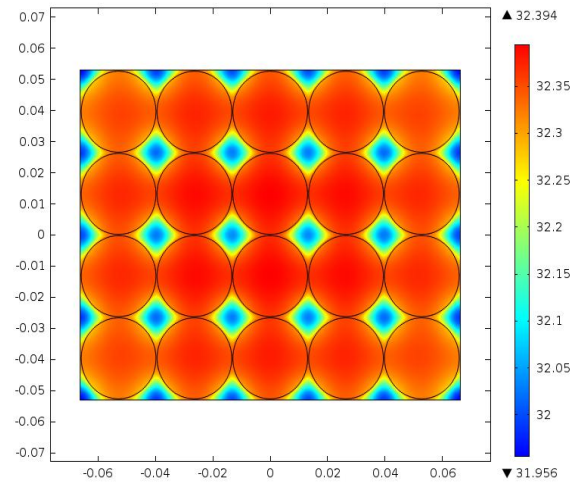


(f) $t = 2 \text{ hr}$, $\text{esp}_{pcm} = 2.0 \text{ mm}$.

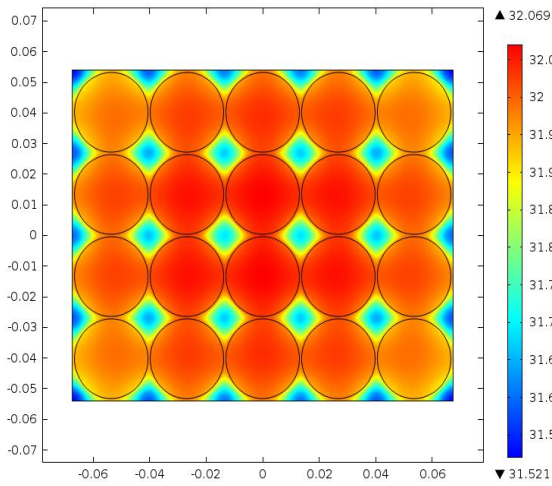
Figura B.15: Resultados para la celda 26650, tasa de descarga 0.5C, temperatura inicial 40°C y X40.



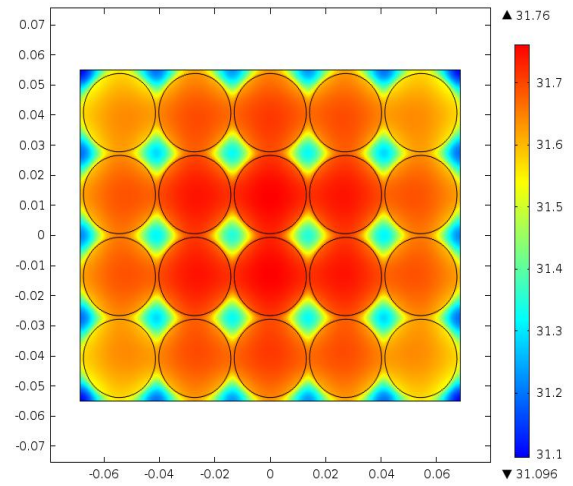
(a) $t = 1 \text{ hr}$, $\text{esp}_{pcm} = 0.0 \text{ mm}$.



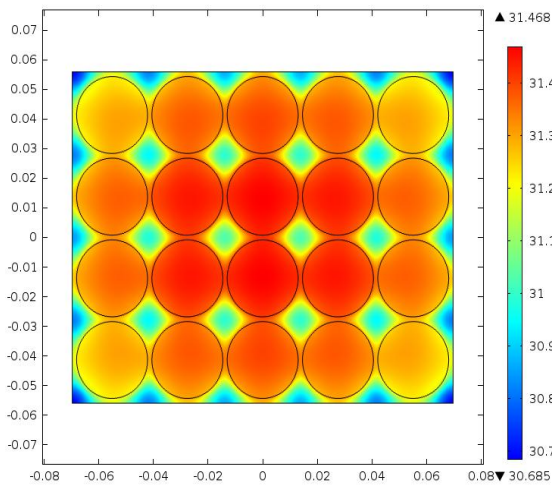
(b) $t = 1 \text{ hr}$, $\text{esp}_{pcm} = 0.4 \text{ mm}$.



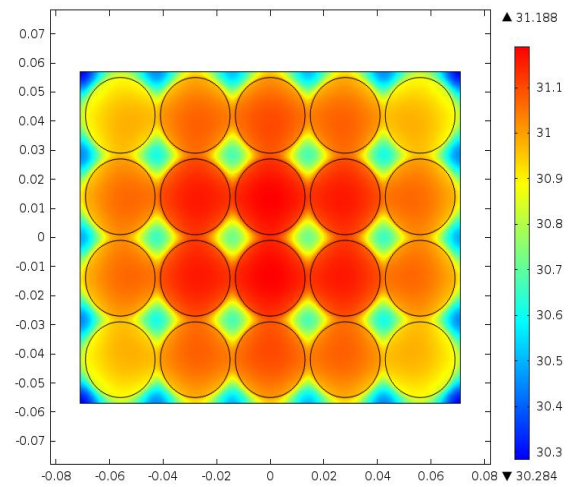
(c) $t = 1 \text{ hr}$, $\text{esp}_{pcm} = 0.8 \text{ mm}$.



(d) $t = 1 \text{ hr}$, $\text{esp}_{pcm} = 1.2 \text{ mm}$.

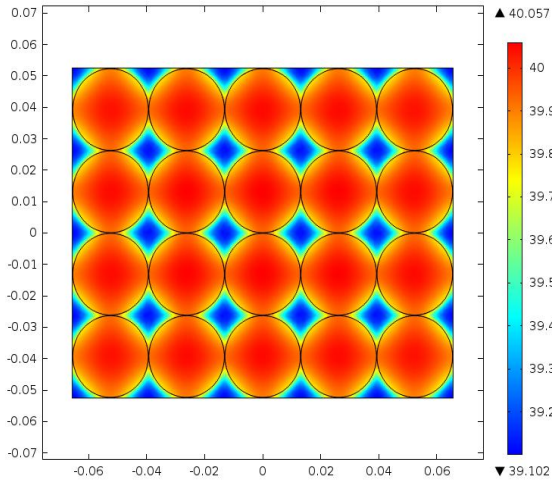


(e) $t = 1 \text{ hr}$, $\text{esp}_{pcm} = 1.6 \text{ mm}$.

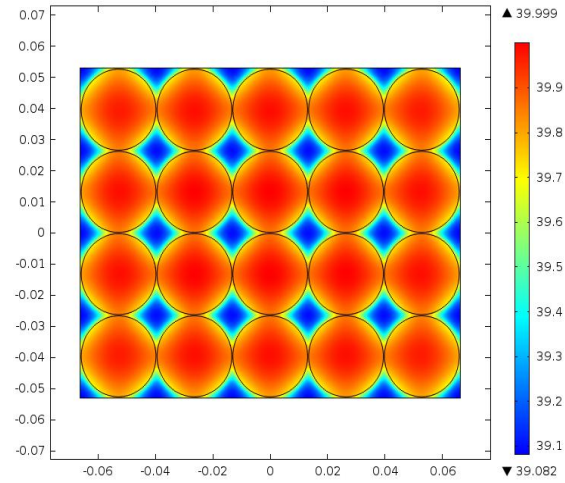


(f) $t = 1 \text{ hr}$, $\text{esp}_{pcm} = 2.0 \text{ mm}$.

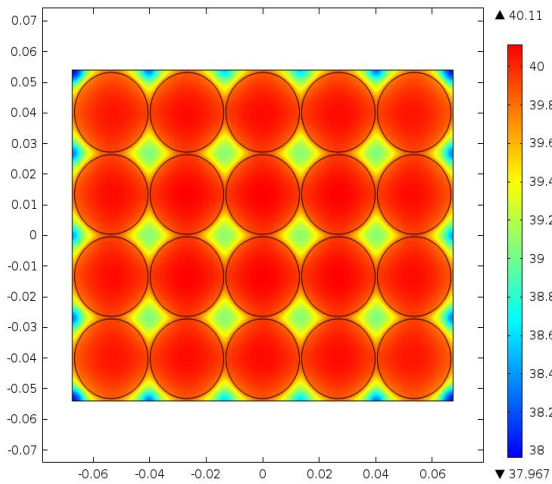
Figura B.16: Resultados para la celda 26650, tasa de descarga 1C, temperatura inicial 20°C y X40.



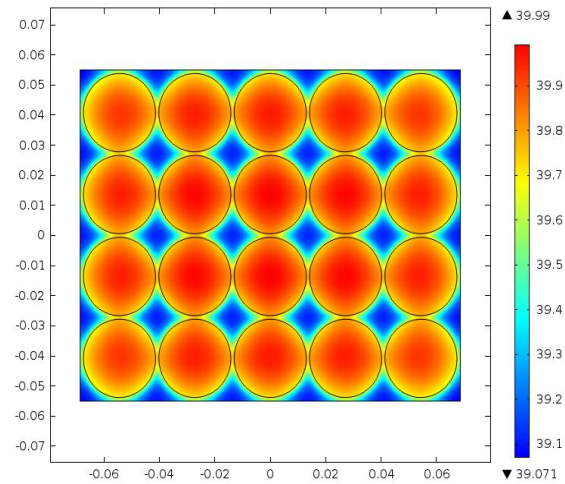
(a) $t = 1 \text{ hr}$, $\text{esp}_{pcm} = 0.0 \text{ mm}$.



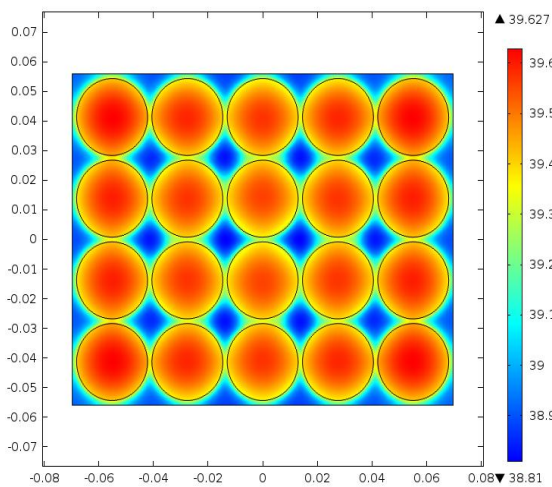
(b) $t = 1 \text{ hr}$, $\text{esp}_{pcm} = 0.4 \text{ mm}$.



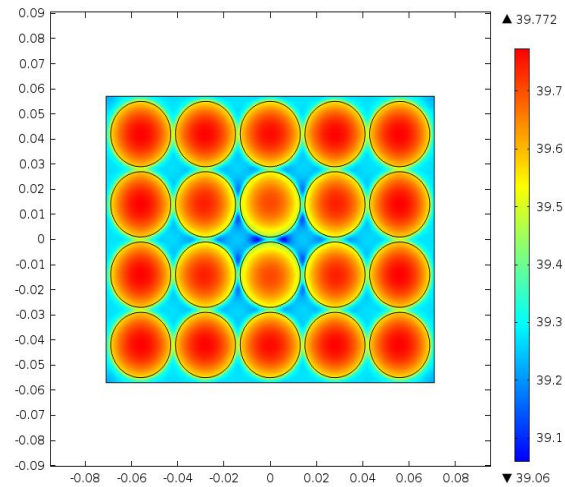
(c) $t = 1 \text{ hr}$, $\text{esp}_{pcm} = 0.8 \text{ mm}$.



(d) $t = 1 \text{ hr}$, $\text{esp}_{pcm} = 1.2 \text{ mm}$.

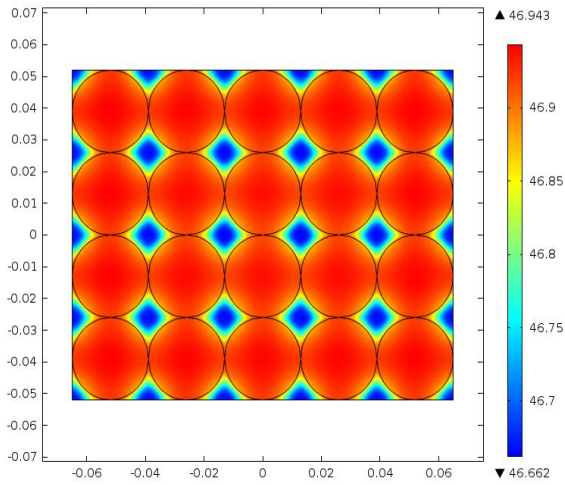


(e) $t = 1 \text{ hr}$, $\text{esp}_{pcm} = 1.6 \text{ mm}$.

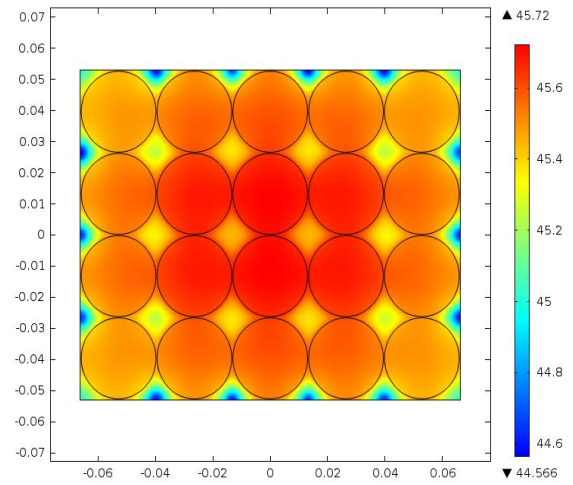


(f) $t = 1 \text{ hr}$, $\text{esp}_{pcm} = 2.0 \text{ mm}$.

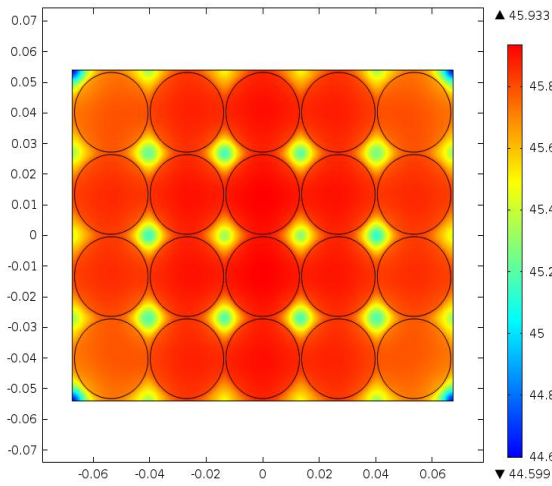
Figura B.17: Resultados para la celda 26650, tasa de descarga 1C, temperatura inicial 30°C y X40.



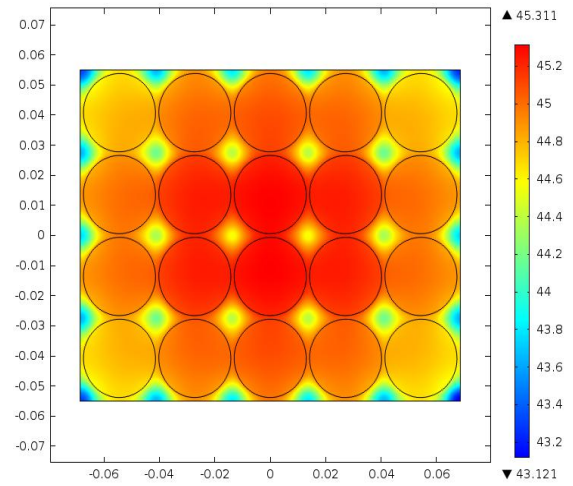
(a) $t = 1 \text{ hr}$, $\text{esp}_{pcm} = 0.0 \text{ mm}$.



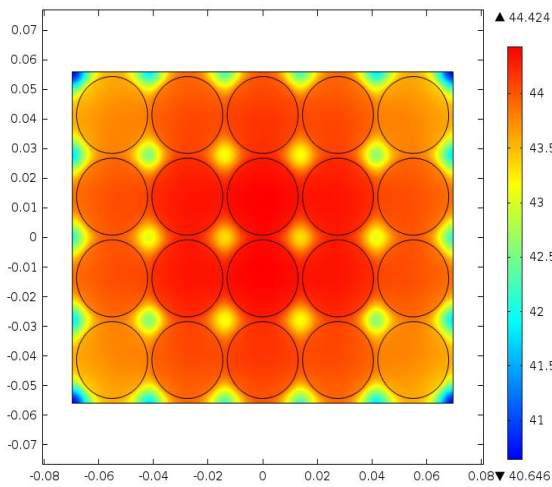
(b) $t = 1 \text{ hr}$, $\text{esp}_{pcm} = 0.4 \text{ mm}$.



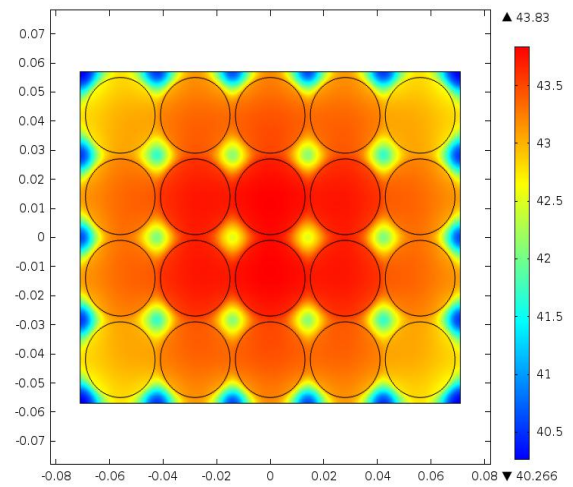
(c) $t = 1 \text{ hr}$, $\text{esp}_{pcm} = 0.8 \text{ mm}$.



(d) $t = 1 \text{ hr}$, $\text{esp}_{pcm} = 1.2 \text{ mm}$.

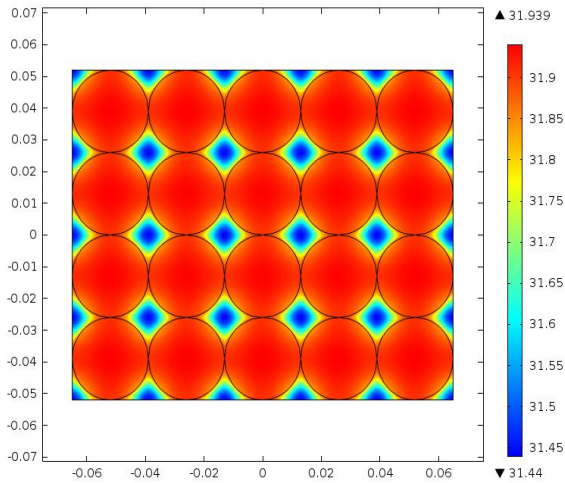


(e) $t = 1 \text{ hr}$, $\text{esp}_{pcm} = 1.6 \text{ mm}$.

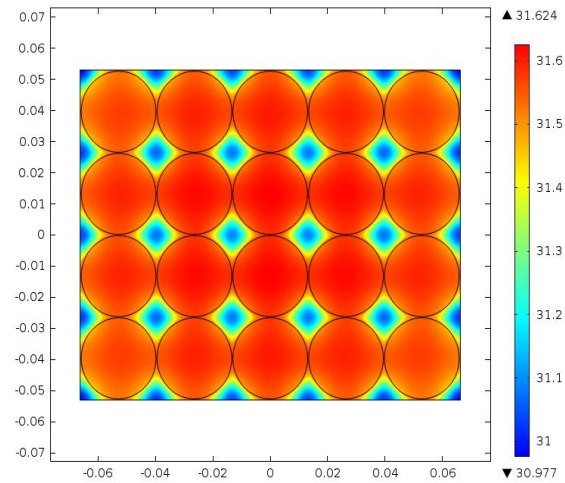


(f) $t = 1 \text{ hr}$, $\text{esp}_{pcm} = 2.0 \text{ mm}$.

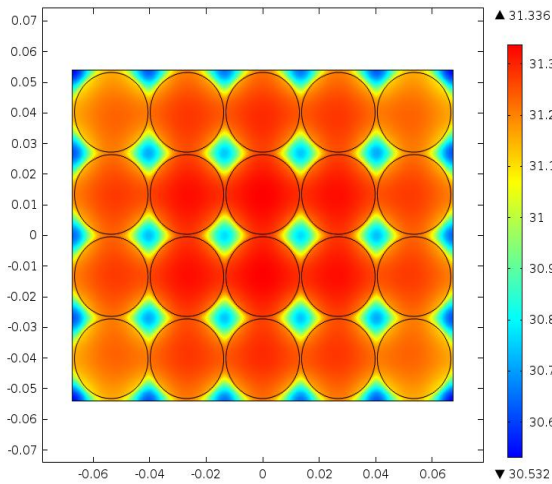
Figura B.18: Resultados para la celda 26650, tasa de descarga 1C, temperatura inicial 40°C y X40.



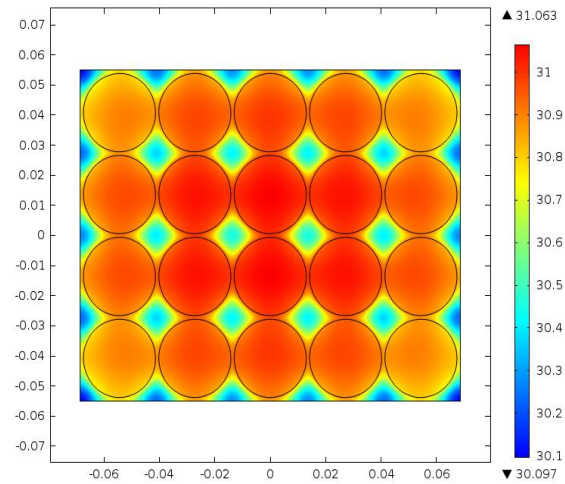
(a) $t = 30 \text{ min}$, $\text{esp}_{pcm} = 0.0 \text{ mm}$.



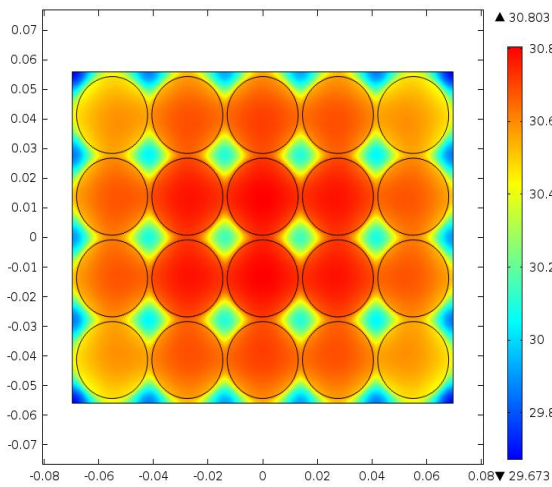
(b) $t = 30 \text{ min}$, $\text{esp}_{pcm} = 0.4 \text{ mm}$.



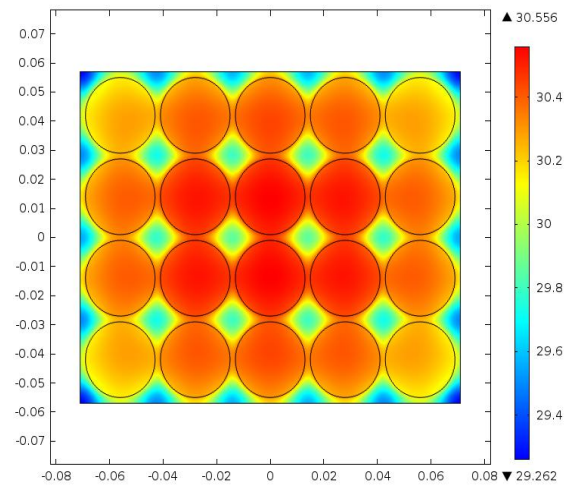
(c) $t = 30 \text{ min}$, $\text{esp}_{pcm} = 0.8 \text{ mm}$.



(d) $t = 30 \text{ min}$, $\text{esp}_{pcm} = 1.2 \text{ mm}$.

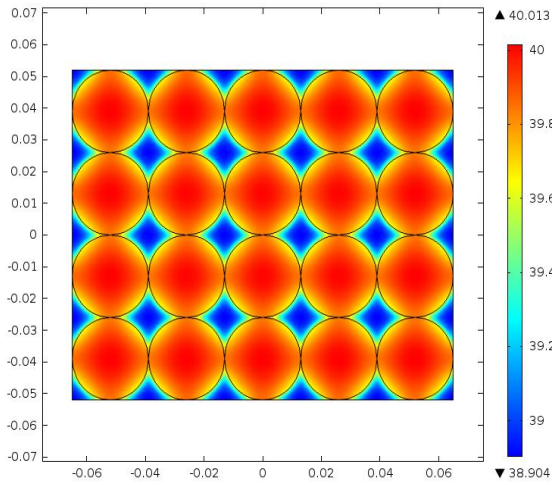


(e) $t = 30 \text{ min}$, $\text{esp}_{pcm} = 1.6 \text{ mm}$.

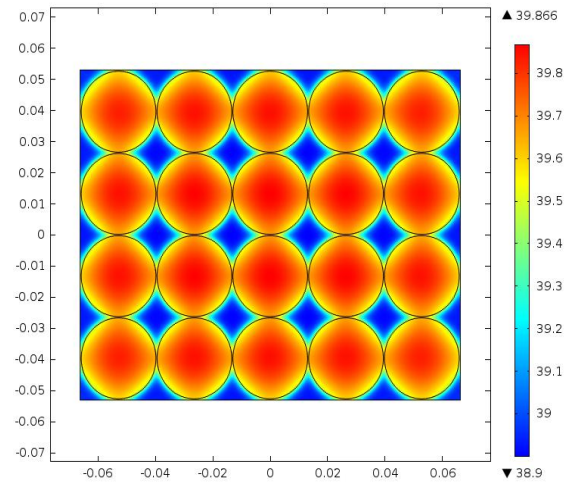


(f) $t = 30 \text{ min}$, $\text{esp}_{pcm} = 2.0 \text{ mm}$.

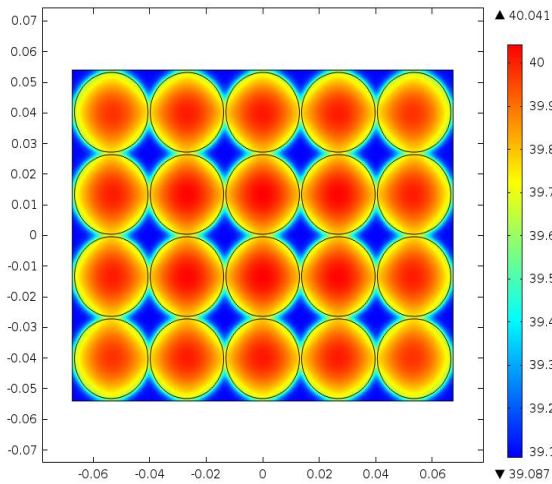
Figura B.19: Resultados para la celda 26650, tasa de descarga 2C, temperatura inicial 20°C y X40.



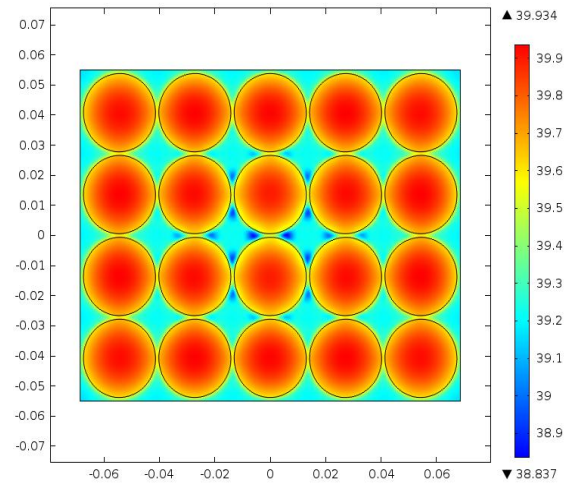
(a) $t = 30 \text{ min}$, $\text{esp}_{pcm}=0.0 \text{ mm}$.



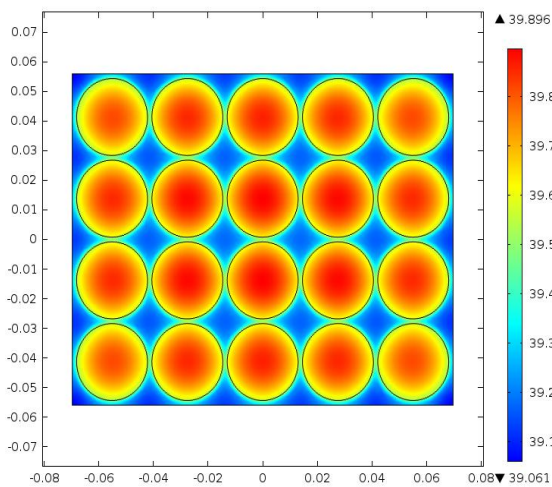
(b) $t = 30 \text{ min}$, $\text{esp}_{pcm}=0.4 \text{ mm}$.



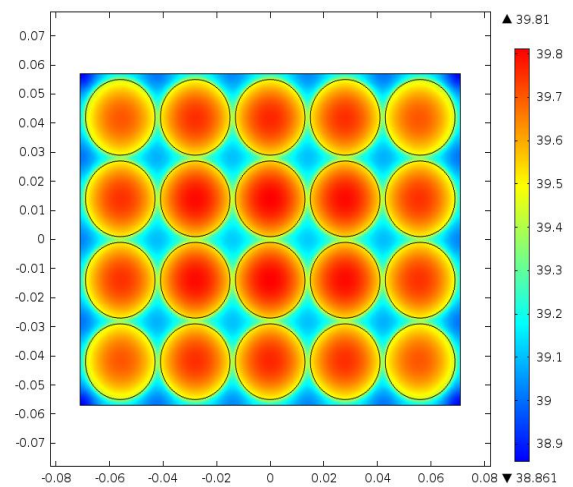
(c) $t = 30 \text{ min}$, $\text{esp}_{pcm}=0.8 \text{ mm}$.



(d) $t = 30 \text{ min}$, $\text{esp}_{pcm}=1.2 \text{ mm}$.

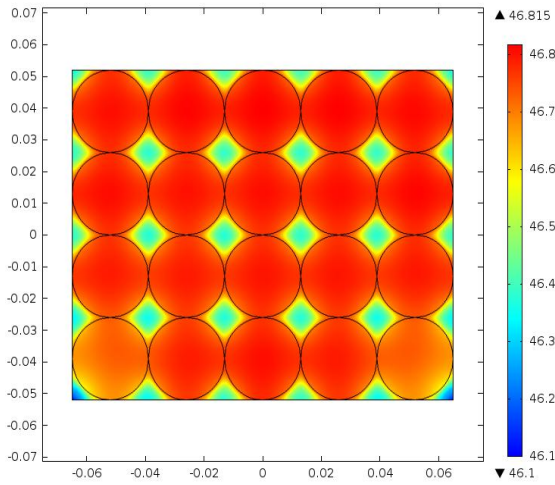


(e) $t = 30 \text{ min}$, $\text{esp}_{pcm}=1.6 \text{ mm}$.

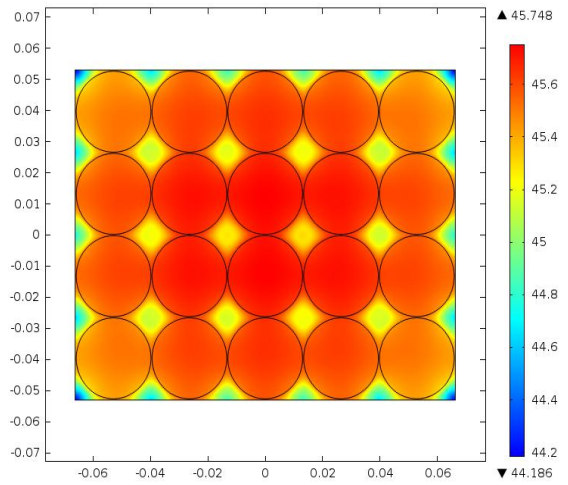


(f) $t = 30 \text{ min}$, $\text{esp}_{pcm}=2.0 \text{ mm}$.

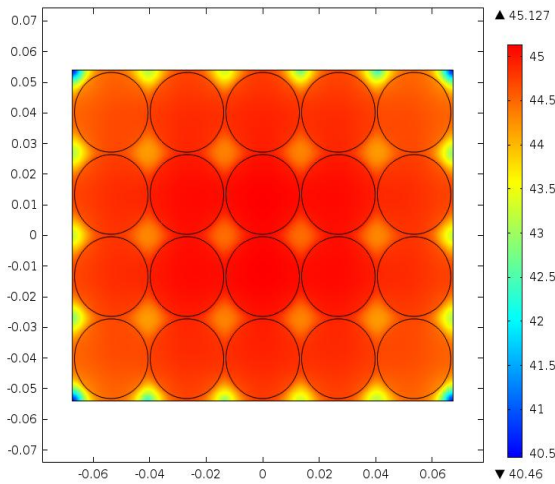
Figura B.20: Resultados para la celda 26650, tasa de descarga 2C, temperatura inicial 30°C y X40.



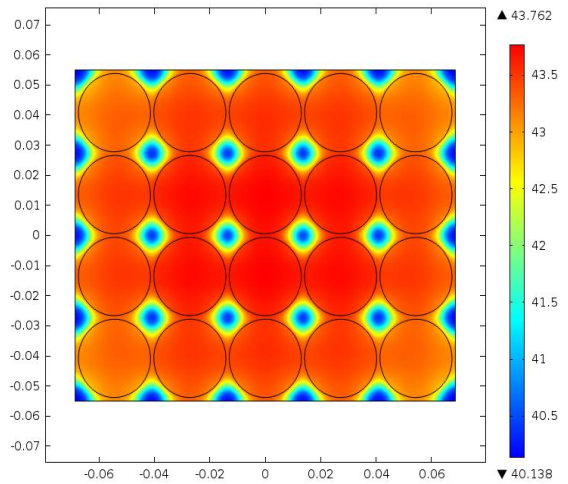
(a) $t = 30 \text{ min}$, $\text{esp}_{pcm}=0.0 \text{ mm}$.



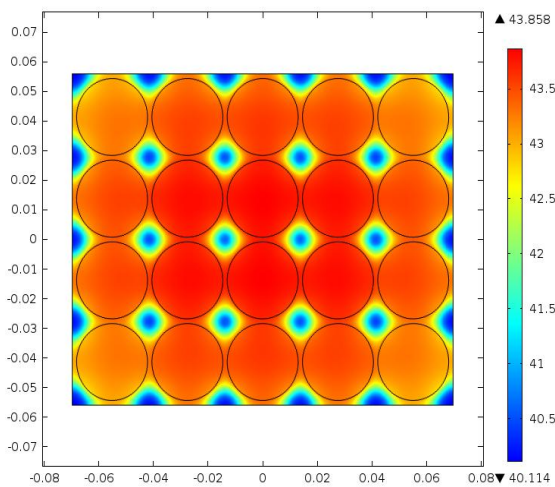
(b) $t = 30 \text{ min}$, $\text{esp}_{pcm}=0.4 \text{ mm}$.



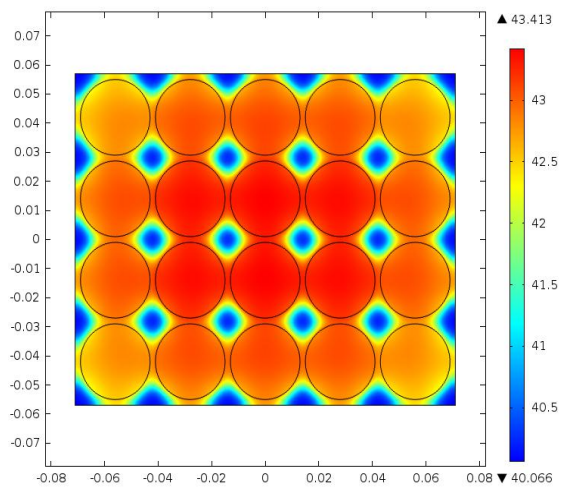
(c) $t = 30 \text{ min}$, $\text{esp}_{pcm}=0.8 \text{ mm}$.



(d) $t = 30 \text{ min}$, $\text{esp}_{pcm}=1.2 \text{ mm}$.

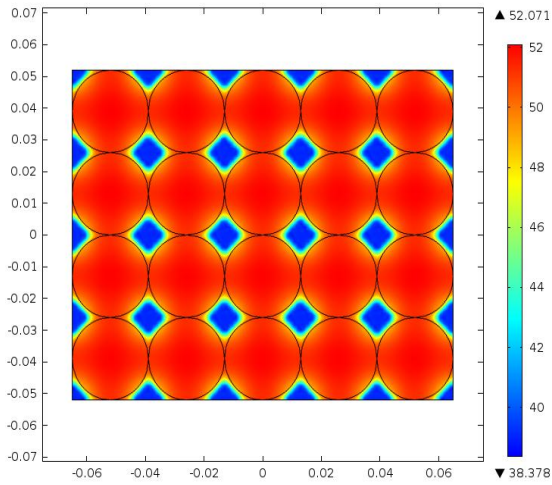


(e) $t = 30 \text{ min}$, $\text{esp}_{pcm}=1.6 \text{ mm}$.

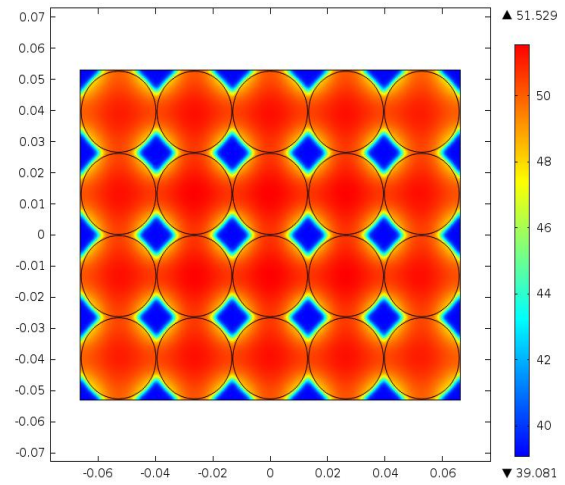


(f) $t = 30 \text{ min}$, $\text{esp}_{pcm}=2.0 \text{ mm}$.

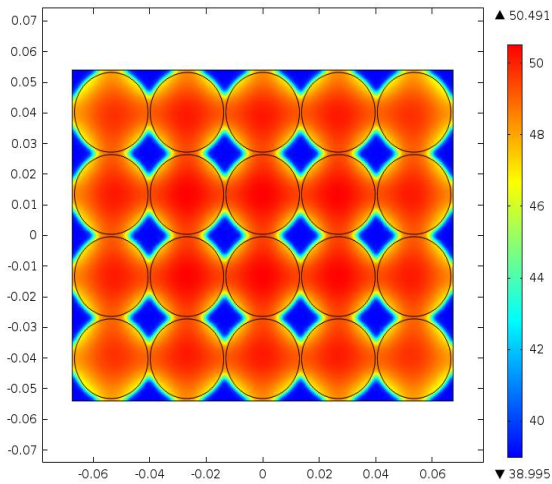
Figura B.21: Resultados para la celda 26650, tasa de descarga 2C, temperatura inicial 40°C y X40.



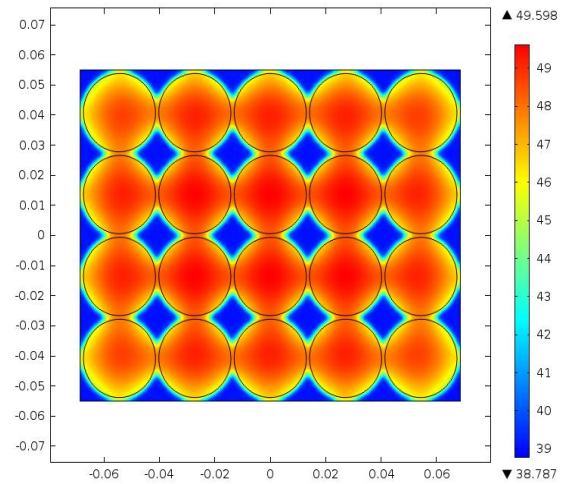
(a) $t = 6 \text{ min}$, $\text{esp}_{pcm} = 0.0 \text{ mm}$.



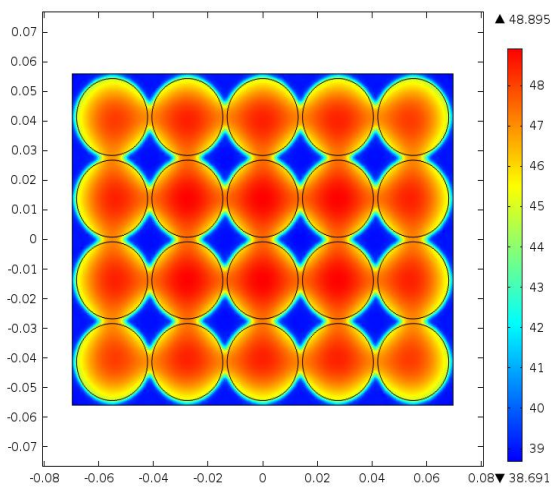
(b) $t = 6 \text{ min}$, $\text{esp}_{pcm} = 0.4 \text{ mm}$.



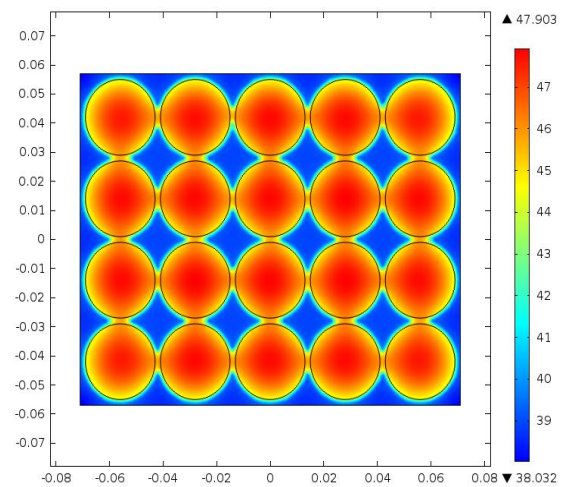
(c) $t = 6 \text{ min}$, $\text{esp}_{pcm} = 0.8 \text{ mm}$.



(d) $t = 6 \text{ min}$, $\text{esp}_{pcm} = 1.2 \text{ mm}$.

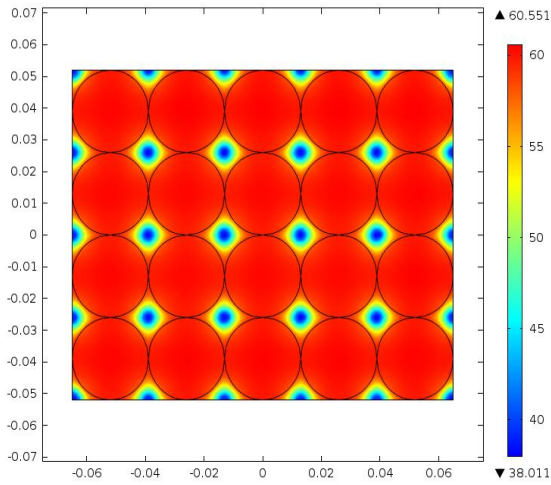


(e) $t = 6 \text{ min}$, $\text{esp}_{pcm} = 1.6 \text{ mm}$.

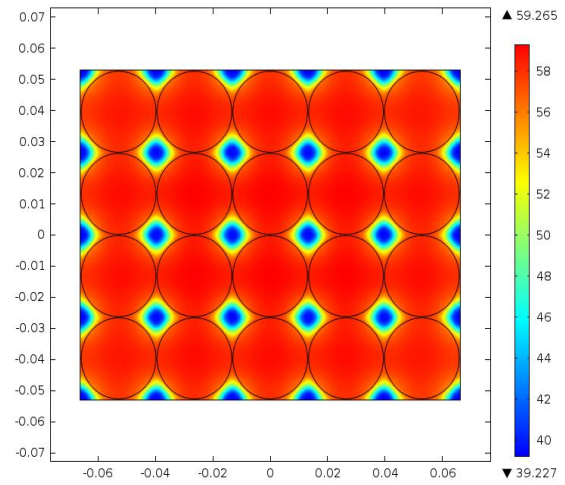


(f) $t = 6 \text{ min}$, $\text{esp}_{pcm} = 2.0 \text{ mm}$.

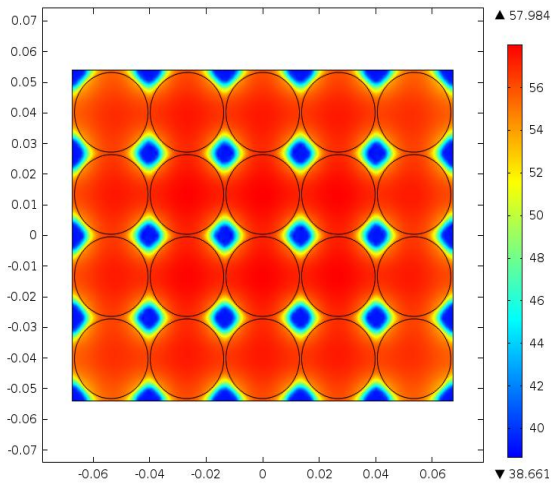
Figura B.22: Resultados para la celda 26650, tasa de descarga 10C, temperatura inicial 20°C y X40.



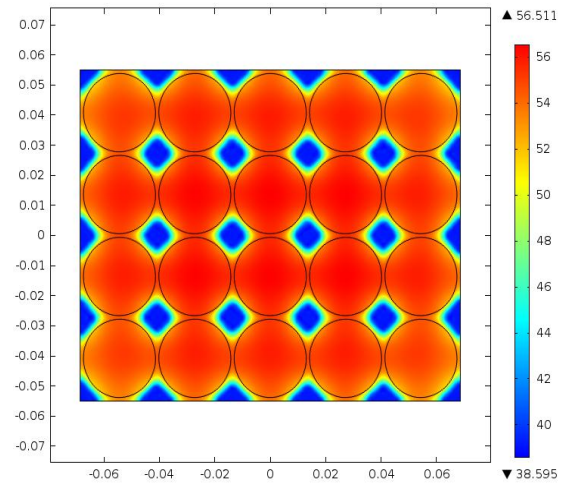
(a) $t = 6 \text{ min}$, $\text{esp}_{pcm} = 0.0 \text{ mm}$.



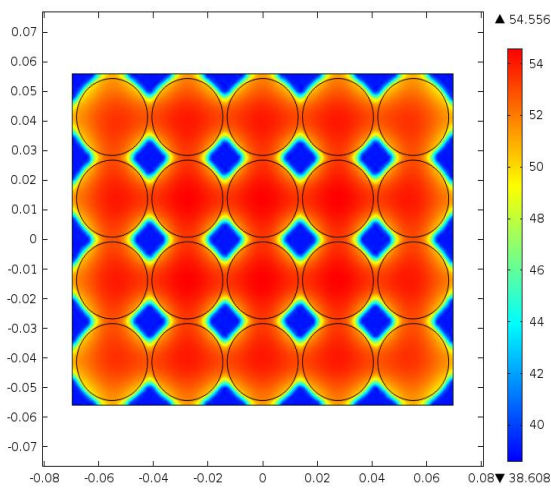
(b) $t = 6 \text{ min}$, $\text{esp}_{pcm} = 0.4 \text{ mm}$.



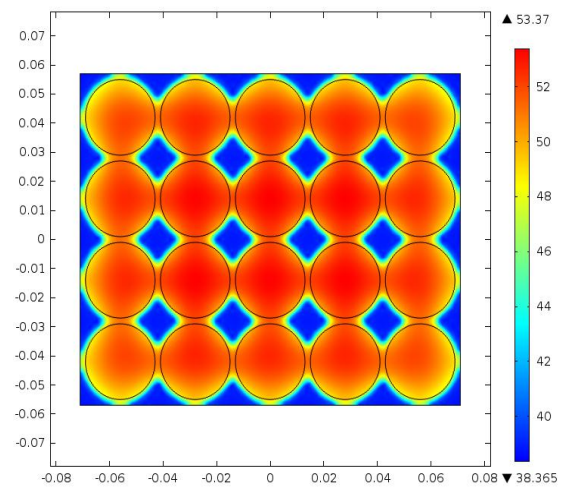
(c) $t = 6 \text{ min}$, $\text{esp}_{pcm} = 0.8 \text{ mm}$.



(d) $t = 6 \text{ min}$, $\text{esp}_{pcm} = 1.2 \text{ mm}$.

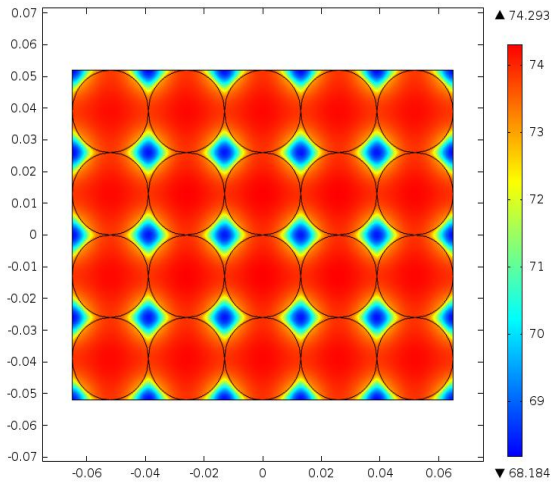


(e) $t = 6 \text{ min}$, $\text{esp}_{pcm} = 1.6 \text{ mm}$.

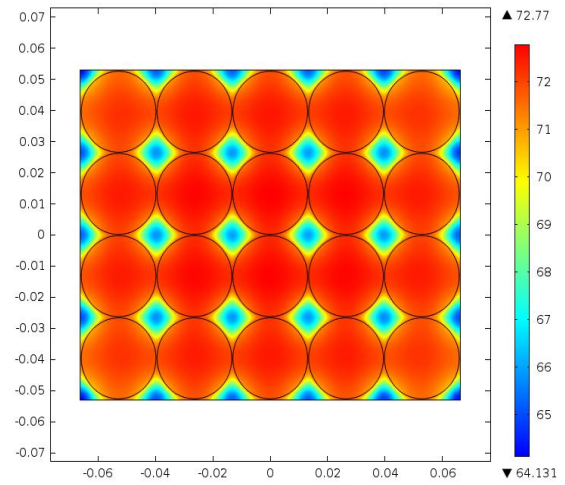


(f) $t = 6 \text{ min}$, $\text{esp}_{pcm} = 2.0 \text{ mm}$.

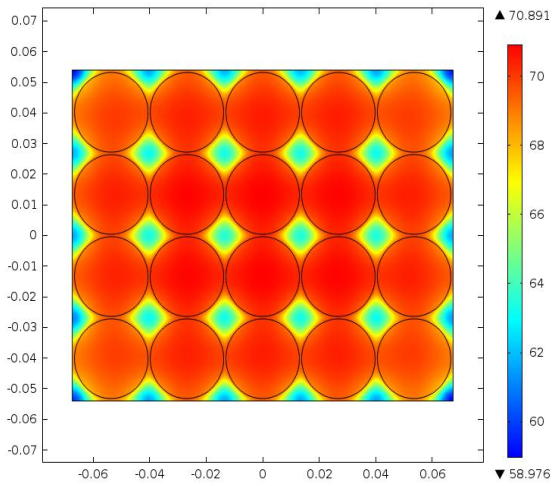
Figura B.23: Resultados para la celda 26650, tasa de descarga 2C, temperatura inicial 30°C y X40.



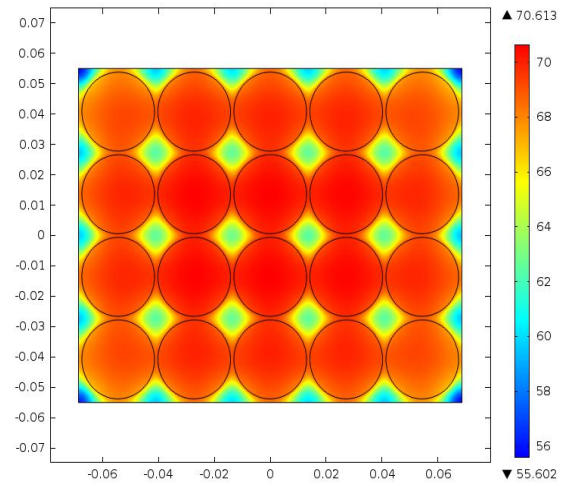
(a) $t = 6 \text{ min}$, $\text{esp}_{pcm} = 0.0 \text{ mm}$.



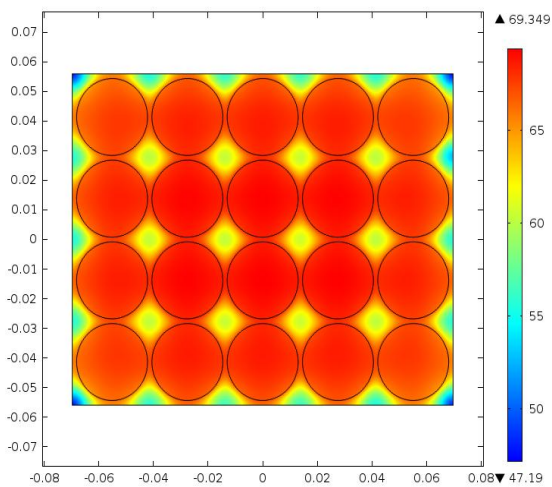
(b) $t = 6 \text{ min}$, $\text{esp}_{pcm} = 0.4 \text{ mm}$.



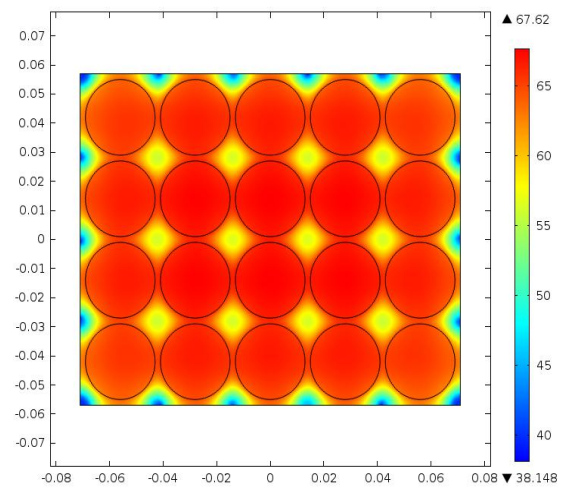
(c) $t = 6 \text{ min}$, $\text{esp}_{pcm} = 0.8 \text{ mm}$.



(d) $t = 6 \text{ min}$, $\text{esp}_{pcm} = 1.2 \text{ mm}$.

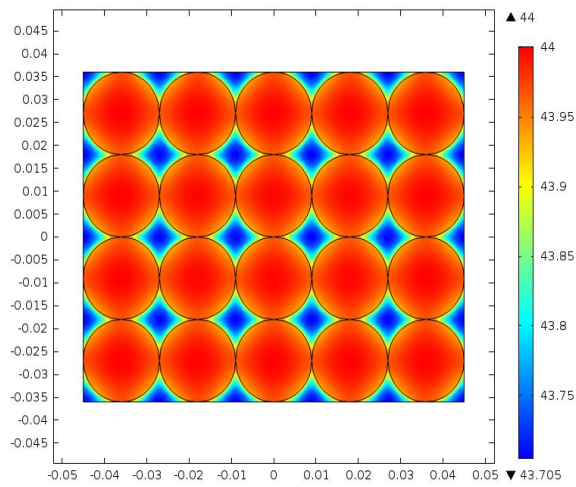


(e) $t = 6 \text{ min}$, $\text{esp}_{pcm} = 1.6 \text{ mm}$.

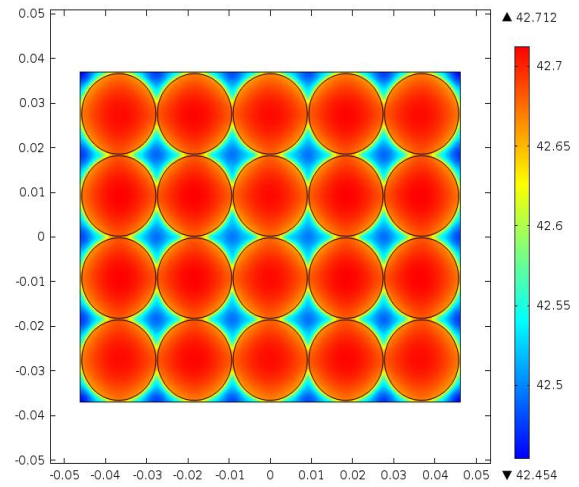


(f) $t = 6 \text{ min}$, $\text{esp}_{pcm} = 2.0 \text{ mm}$.

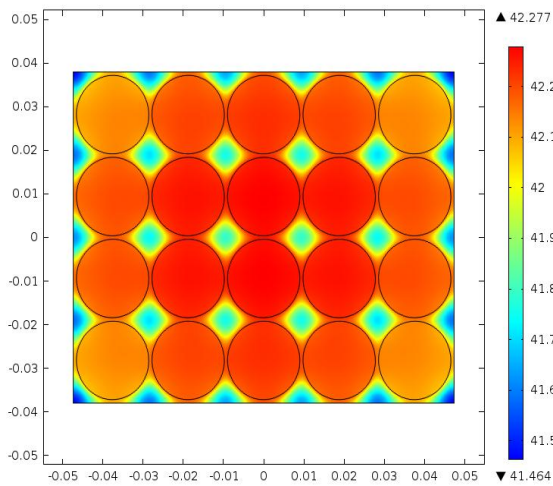
Figura B.24: Resultados para la celda 26650, tasa de descarga 2C, temperatura inicial 40°C y X40.



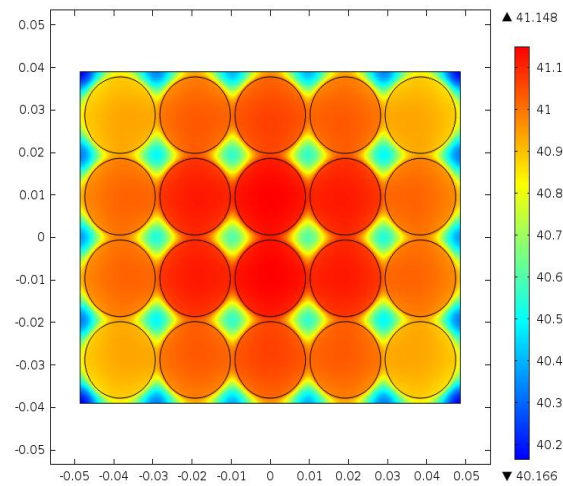
(a) $t = 2$ hr, $esp_{pcm} = 0.0$ mm.



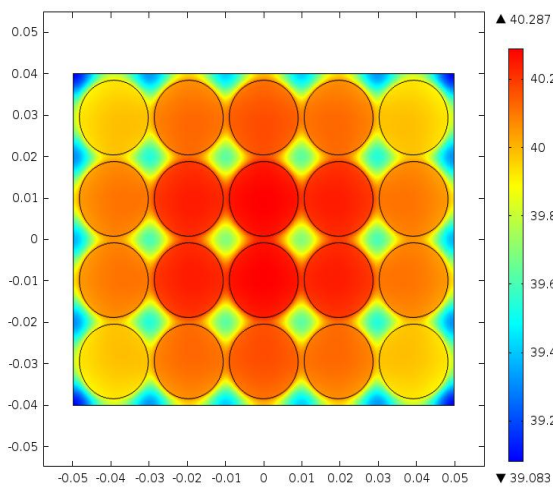
(b) $t = 2$ hr, $esp_{pcm} = 0.4$ mm.



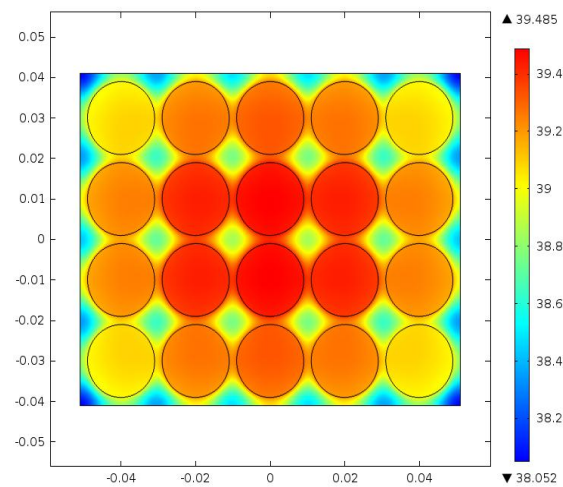
(c) $t = 2$ hr, $esp_{pcm} = 0.8$ mm.



(d) $t = 2$ hr, $esp_{pcm} = 1.2$ mm.

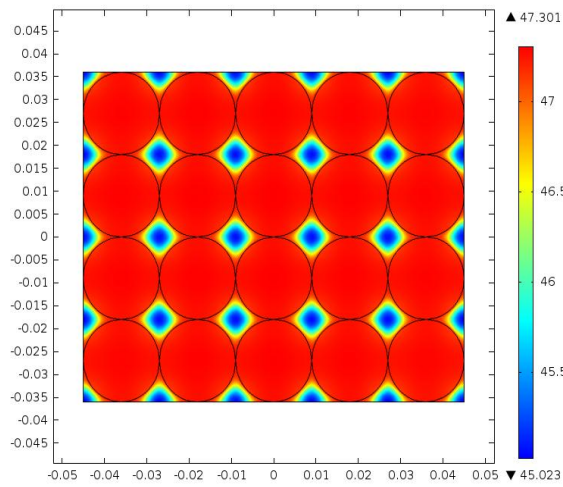


(e) $t = 2$ hr, $esp_{pcm} = 1.6$ mm.

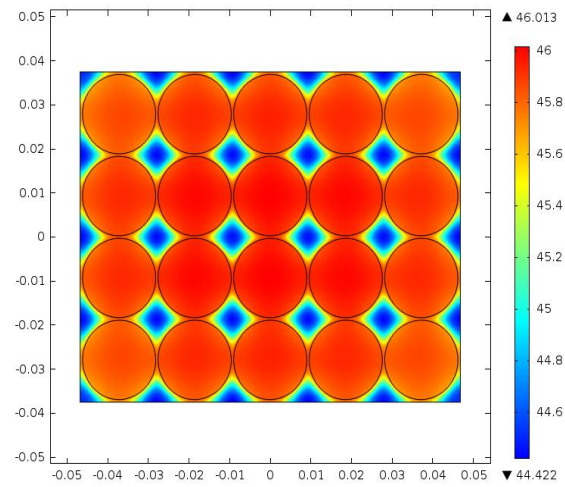


(f) $t = 2$ hr, $esp_{pcm} = 2.0$ mm.

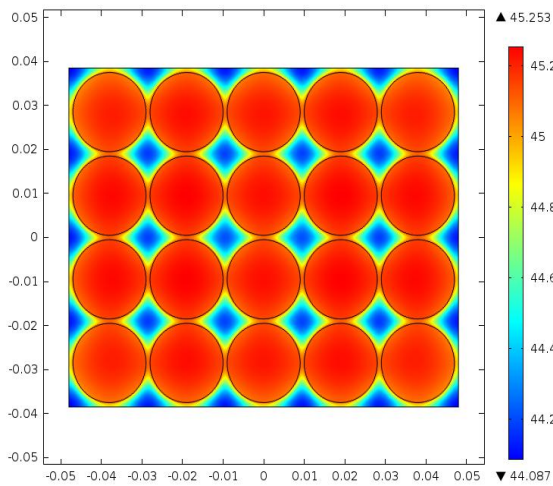
Figura B.25: Resultados para la celda 18650, tasa de descarga 0.5C, temperatura inicial 20°C y NPG.



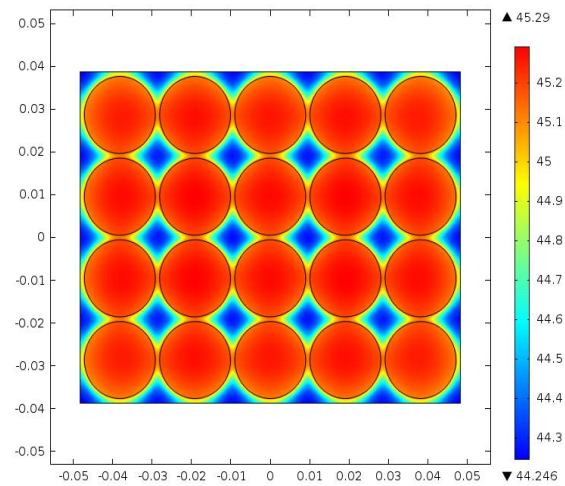
(a) $t = 2 \text{ hr}$, $\text{esp}_{pcm} = 0.0 \text{ mm}$.



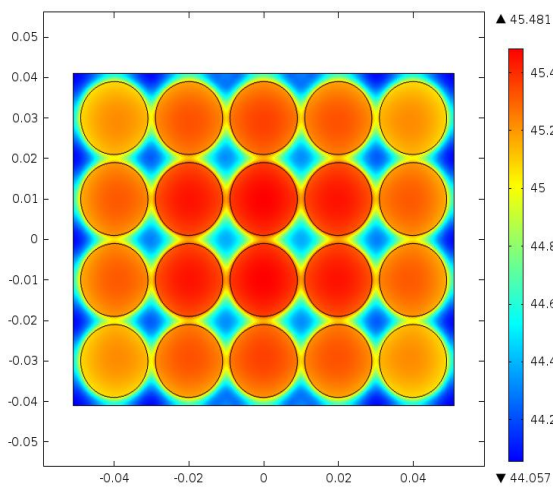
(b) $t = 2 \text{ hr}$, $\text{esp}_{pcm} = 0.4 \text{ mm}$.



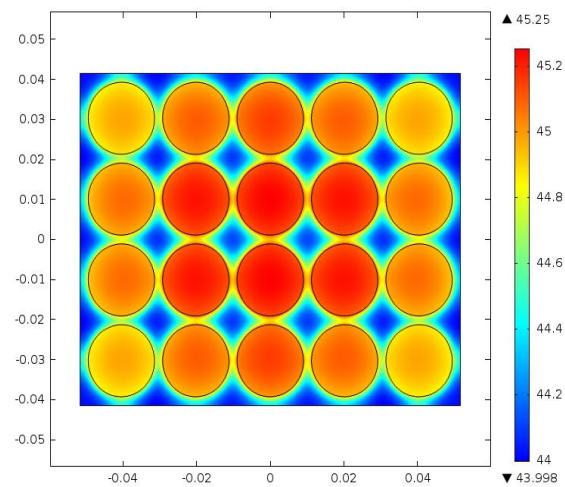
(c) $t = 2 \text{ hr}$, $\text{esp}_{pcm} = 0.8 \text{ mm}$.



(d) $t = 2 \text{ hr}$, $\text{esp}_{pcm} = 1.2 \text{ mm}$.

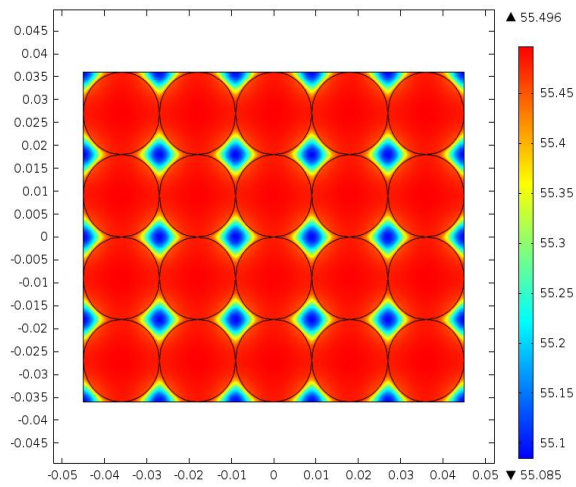


(e) $t = 2 \text{ hr}$, $\text{esp}_{pcm} = 1.6 \text{ mm}$.

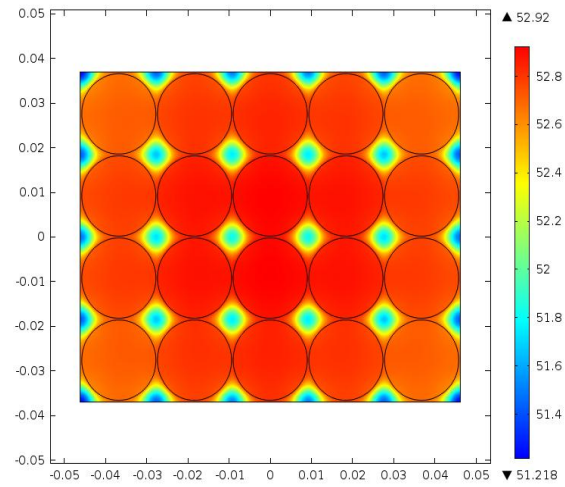


(f) $t = 2 \text{ hr}$, $\text{esp}_{pcm} = 2.0 \text{ mm}$.

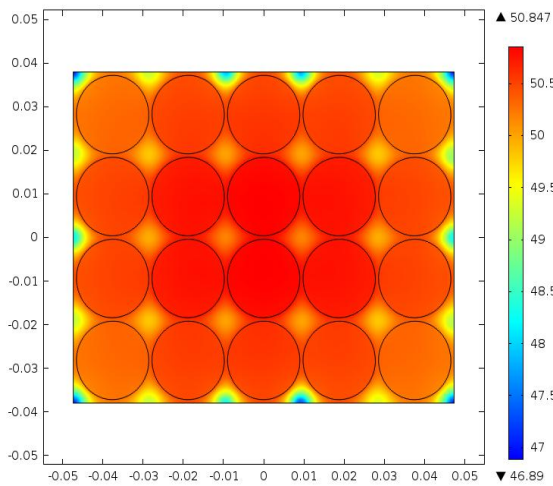
Figura B.26: Resultados para la celda 18650, tasa de descarga 0.5C, temperatura inicial 30°C y NPG.



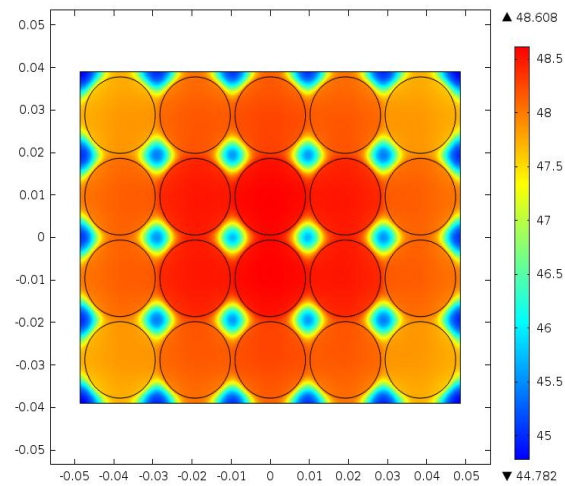
(a) $t = 2 \text{ hr}$, $\text{esp}_{pcm} = 0.0 \text{ mm}$.



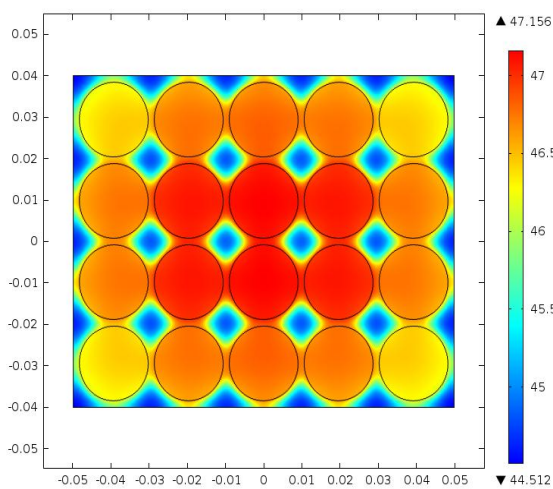
(b) $t = 2 \text{ hr}$, $\text{esp}_{pcm} = 0.4 \text{ mm}$.



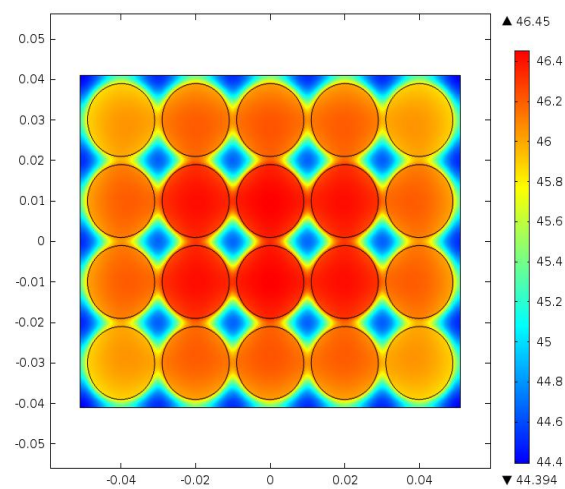
(c) $t = 2 \text{ hr}$, $\text{esp}_{pcm} = 0.8 \text{ mm}$.



(d) $t = 2 \text{ hr}$, $\text{esp}_{pcm} = 1.2 \text{ mm}$.

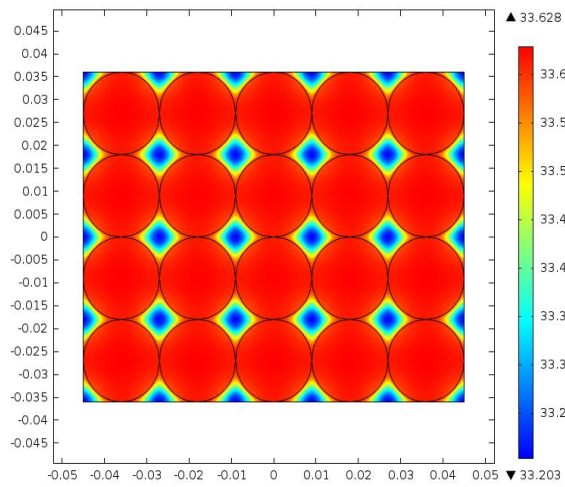


(e) $t = 2 \text{ hr}$, $\text{esp}_{pcm} = 1.6 \text{ mm}$.

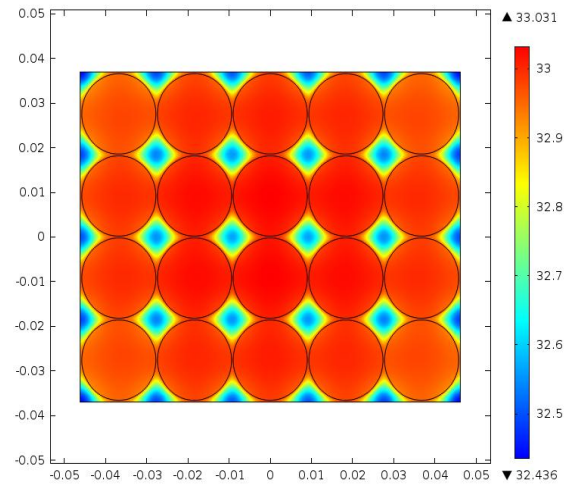


(f) $t = 2 \text{ hr}$, $\text{esp}_{pcm} = 2.0 \text{ mm}$.

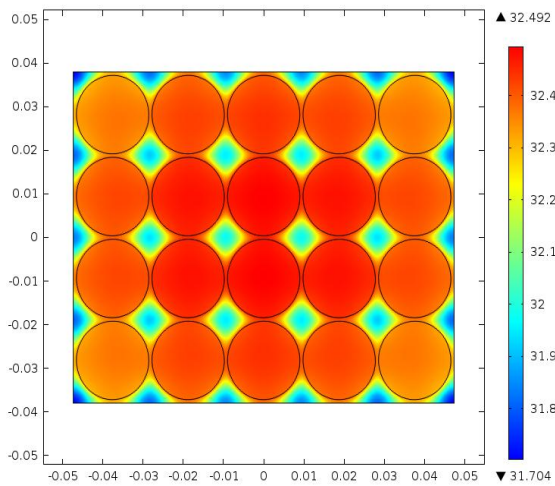
Figura B.27: Resultados para la celda 18650, tasa de descarga 0.5C, temperatura inicial 40°C y NPG.



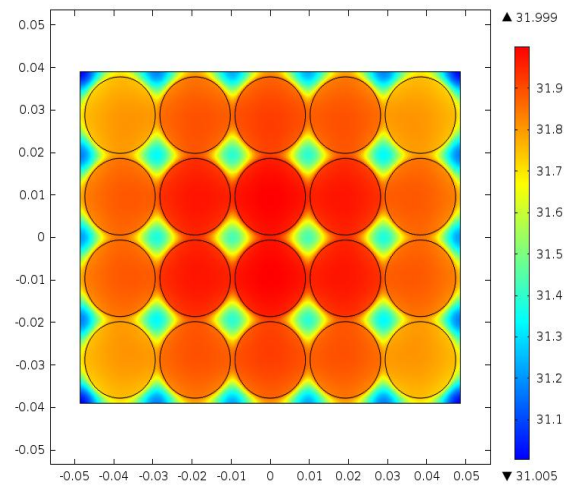
(a) $t = 1 \text{ hr}$, $\text{esp}_{pcm} = 0.0 \text{ mm}$.



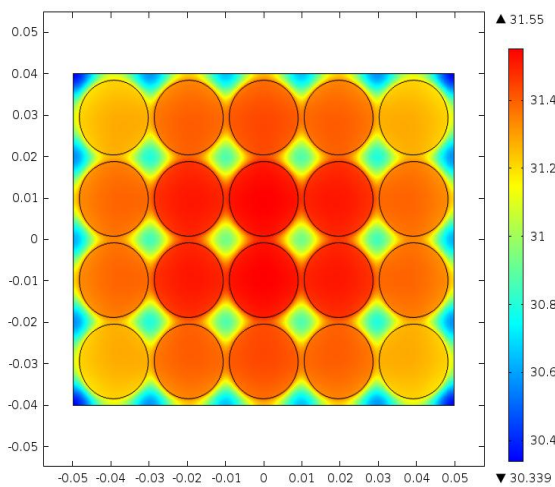
(b) $t = 1 \text{ hr}$, $\text{esp}_{pcm} = 0.4 \text{ mm}$.



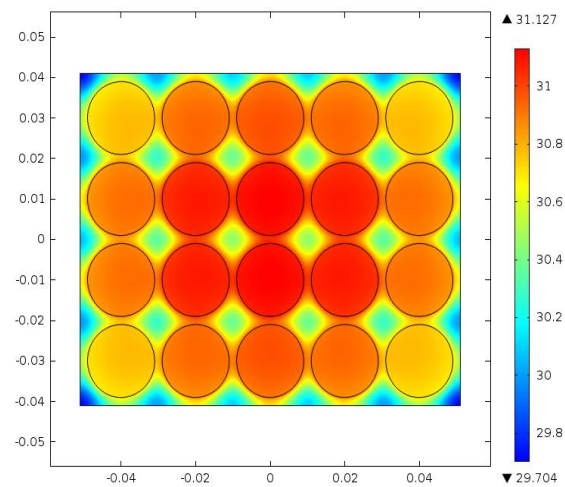
(c) $t = 1 \text{ hr}$, $\text{esp}_{pcm} = 0.8 \text{ mm}$.



(d) $t = 1 \text{ hr}$, $\text{esp}_{pcm} = 1.2 \text{ mm}$.

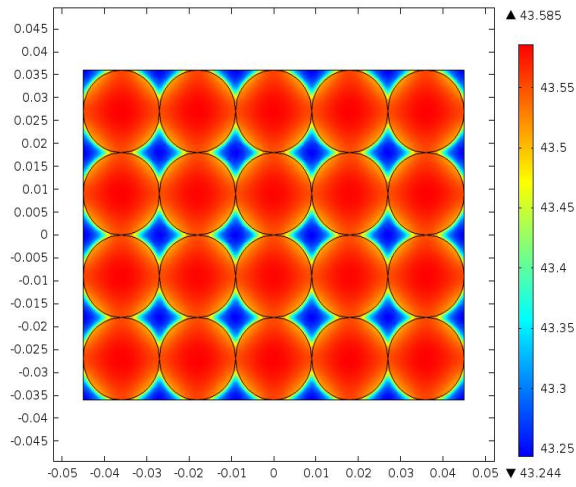


(e) $t = 1 \text{ hr}$, $\text{esp}_{pcm} = 1.6 \text{ mm}$.

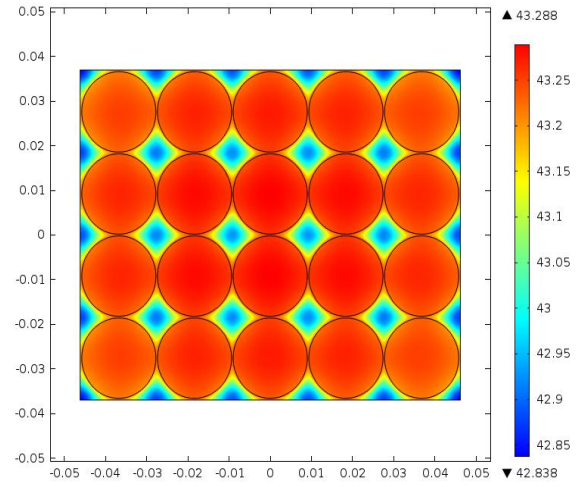


(f) $t = 1 \text{ hr}$, $\text{esp}_{pcm} = 2.0 \text{ mm}$.

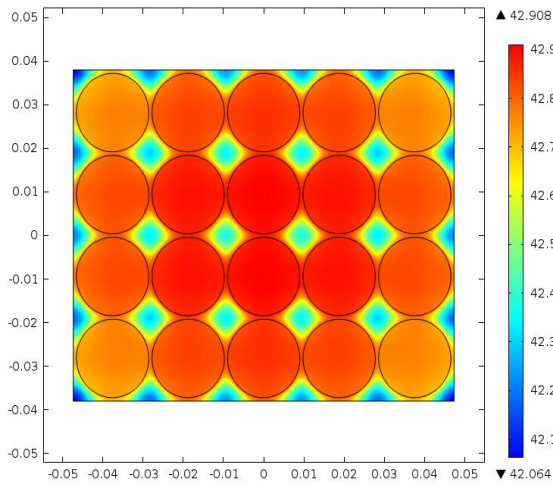
Figura B.28: Resultados para la celda 18650, tasa de descarga 1C y temperatura inicial 20°C .



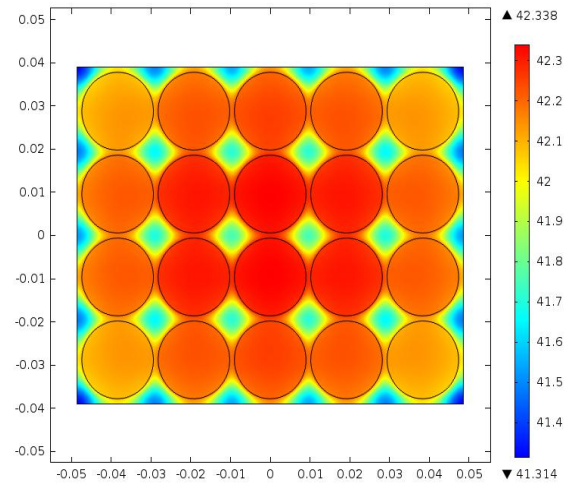
(a) $t = 1 \text{ hr}$, $\text{esp}_{pcm} = 0.0 \text{ mm}$.



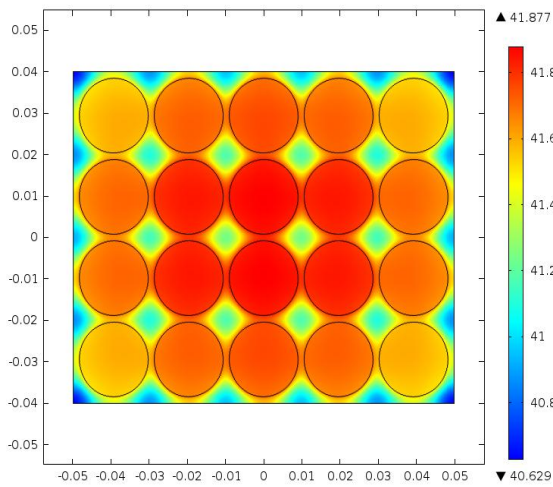
(b) $t = 1 \text{ hr}$, $\text{esp}_{pcm} = 0.4 \text{ mm}$.



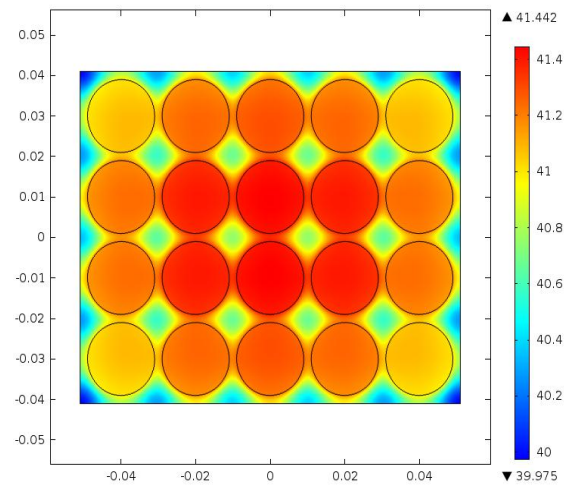
(c) $t = 1 \text{ hr}$, $\text{esp}_{pcm} = 0.8 \text{ mm}$.



(d) $t = 1 \text{ hr}$, $\text{esp}_{pcm} = 1.2 \text{ mm}$.

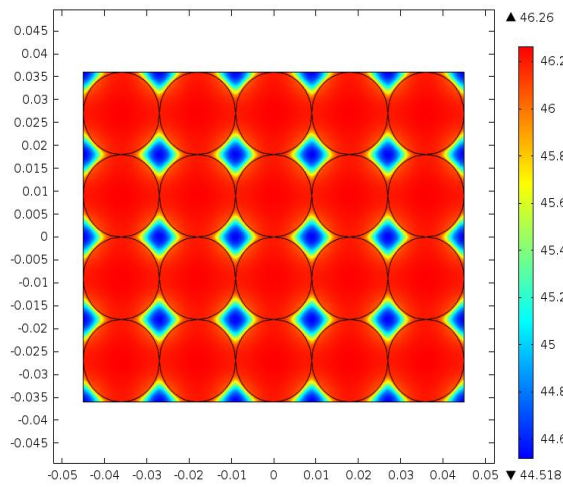


(e) $t = 1 \text{ hr}$, $\text{esp}_{pcm} = 1.6 \text{ mm}$.

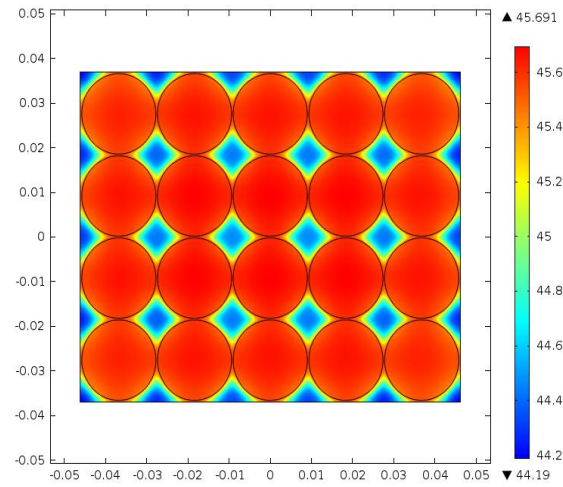


(f) $t = 1 \text{ hr}$, $\text{esp}_{pcm} = 2.0 \text{ mm}$.

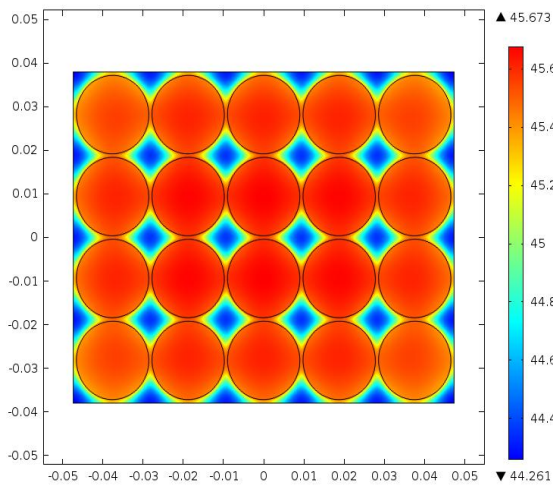
Figura B.29: Resultados para la celda 18650, tasa de descarga 1C y temperatura inicial 30°C.



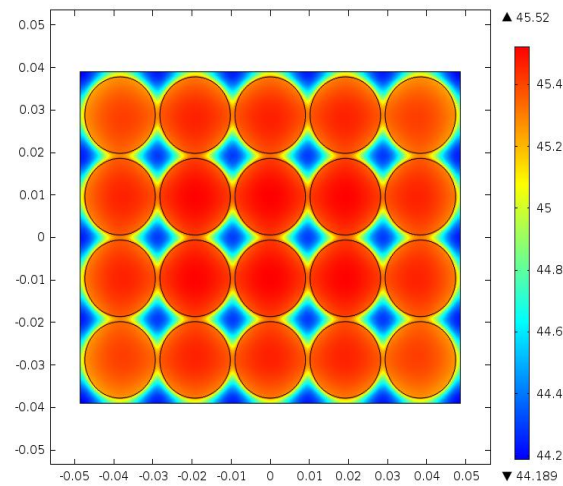
(a) $t = 1$ hr, $esp_{pcm} = 0.0$ mm.



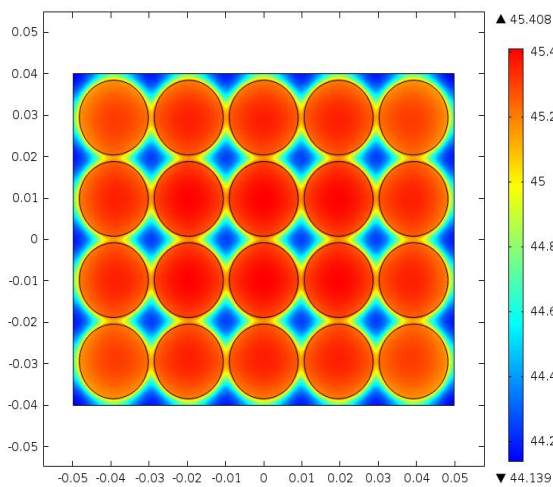
(b) $t = 1$ hr, $esp_{pcm} = 0.4$ mm.



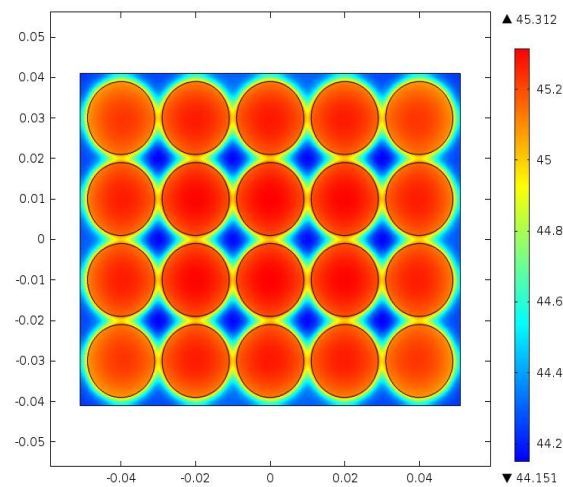
(c) $t = 1$ hr, $esp_{pcm} = 0.8$ mm.



(d) $t = 1$ hr, $esp_{pcm} = 1.2$ mm.

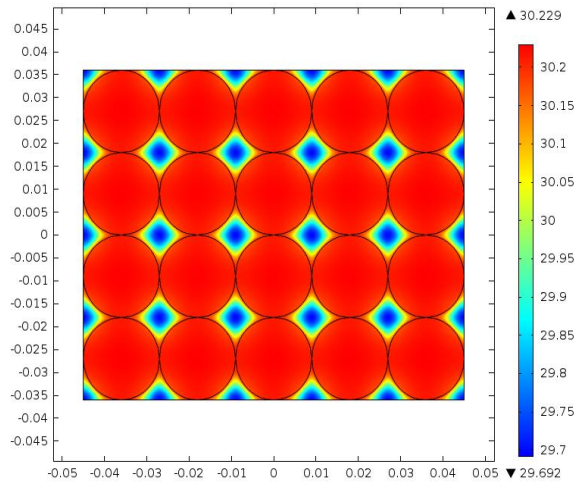


(e) $t = 1$ hr, $esp_{pcm} = 1.6$ mm.

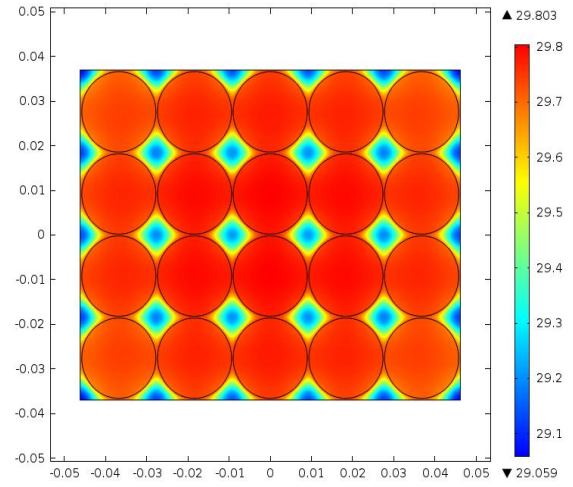


(f) $t = 1$ hr, $esp_{pcm} = 2.0$ mm.

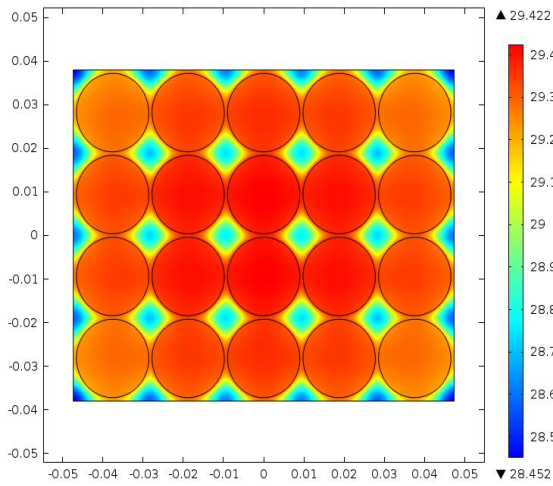
Figura B.30: Resultados para la celda 18650, tasa de descarga 1C y temperatura inicial 40°C .



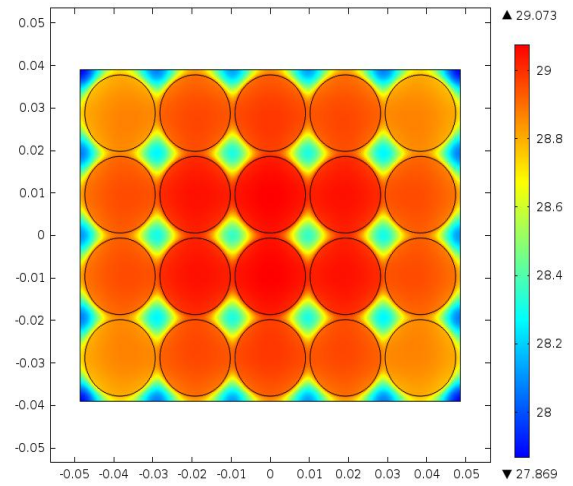
(a) $t = 30 \text{ min}$, $\text{esp}_{pcm} = 0.0 \text{ mm}$.



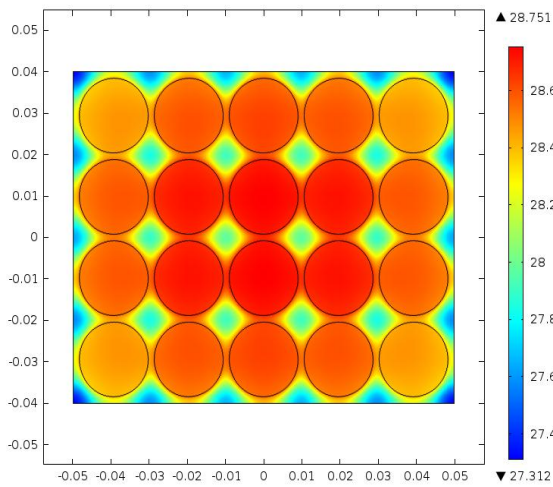
(b) $t = 30 \text{ min}$, $\text{esp}_{pcm} = 0.4 \text{ mm}$.



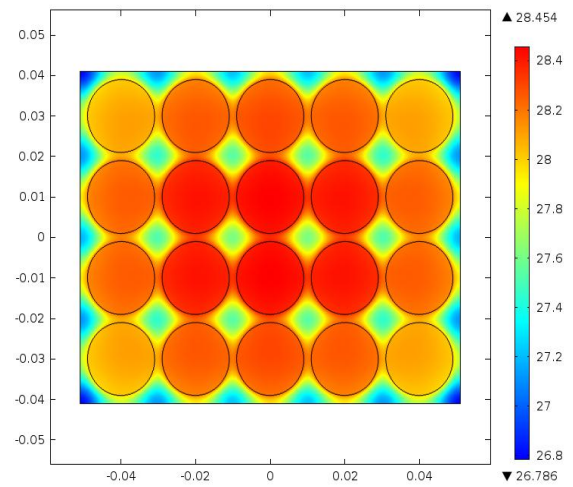
(c) $t = 30 \text{ min}$, $\text{esp}_{pcm} = 0.8 \text{ mm}$.



(d) $t = 30 \text{ min}$, $\text{esp}_{pcm} = 1.2 \text{ mm}$.

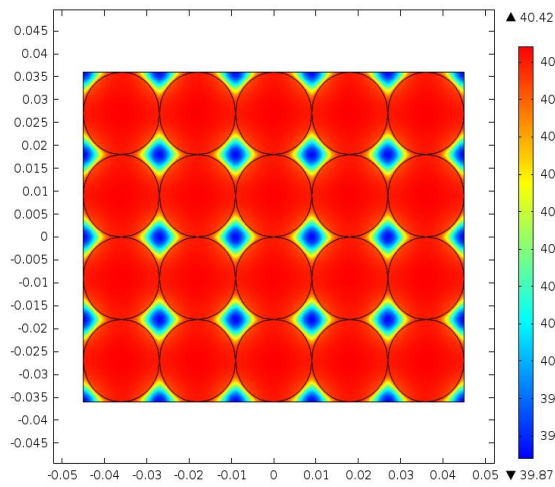


(e) $t = 30 \text{ min}$, $\text{esp}_{pcm} = 1.6 \text{ mm}$.

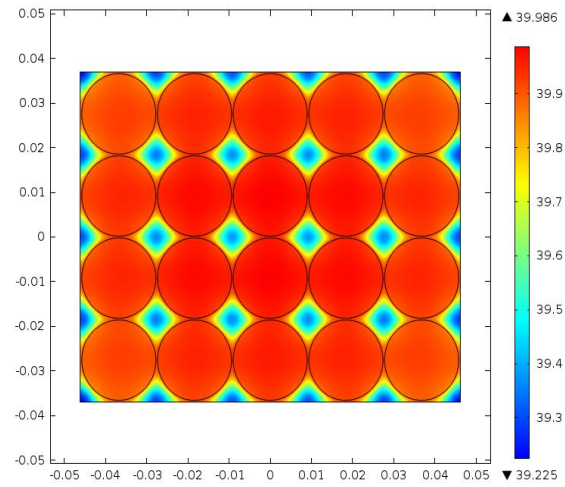


(f) $t = 30 \text{ min}$, $\text{esp}_{pcm} = 2.0 \text{ mm}$.

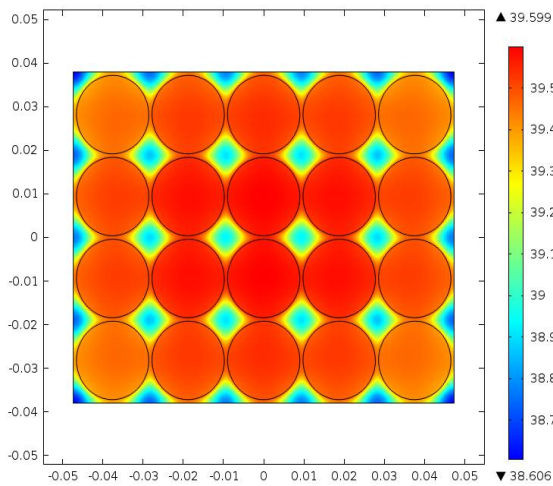
Figura B.31: Resultados para la celda 18650, tasa de descarga 2C, temperatura inicial 20°C y NPG.



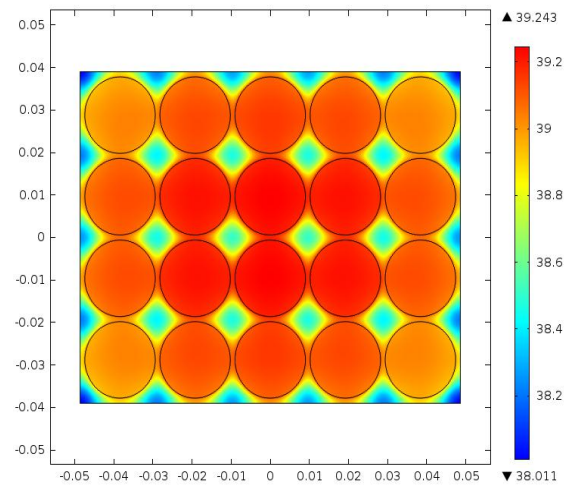
(a) $t = 30 \text{ min}$, $\text{esp}_{pcm} = 0.0 \text{ mm}$.



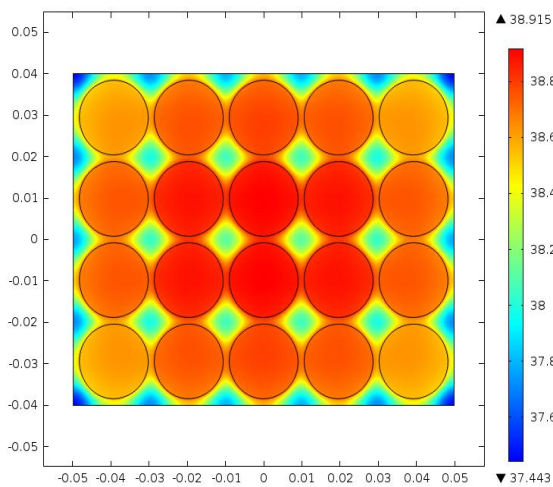
(b) $t = 30 \text{ min}$, $\text{esp}_{pcm} = 0.4 \text{ mm}$.



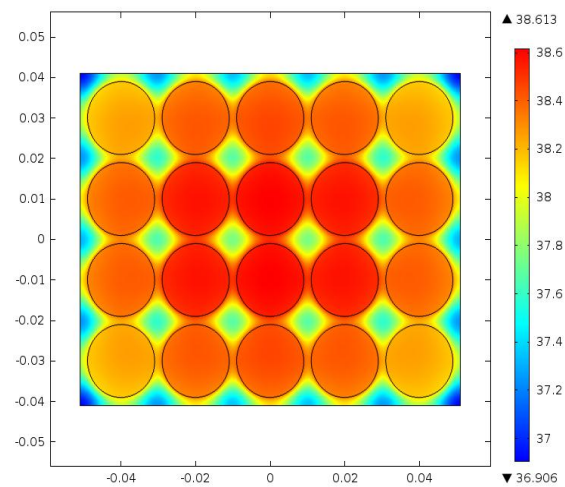
(c) $t = 30 \text{ min}$, $\text{esp}_{pcm} = 0.8 \text{ mm}$.



(d) $t = 30 \text{ min}$, $\text{esp}_{pcm} = 1.2 \text{ mm}$.

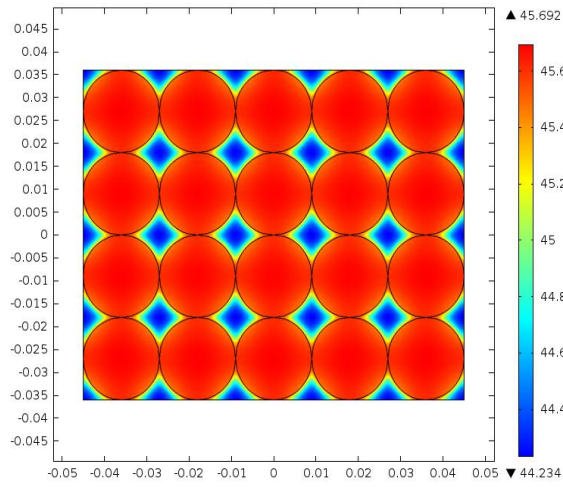


(e) $t = 30 \text{ min}$, $\text{esp}_{pcm} = 1.6 \text{ mm}$.

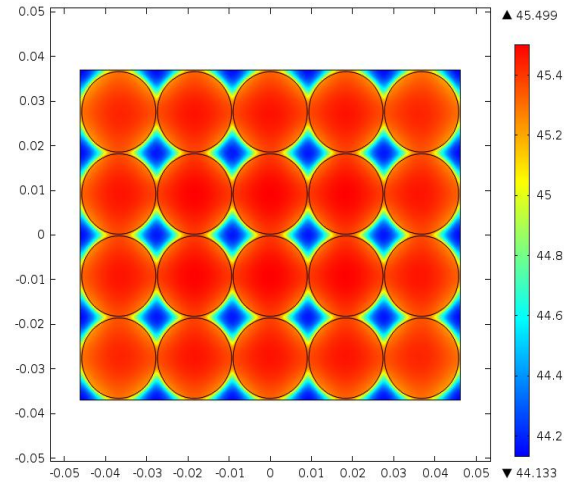


(f) $t = 30 \text{ min}$, $\text{esp}_{pcm} = 2.0 \text{ mm}$.

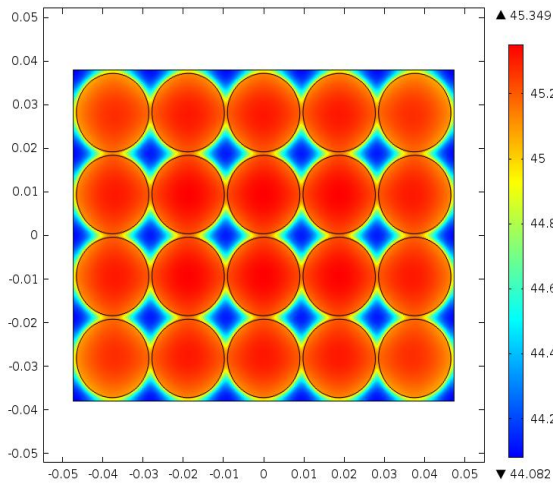
Figura B.32: Resultados para la celda 18650, tasa de descarga 2C, temperatura inicial 30°C y NPG.



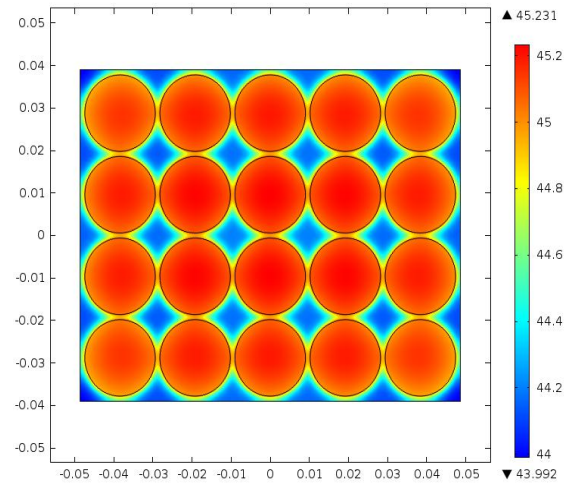
(a) $t = 30 \text{ min}$, $\text{esp}_{pcm} = 0.0 \text{ mm}$.



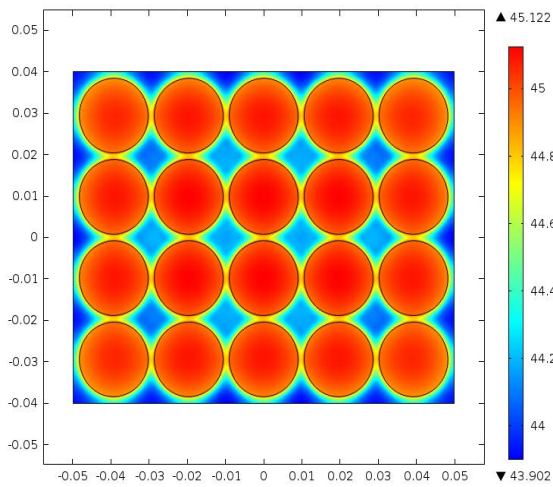
(b) $t = 30 \text{ min}$, $\text{esp}_{pcm} = 0.4 \text{ mm}$.



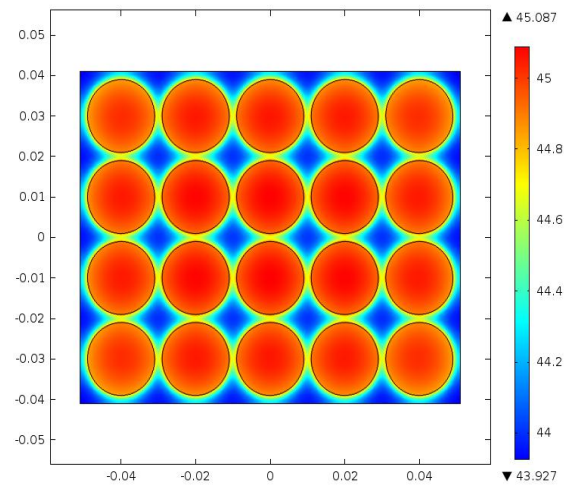
(c) $t = 30 \text{ min}$, $\text{esp}_{pcm} = 0.8 \text{ mm}$.



(d) $t = 30 \text{ min}$, $\text{esp}_{pcm} = 1.2 \text{ mm}$.

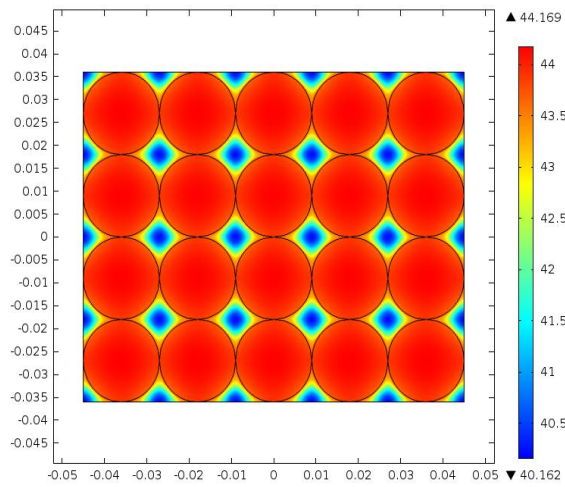


(e) $t = 30 \text{ min}$, $\text{esp}_{pcm} = 1.6 \text{ mm}$.

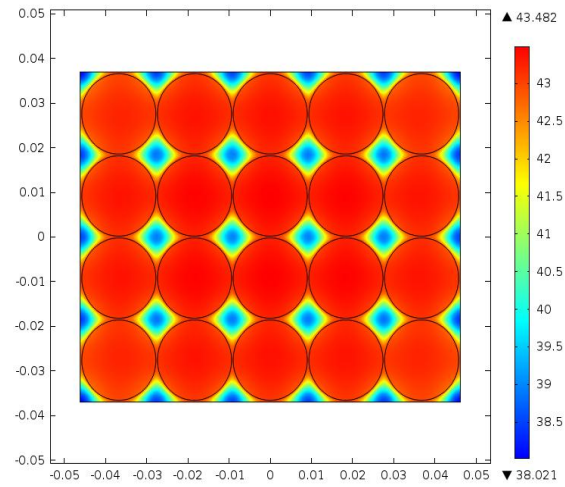


(f) $t = 30 \text{ min}$, $\text{esp}_{pcm} = 2.0 \text{ mm}$.

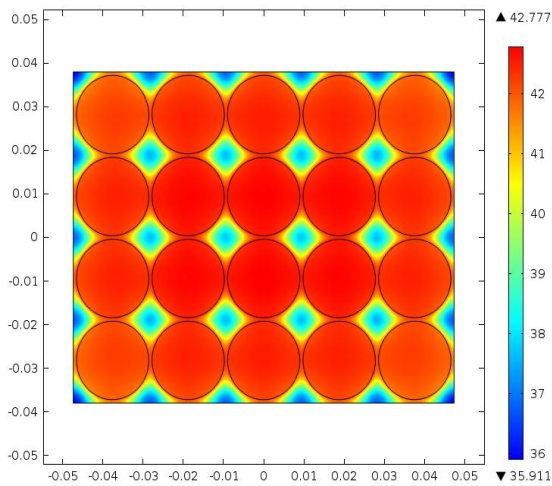
Figura B.33: Resultados para la celda 18650, tasa de descarga 2C, temperatura inicial 40°C y NPG.



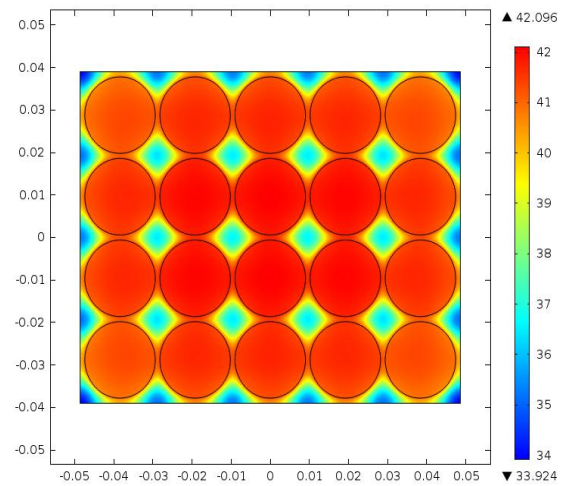
(a) $t = 6 \text{ min}$, $\text{esp}_{pcm} = 0.0 \text{ mm}$.



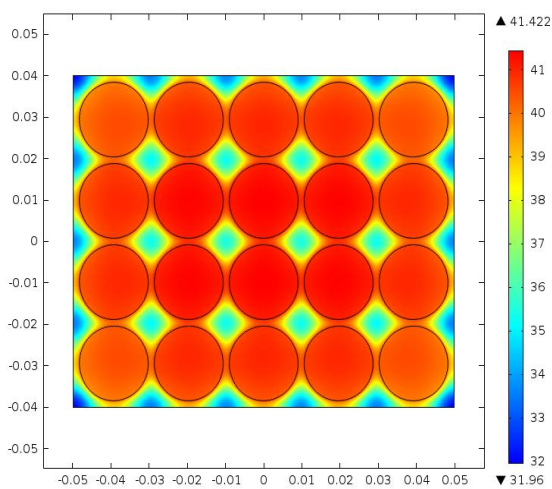
(b) $t = 6 \text{ min}$, $\text{esp}_{pcm} = 0.4 \text{ mm}$.



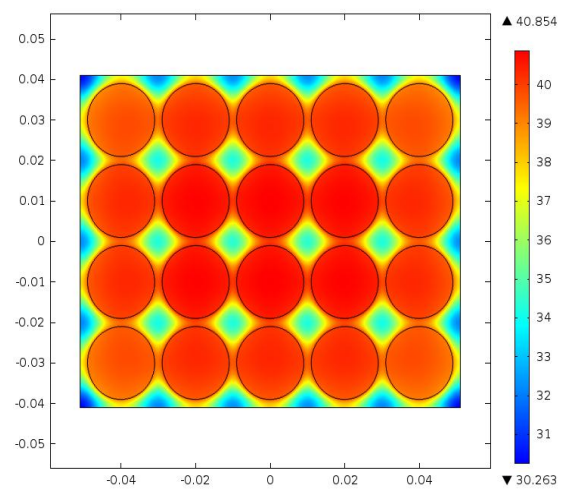
(c) $t = 6 \text{ min}$, $\text{esp}_{pcm} = 0.8 \text{ mm}$.



(d) $t = 6 \text{ min}$, $\text{esp}_{pcm} = 1.2 \text{ mm}$.

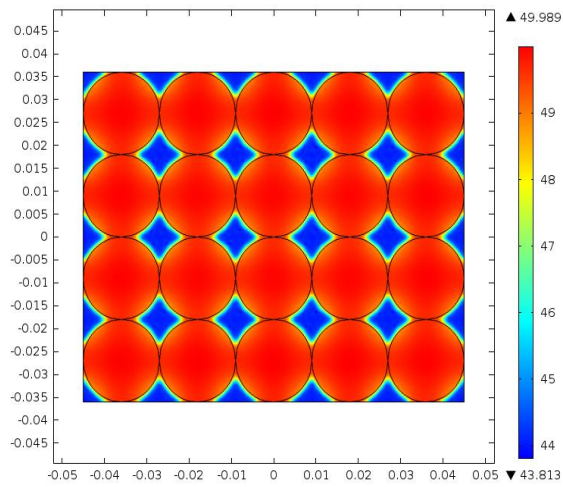


(e) $t = 6 \text{ min}$, $\text{esp}_{pcm} = 1.6 \text{ mm}$.

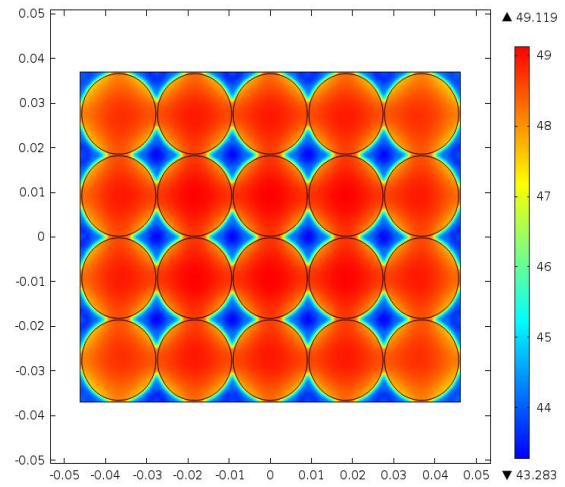


(f) $t = 6 \text{ min}$, $\text{esp}_{pcm} = 2.0 \text{ mm}$.

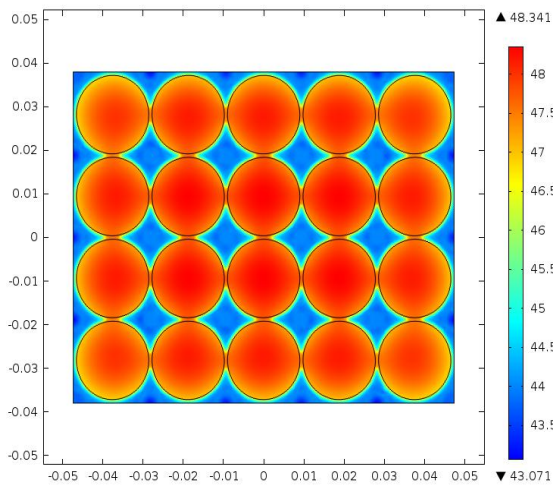
Figura B.34: Resultados para la celda 18650, tasa de descarga 10C, temperatura inicial 20°C y NPG.



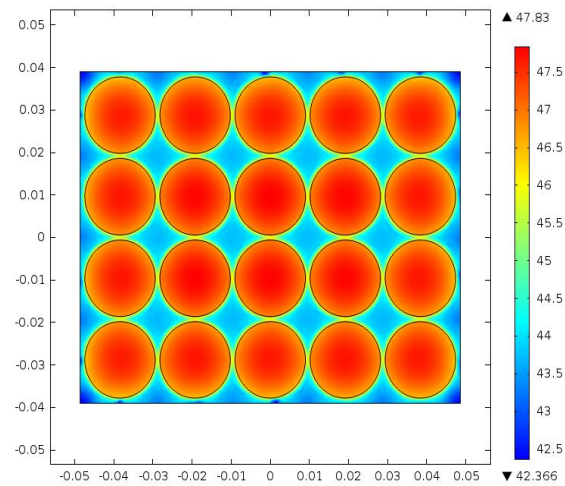
(a) $t = 6 \text{ min}$, $\text{esp}_{pcm} = 0.0 \text{ mm}$.



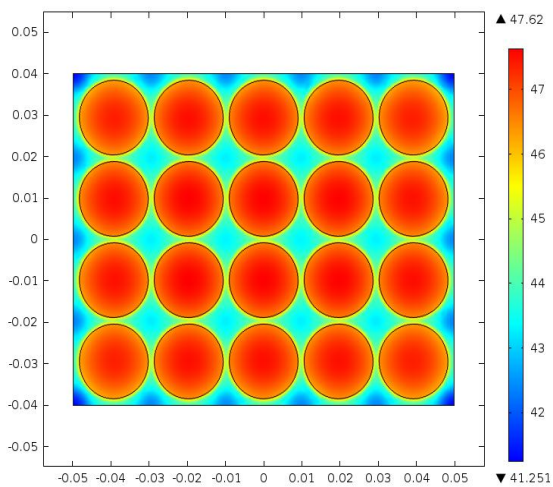
(b) $t = 6 \text{ min}$, $\text{esp}_{pcm} = 0.4 \text{ mm}$.



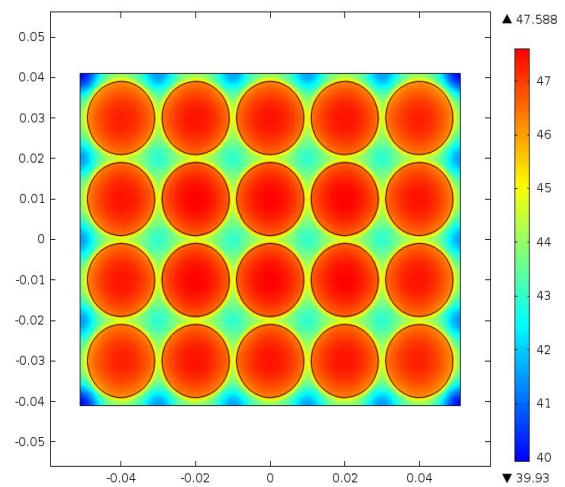
(c) $t = 6 \text{ min}$, $\text{esp}_{pcm} = 0.8 \text{ mm}$.



(d) $t = 6 \text{ min}$, $\text{esp}_{pcm} = 1.2 \text{ mm}$.

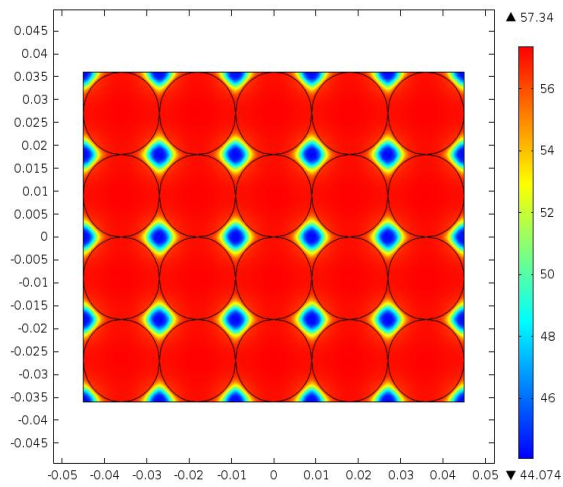


(e) $t = 6 \text{ min}$, $\text{esp}_{pcm} = 1.6 \text{ mm}$.

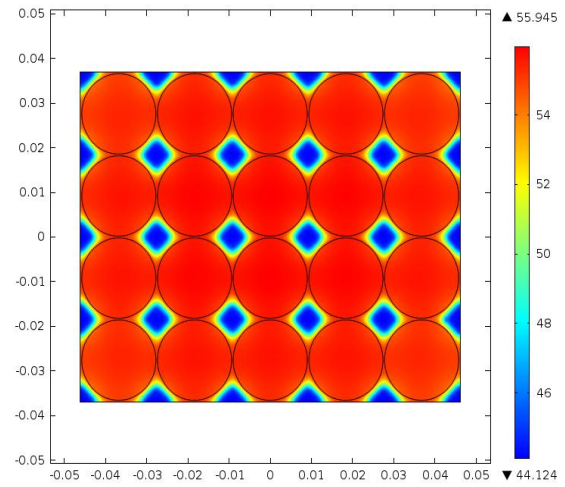


(f) $t = 6 \text{ min}$, $\text{esp}_{pcm} = 2.0 \text{ mm}$.

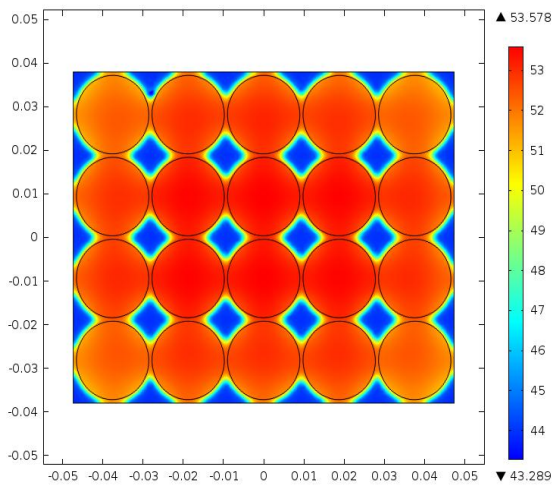
Figura B.35: Resultados para la celda 18650, tasa de descarga 10C, temperatura inicial 30°C y NPG.



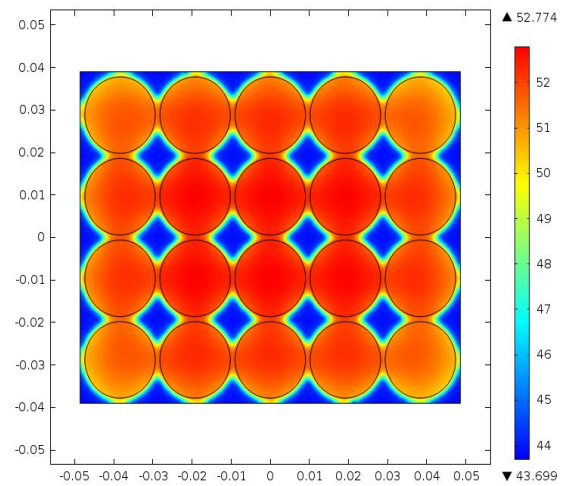
(a) $t = 6 \text{ min}$, $\text{esp}_{pcm} = 0.0 \text{ mm}$.



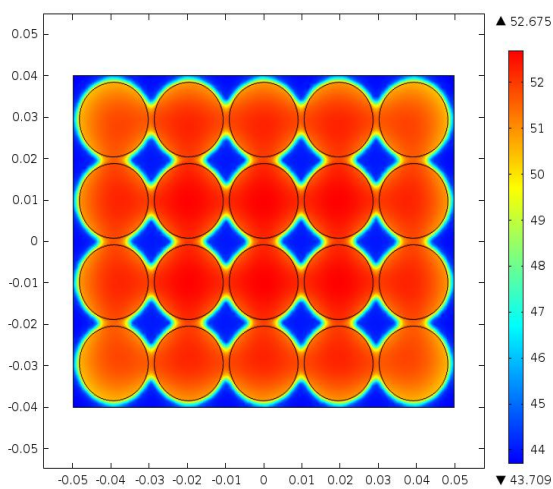
(b) $t = 6 \text{ min}$, $\text{esp}_{pcm} = 0.4 \text{ mm}$.



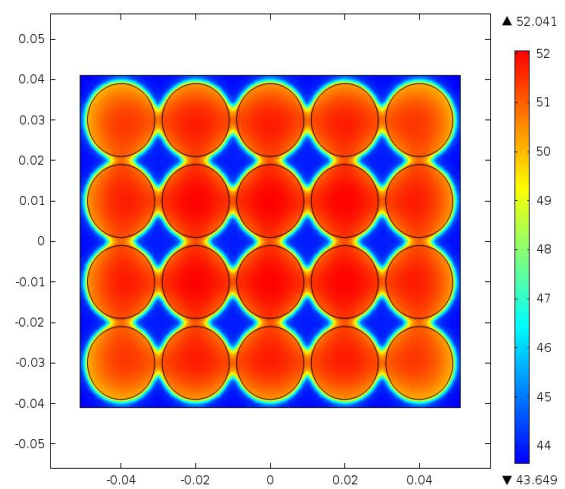
(c) $t = 6 \text{ min}$, $\text{esp}_{pcm} = 0.8 \text{ mm}$.



(d) $t = 6 \text{ min}$, $\text{esp}_{pcm} = 1.2 \text{ mm}$.

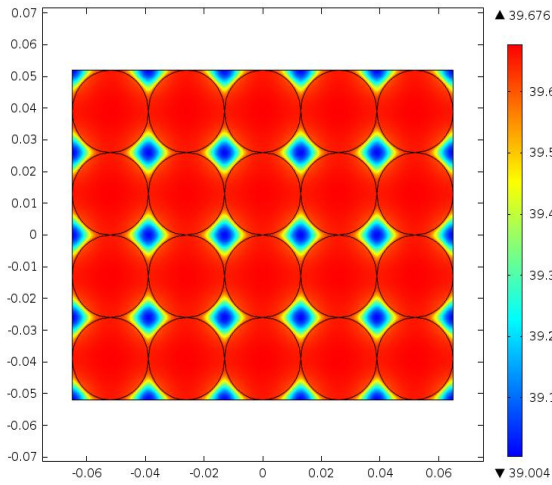


(e) $t = 6 \text{ min}$, $\text{esp}_{pcm} = 1.6 \text{ mm}$.

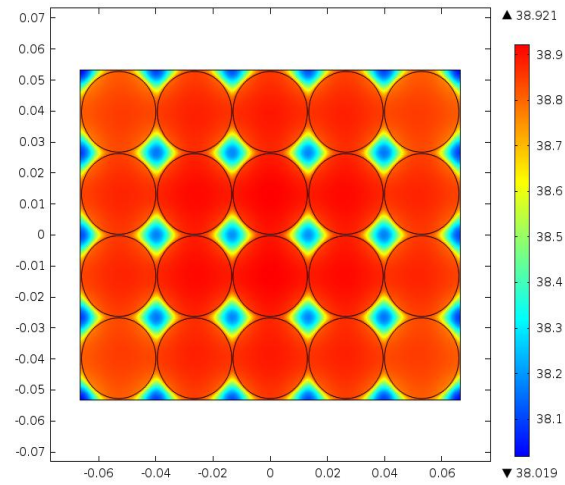


(f) $t = 6 \text{ min}$, $\text{esp}_{pcm} = 2.0 \text{ mm}$.

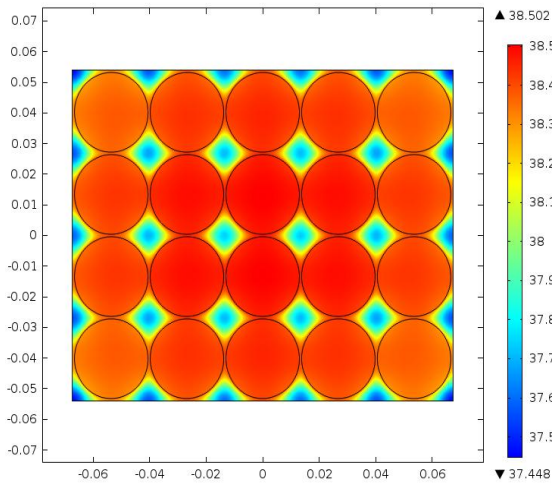
Figura B.36: Resultados para la celda 18650, tasa de descarga 10C, temperatura inicial 40°C y NPG.



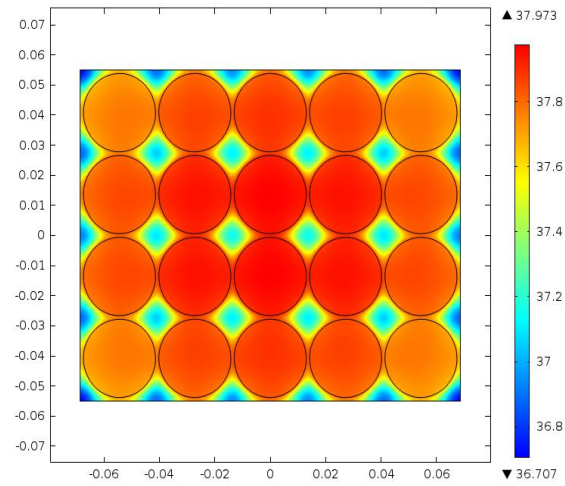
(a) $t = 2 \text{ hr}$, $\text{esp}_{pcm} = 0.0 \text{ mm}$.



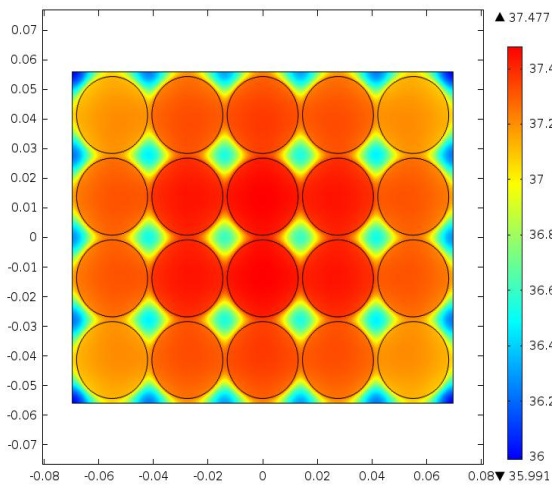
(b) $t = 2 \text{ hr}$, $\text{esp}_{pcm} = 0.4 \text{ mm}$.



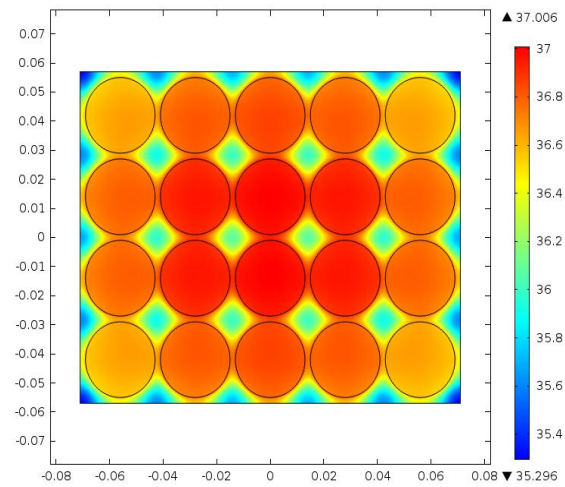
(c) $t = 2 \text{ hr}$, $\text{esp}_{pcm} = 0.8 \text{ mm}$.



(d) $t = 2 \text{ hr}$, $\text{esp}_{pcm} = 1.2 \text{ mm}$.

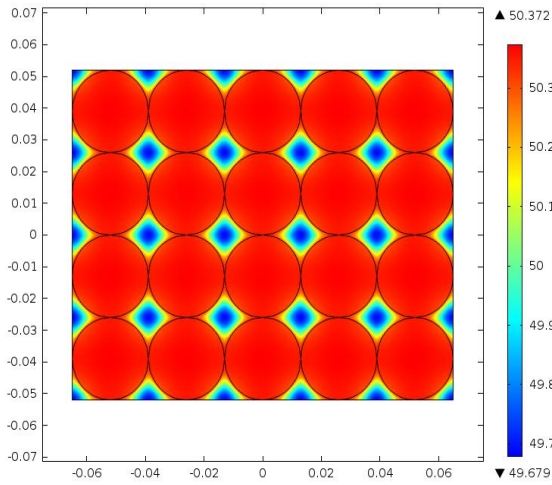


(e) $t = 2 \text{ hr}$, $\text{esp}_{pcm} = 1.6 \text{ mm}$.

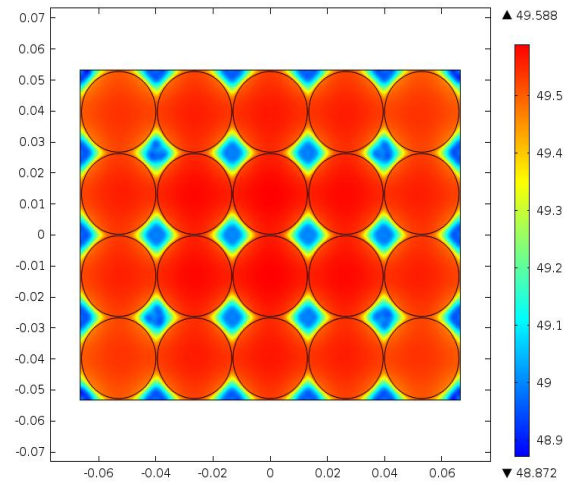


(f) $t = 2 \text{ hr}$, $\text{esp}_{pcm} = 2.0 \text{ mm}$.

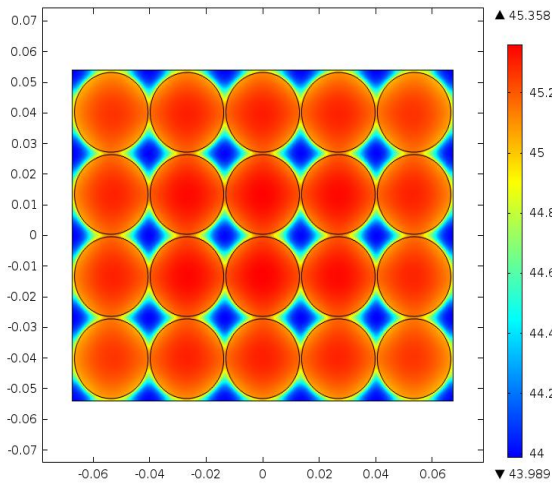
Figura B.37: Resultados para la celda 26650, tasa de descarga 0.5C, temperatura inicial 20°C y NPG.



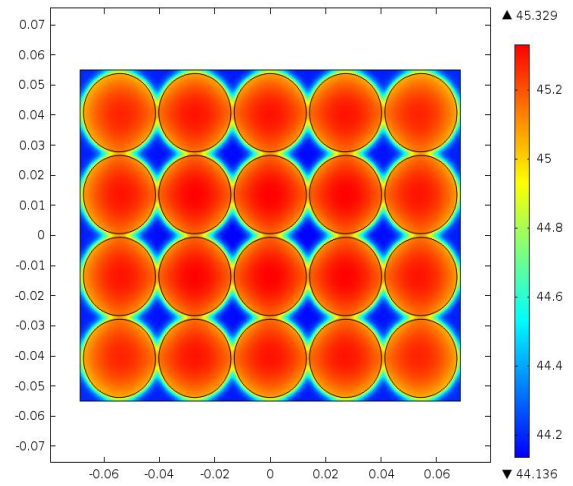
(a) $t = 2 \text{ hr}$, $\text{esp}_{pcm} = 0.0 \text{ mm}$.



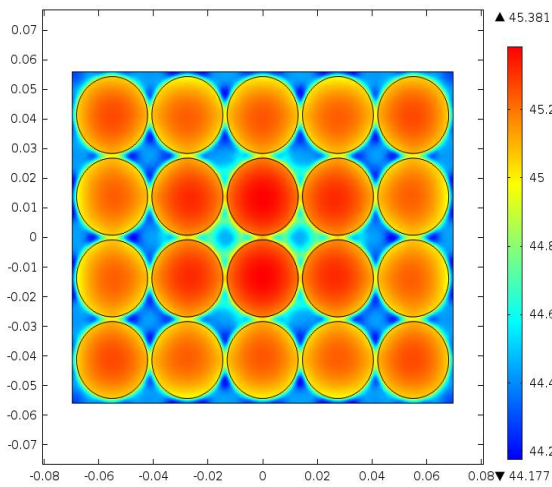
(b) $t = 2 \text{ hr}$, $\text{esp}_{pcm} = 0.4 \text{ mm}$.



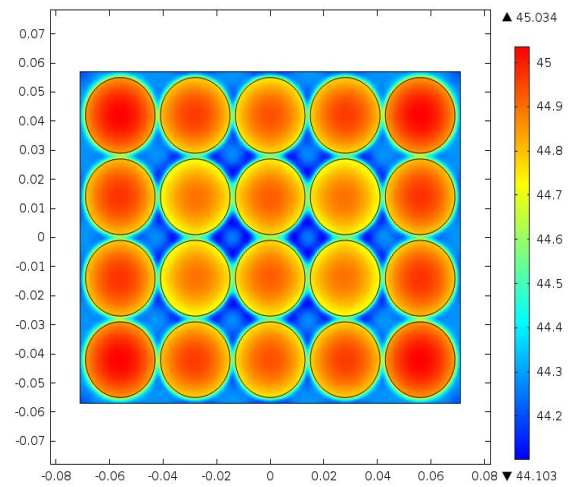
(c) $t = 2 \text{ hr}$, $\text{esp}_{pcm} = 0.8 \text{ mm}$.



(d) $t = 2 \text{ hr}$, $\text{esp}_{pcm} = 1.2 \text{ mm}$.

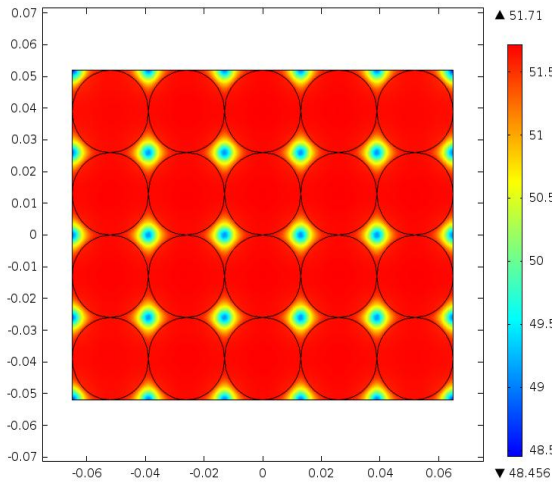


(e) $t = 2 \text{ hr}$, $\text{esp}_{pcm} = 1.6 \text{ mm}$.

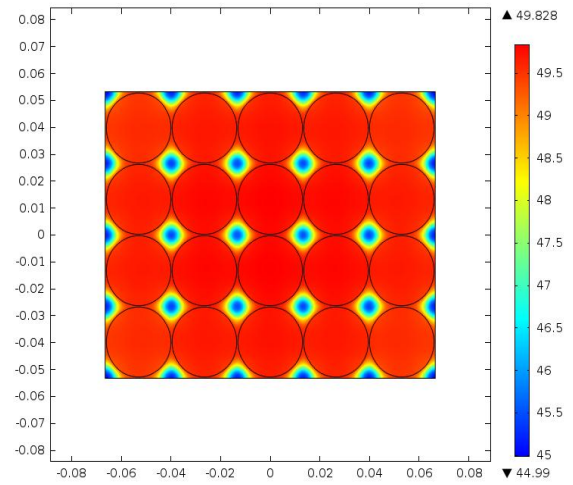


(f) $t = 2 \text{ hr}$, $\text{esp}_{pcm} = 2.0 \text{ mm}$.

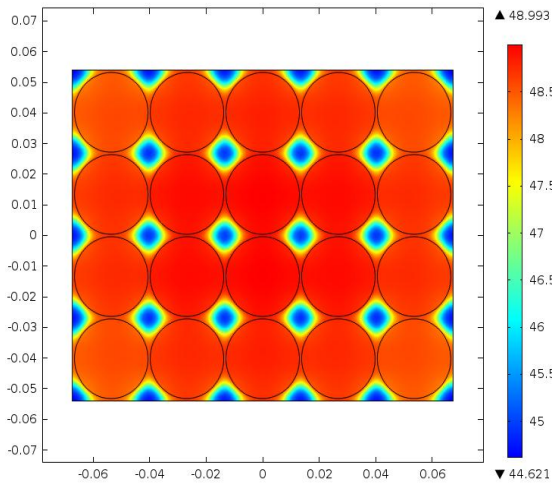
Figura B.38: Resultados para la celda 26650, tasa de descarga 0.5C, temperatura inicial 30°C y NPG.



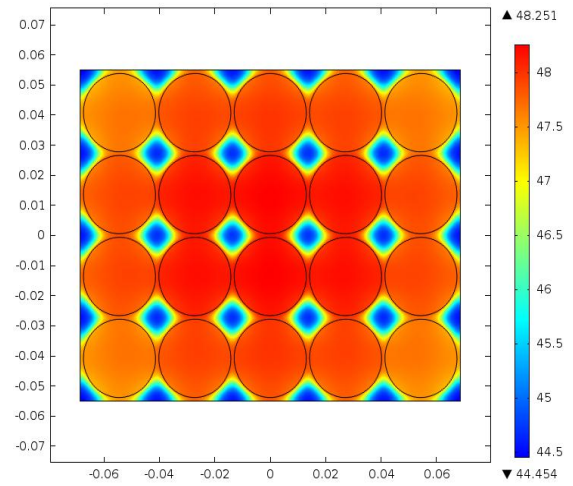
(a) $t = 2 \text{ hr}$, $\text{esp}_{pcm} = 0.0 \text{ mm}$.



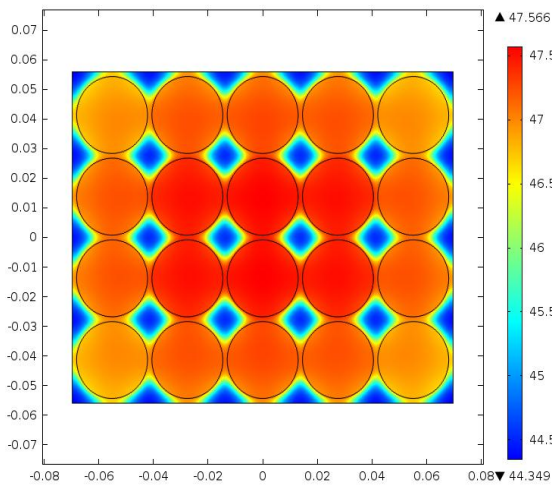
(b) $t = 2 \text{ hr}$, $\text{esp}_{pcm} = 0.4 \text{ mm}$.



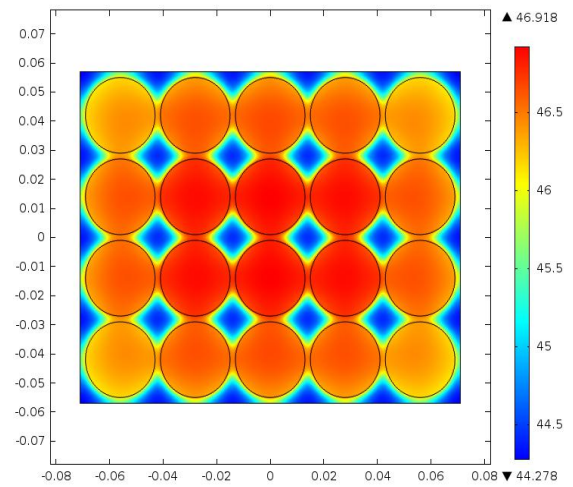
(c) $t = 2 \text{ hr}$, $\text{esp}_{pcm} = 0.8 \text{ mm}$.



(d) $t = 2 \text{ hr}$, $\text{esp}_{pcm} = 1.2 \text{ mm}$.

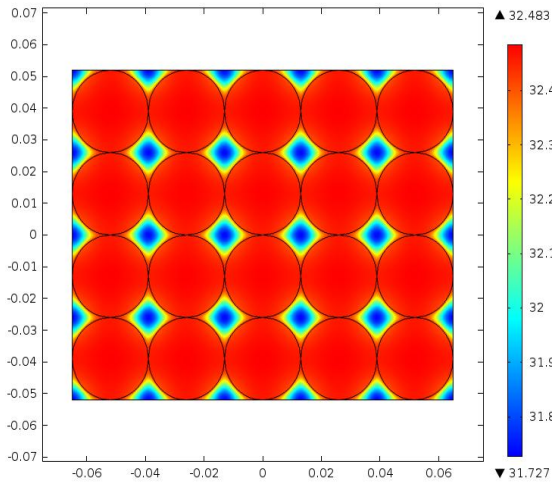


(e) $t = 2 \text{ hr}$, $\text{esp}_{pcm} = 1.6 \text{ mm}$.

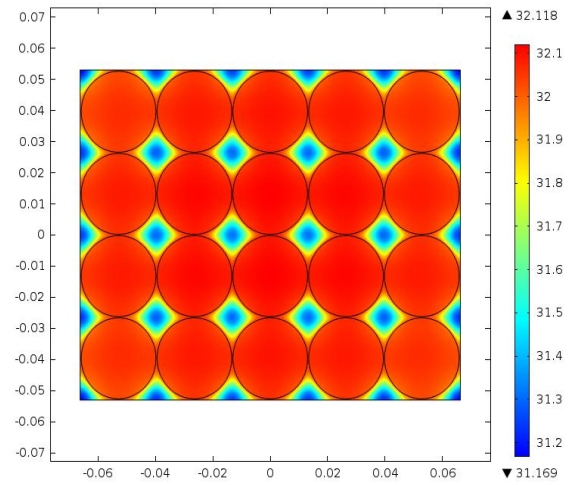


(f) $t = 2 \text{ hr}$, $\text{esp}_{pcm} = 2.0 \text{ mm}$.

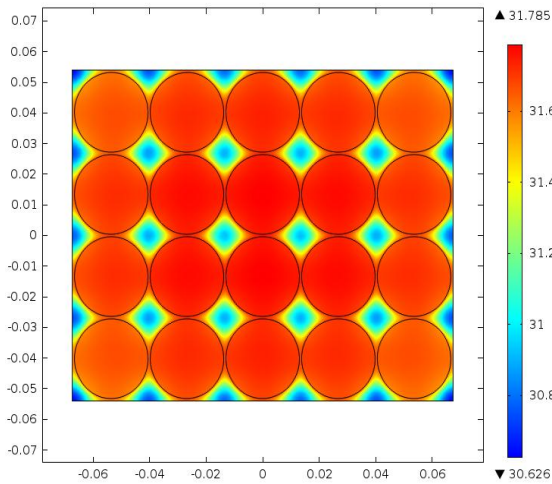
Figura B.39: Resultados para la celda 26650, tasa de descarga 0.5C, temperatura inicial 40°C y NPG.



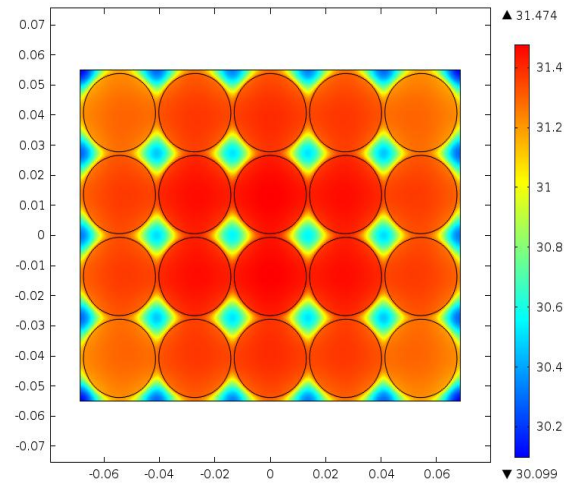
(a) $t = 1 \text{ hr}$, $\text{esp}_{pcm} = 0.0 \text{ mm}$.



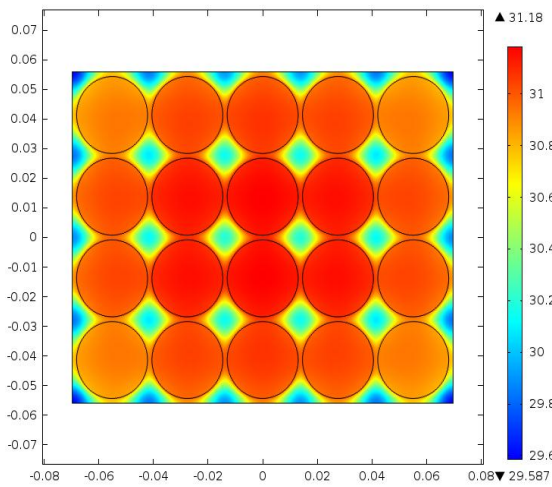
(b) $t = 1 \text{ hr}$, $\text{esp}_{pcm} = 0.4 \text{ mm}$.



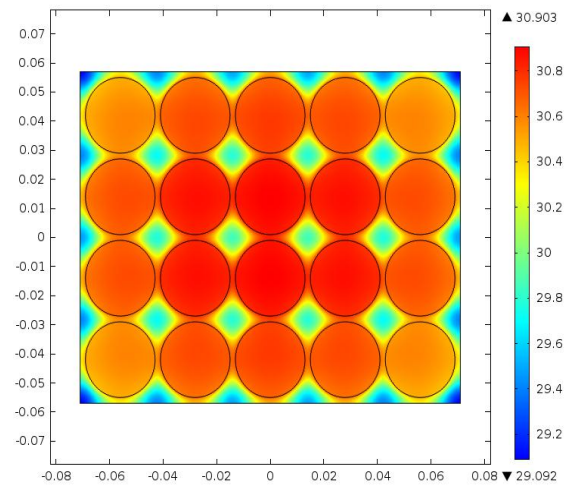
(c) $t = 1 \text{ hr}$, $\text{esp}_{pcm} = 0.8 \text{ mm}$.



(d) $t = 1 \text{ hr}$, $\text{esp}_{pcm} = 1.2 \text{ mm}$.

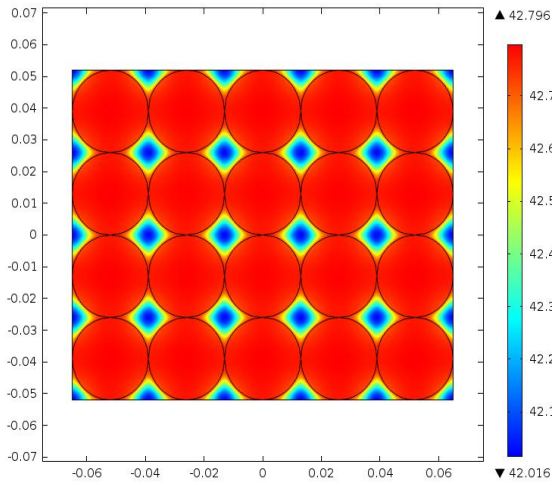


(e) $t = 1 \text{ hr}$, $\text{esp}_{pcm} = 1.6 \text{ mm}$.

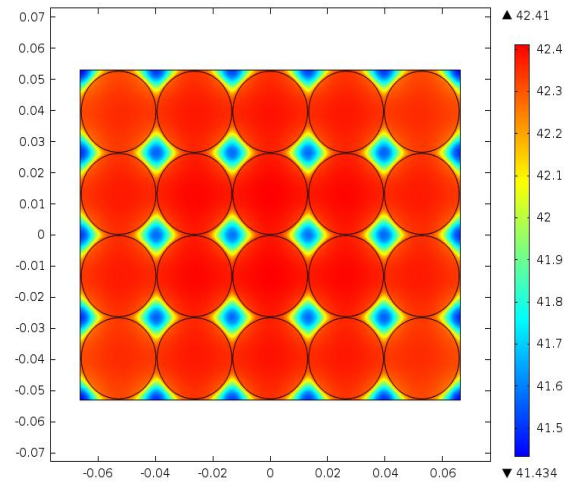


(f) $t = 1 \text{ hr}$, $\text{esp}_{pcm} = 2.0 \text{ mm}$.

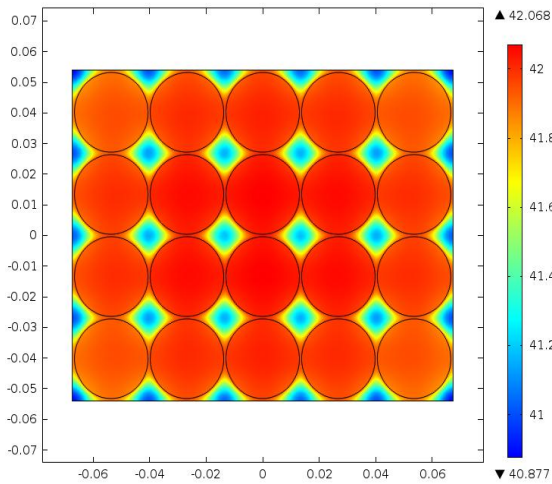
Figura B.40: Resultados para la celda 26650, tasa de descarga 1C, temperatura inicial 20°C y NPG.



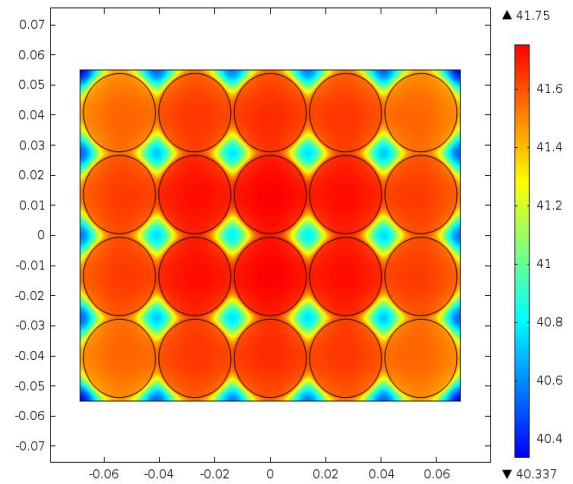
(a) $t = 1 \text{ hr}$, $\text{esp}_{pcm} = 0.0 \text{ mm}$.



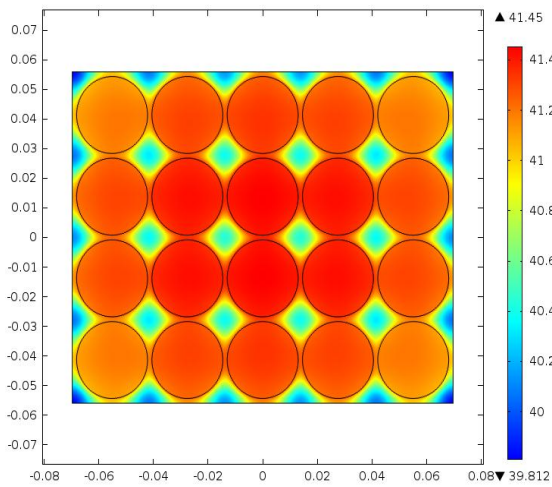
(b) $t = 1 \text{ hr}$, $\text{esp}_{pcm} = 0.4 \text{ mm}$.



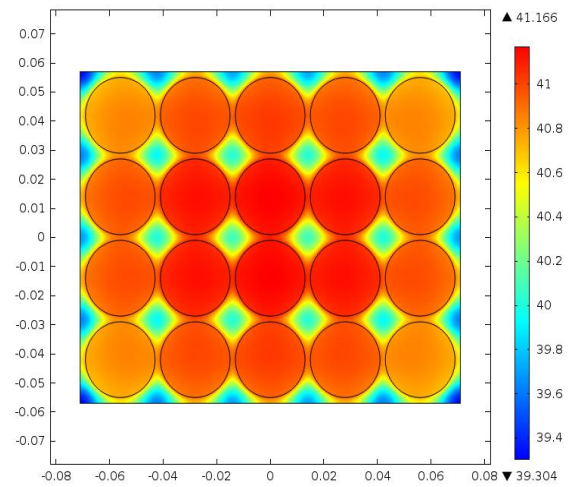
(c) $t = 1 \text{ hr}$, $\text{esp}_{pcm} = 0.8 \text{ mm}$.



(d) $t = 1 \text{ hr}$, $\text{esp}_{pcm} = 1.2 \text{ mm}$.

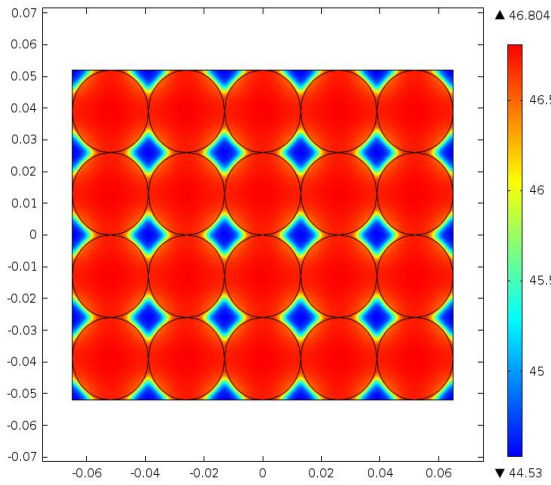


(e) $t = 1 \text{ hr}$, $\text{esp}_{pcm} = 1.6 \text{ mm}$.

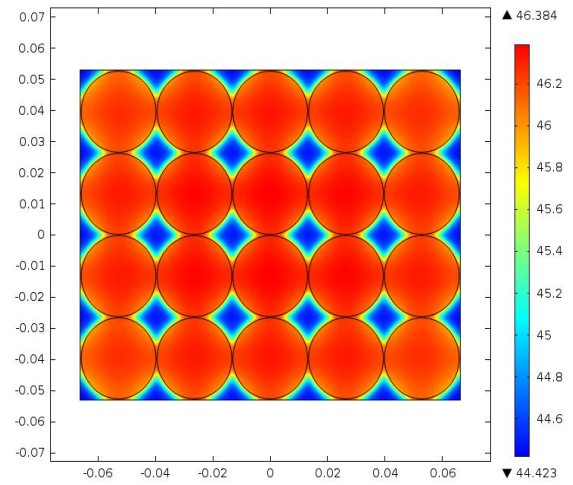


(f) $t = 1 \text{ hr}$, $\text{esp}_{pcm} = 2.0 \text{ mm}$.

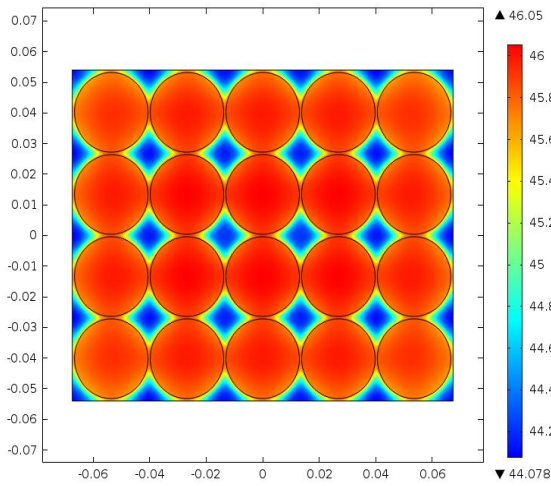
Figura B.41: Resultados para la celda 26650, tasa de descarga 1C, temperatura inicial 30°C y NPG.



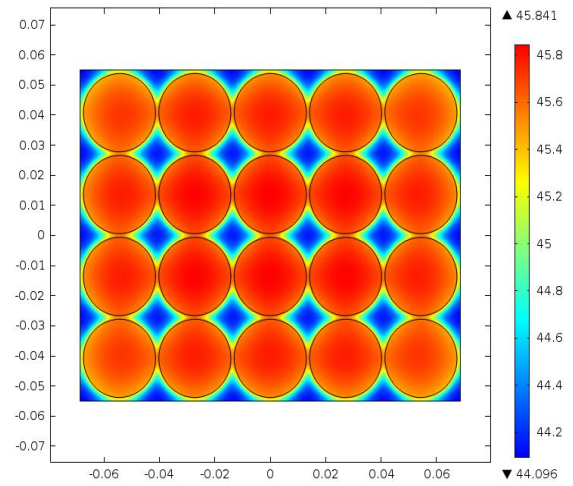
(a) $t = 1 \text{ hr}$, $\text{esp}_{pcm} = 0.0 \text{ mm}$.



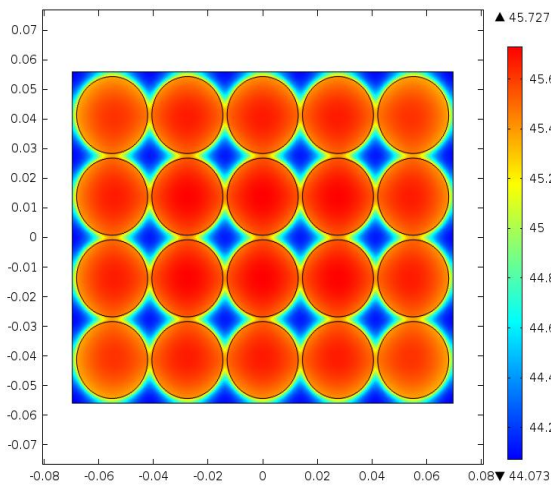
(b) $t = 1 \text{ hr}$, $\text{esp}_{pcm} = 0.4 \text{ mm}$.



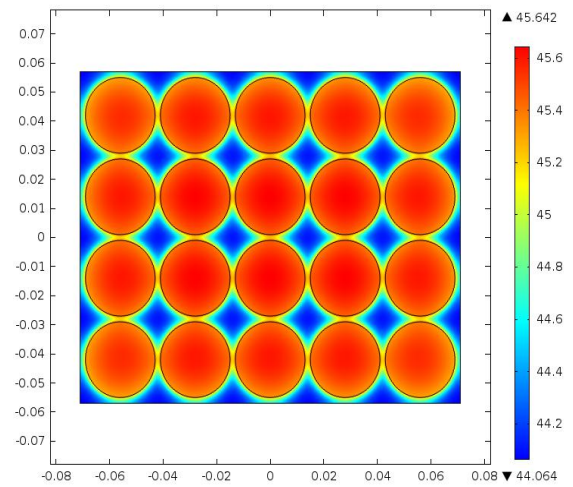
(c) $t = 1 \text{ hr}$, $\text{esp}_{pcm} = 0.8 \text{ mm}$.



(d) $t = 1 \text{ hr}$, $\text{esp}_{pcm} = 1.2 \text{ mm}$.

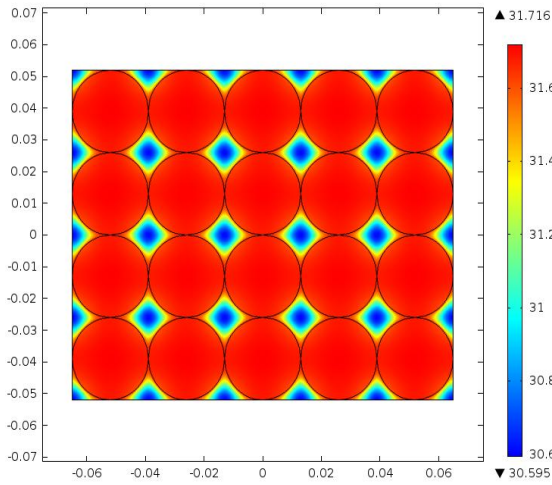


(e) $t = 1 \text{ hr}$, $\text{esp}_{pcm} = 1.6 \text{ mm}$.

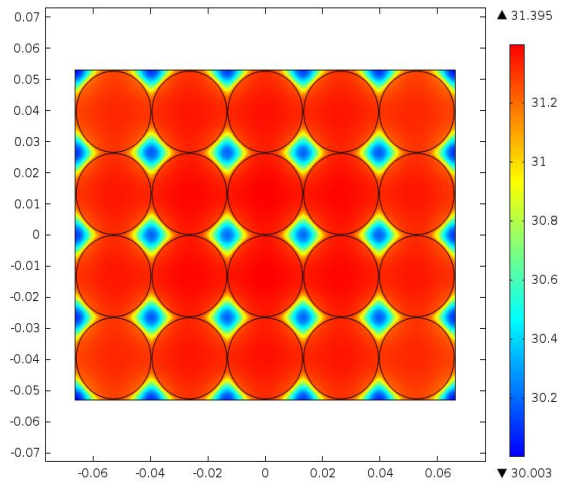


(f) $t = 1 \text{ hr}$, $\text{esp}_{pcm} = 2.0 \text{ mm}$.

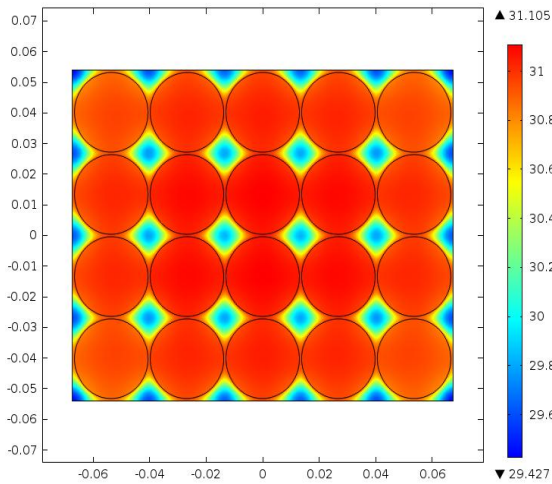
Figura B.42: Resultados para la celda 26650, tasa de descarga 1C, temperatura inicial 40°C y NPG.



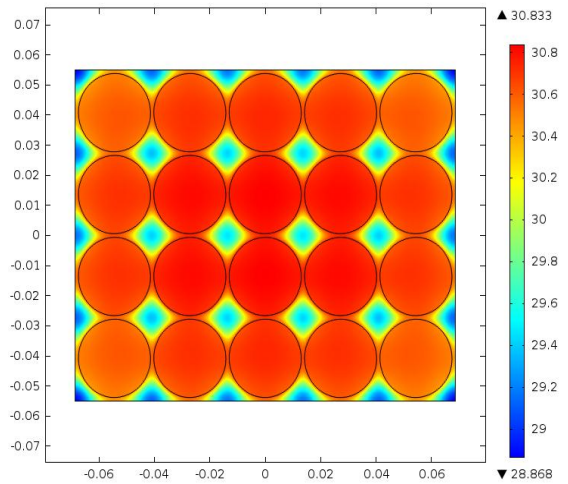
(a) $t = 30 \text{ min}$, $\text{esp}_{pcm} = 0.0 \text{ mm}$.



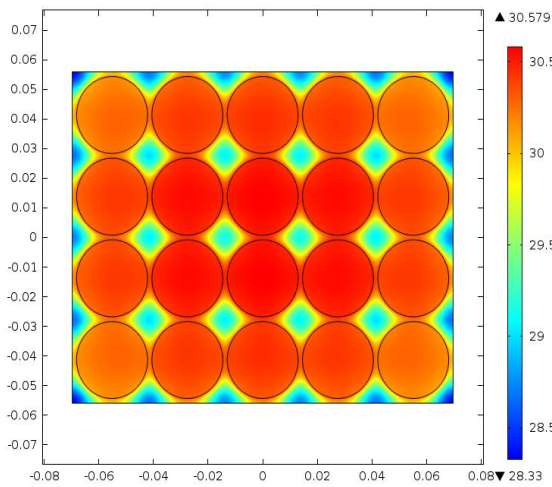
(b) $t = 30 \text{ min}$, $\text{esp}_{pcm} = 0.4 \text{ mm}$.



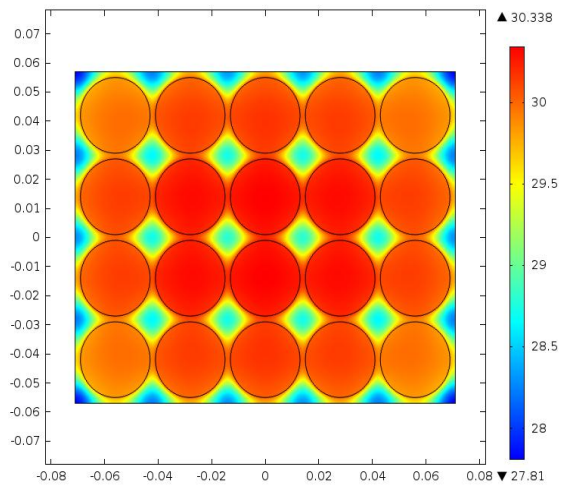
(c) $t = 30 \text{ min}$, $\text{esp}_{pcm} = 0.8 \text{ mm}$.



(d) $t = 30 \text{ min}$, $\text{esp}_{pcm} = 1.2 \text{ mm}$.

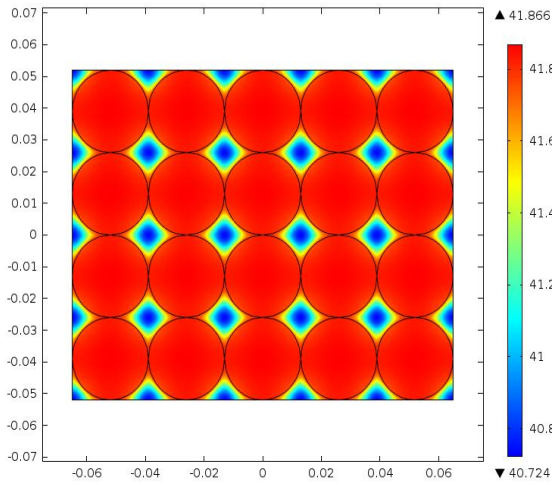


(e) $t = 30 \text{ min}$, $\text{esp}_{pcm} = 1.6 \text{ mm}$.

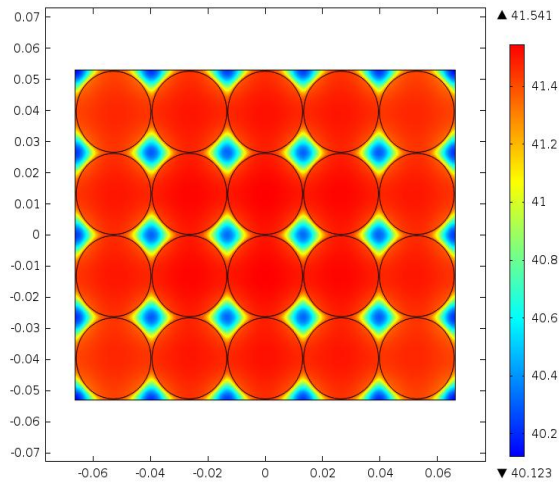


(f) $t = 30 \text{ min}$, $\text{esp}_{pcm} = 2.0 \text{ mm}$.

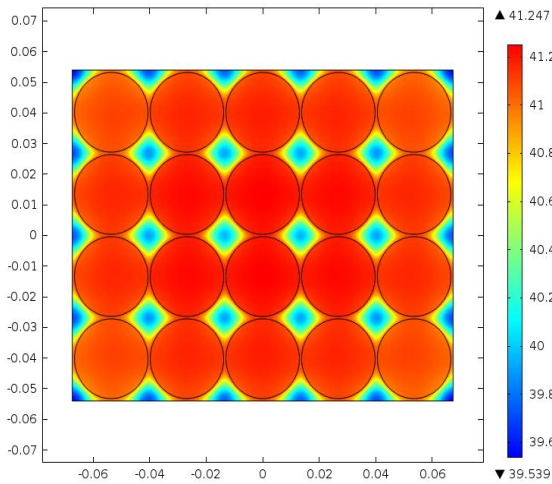
Figura B.43: Resultados para la celda 26650, tasa de descarga 2C, temperatura inicial 20°C y NPG.



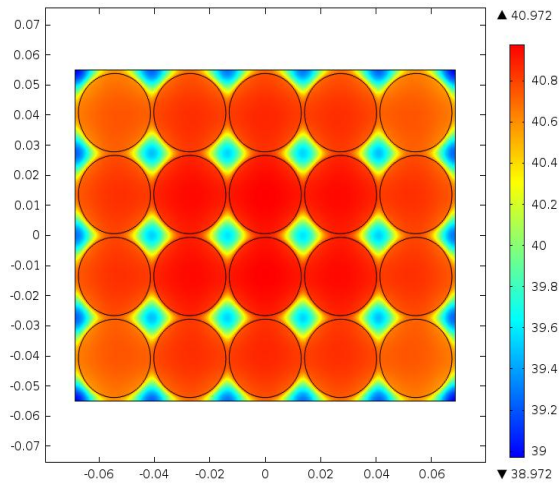
(a) $t = 30 \text{ min}$, $\text{esp}_{pcm} = 0.0 \text{ mm}$.



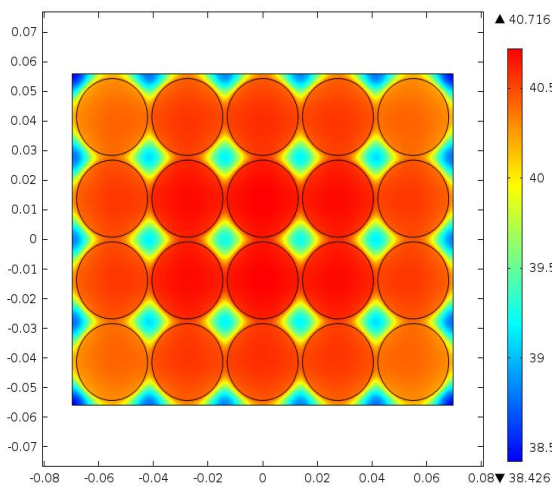
(b) $t = 30 \text{ min}$, $\text{esp}_{pcm} = 0.4 \text{ mm}$.



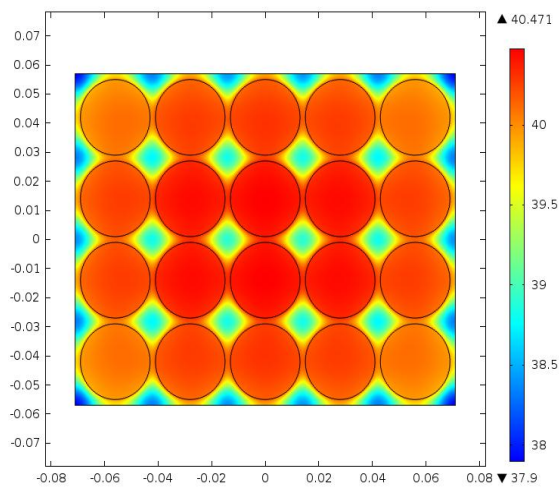
(c) $t = 30 \text{ min}$, $\text{esp}_{pcm} = 0.8 \text{ mm}$.



(d) $t = 30 \text{ min}$, $\text{esp}_{pcm} = 1.2 \text{ mm}$.

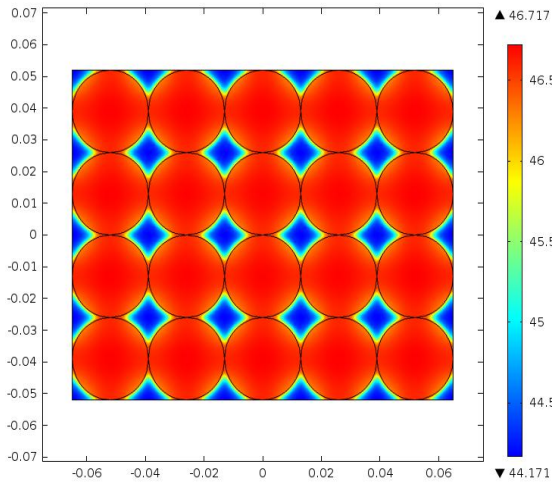


(e) $t = 30 \text{ min}$, $\text{esp}_{pcm} = 1.6 \text{ mm}$.

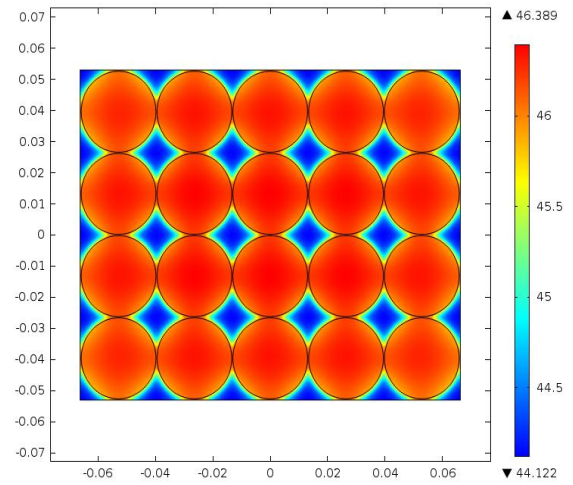


(f) $t = 30 \text{ min}$, $\text{esp}_{pcm} = 2.0 \text{ mm}$.

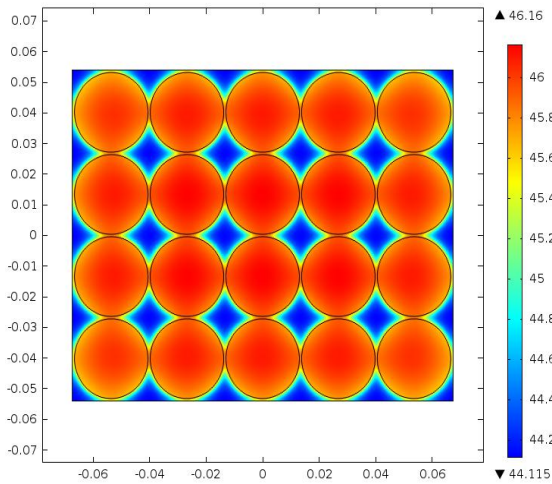
Figura B.44: Resultados para la celda 26650, tasa de descarga 2C, temperatura inicial 30°C y NPG.



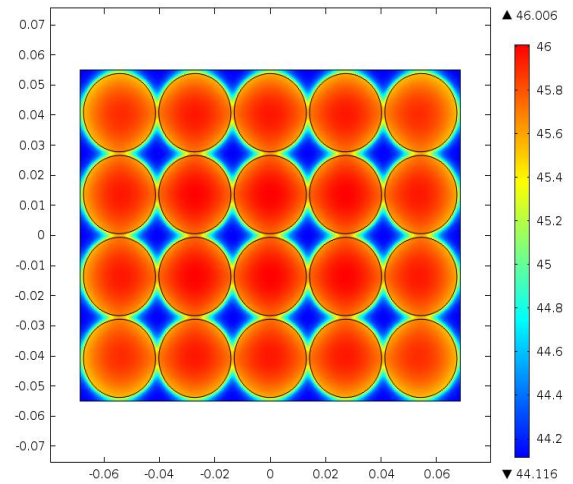
(a) $t = 30 \text{ min}$, $\text{esp}_{pcm} = 0.0 \text{ mm}$.



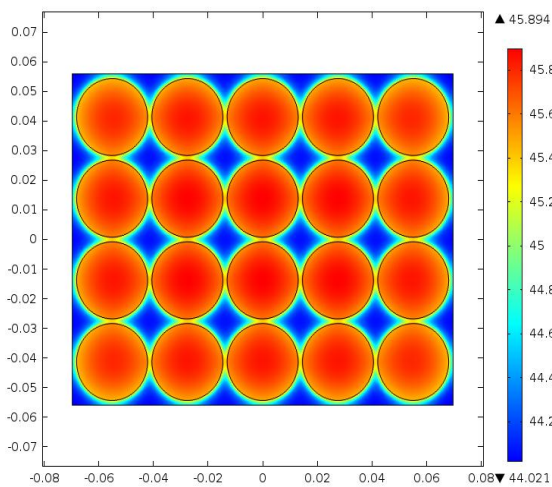
(b) $t = 30 \text{ min}$, $\text{esp}_{pcm} = 0.4 \text{ mm}$.



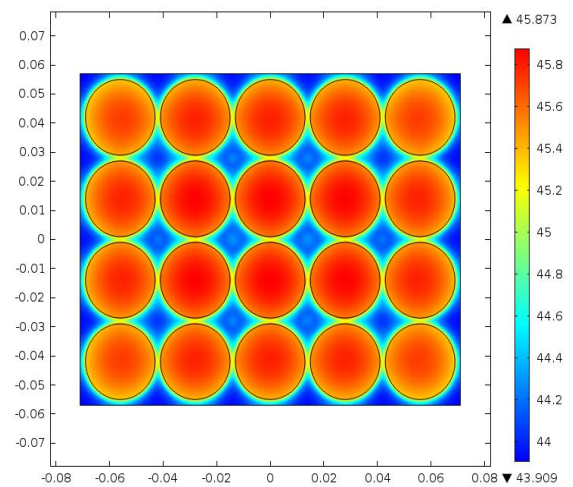
(c) $t = 30 \text{ min}$, $\text{esp}_{pcm} = 0.8 \text{ mm}$.



(d) $t = 30 \text{ min}$, $\text{esp}_{pcm} = 1.2 \text{ mm}$.

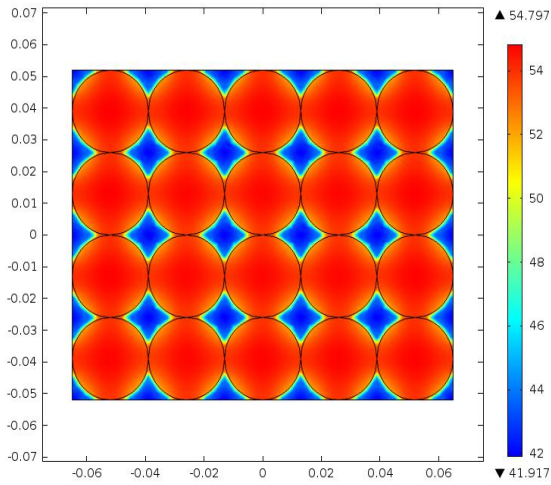


(e) $t = 30 \text{ min}$, $\text{esp}_{pcm} = 1.6 \text{ mm}$.

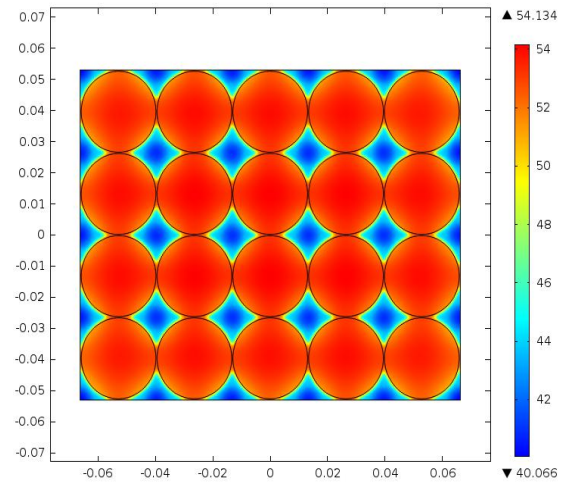


(f) $t = 30 \text{ min}$, $\text{esp}_{pcm} = 2.0 \text{ mm}$.

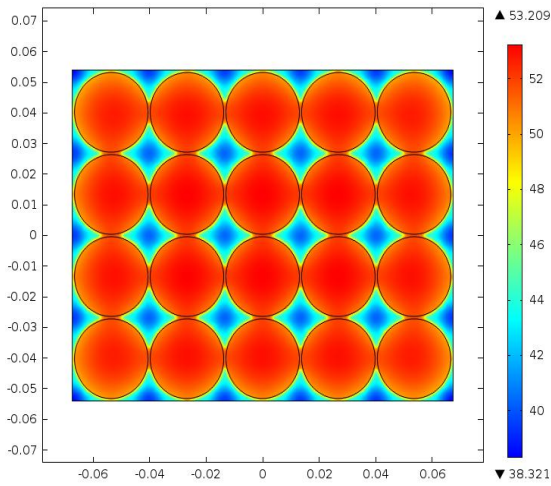
Figura B.45: Resultados para la celda 26650, tasa de descarga 2C, temperatura inicial 40°C y NPG.



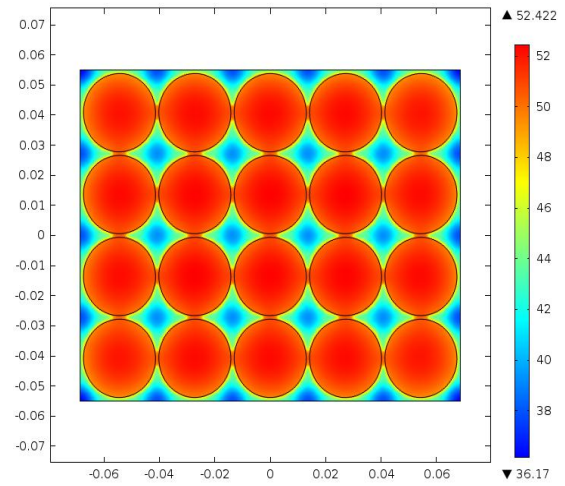
(a) $t = 6 \text{ min}$, $\text{esp}_{pcm} = 0.0 \text{ mm}$.



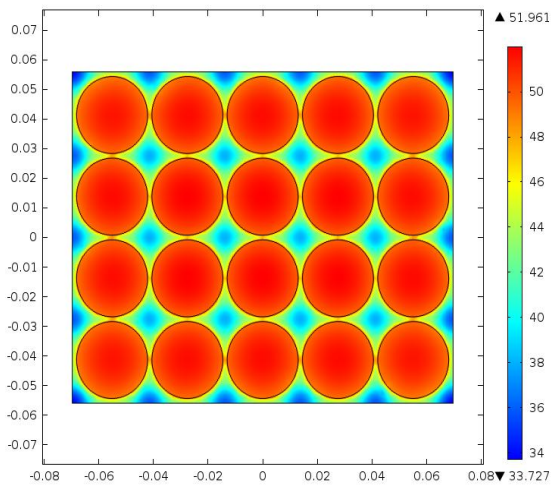
(b) $t = 6 \text{ min}$, $\text{esp}_{pcm} = 0.4 \text{ mm}$.



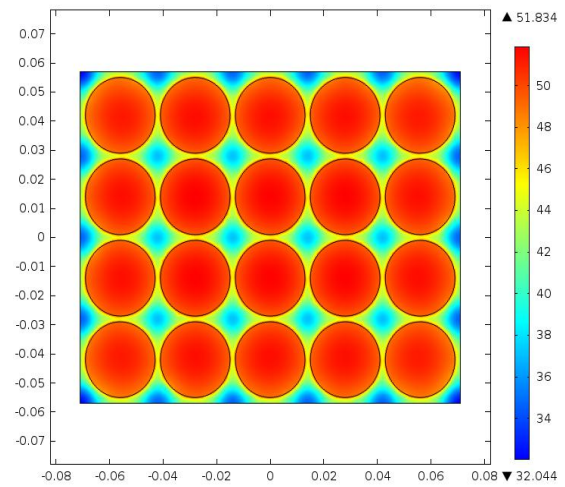
(c) $t = 6 \text{ min}$, $\text{esp}_{pcm} = 0.8 \text{ mm}$.



(d) $t = 6 \text{ min}$, $\text{esp}_{pcm} = 1.2 \text{ mm}$.

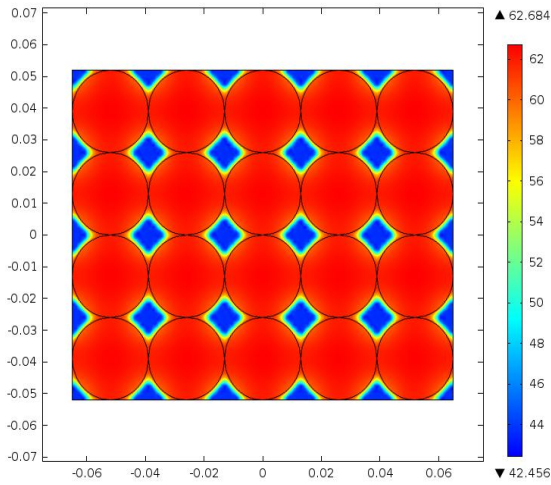


(e) $t = 6 \text{ min}$, $\text{esp}_{pcm} = 1.6 \text{ mm}$.

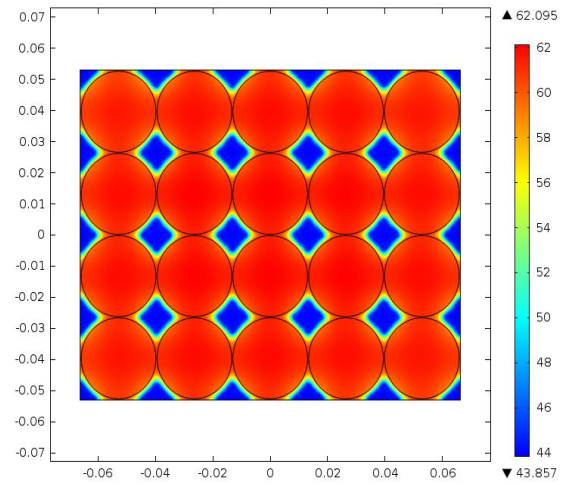


(f) $t = 6 \text{ min}$, $\text{esp}_{pcm} = 2.0 \text{ mm}$.

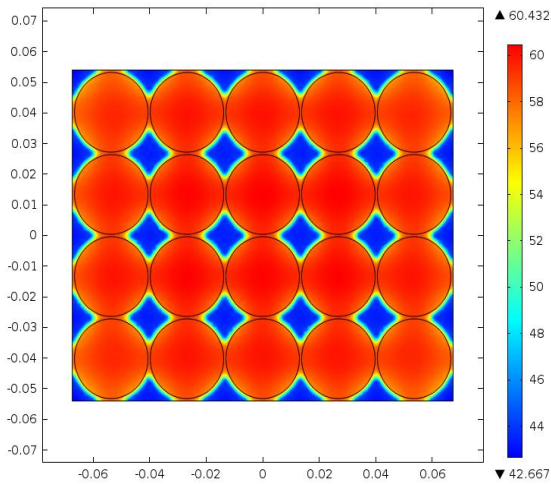
Figura B.46: Resultados para la celda 26650, tasa de descarga 10C, temperatura inicial 20°C y NPG.



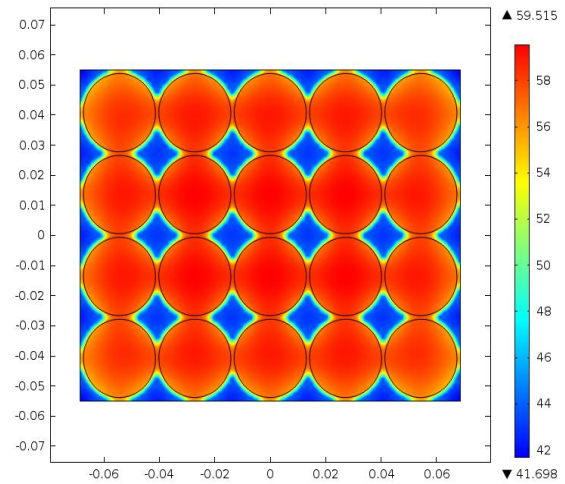
(a) $t = 6 \text{ min}$, $\text{esp}_{pcm} = 0.0 \text{ mm}$.



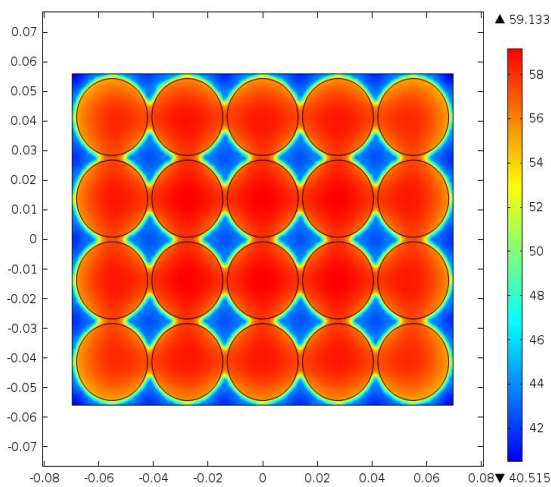
(b) $t = 6 \text{ min}$, $\text{esp}_{pcm} = 0.4 \text{ mm}$.



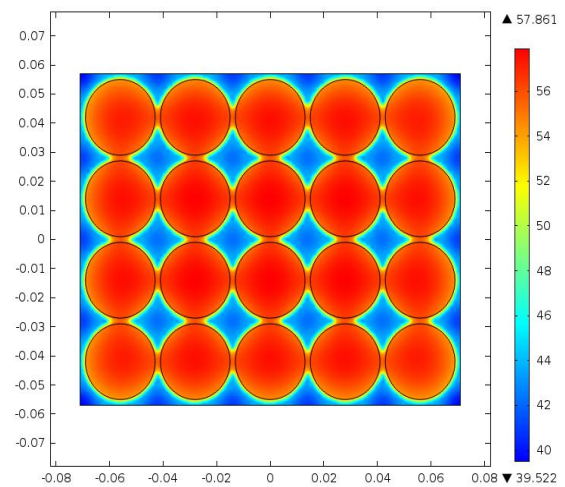
(c) $t = 6 \text{ min}$, $\text{esp}_{pcm} = 0.8 \text{ mm}$.



(d) $t = 6 \text{ min}$, $\text{esp}_{pcm} = 1.2 \text{ mm}$.

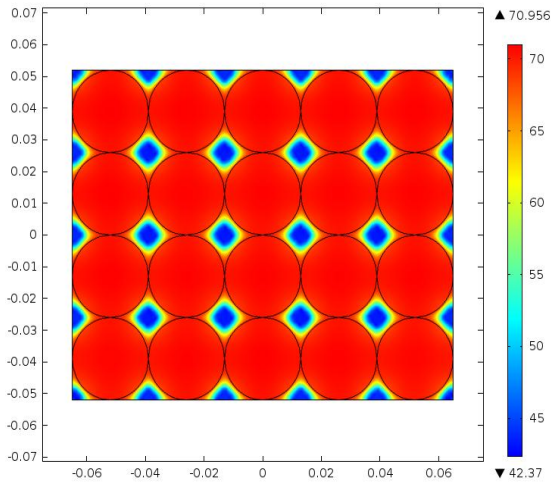


(e) $t = 6 \text{ min}$, $\text{esp}_{pcm} = 1.6 \text{ mm}$.

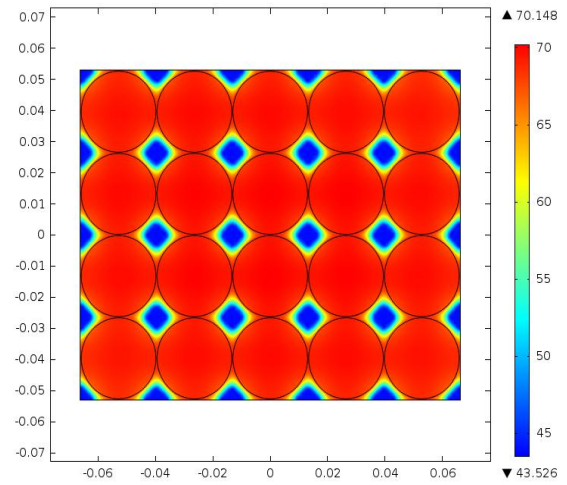


(f) $t = 6 \text{ min}$, $\text{esp}_{pcm} = 2.0 \text{ mm}$.

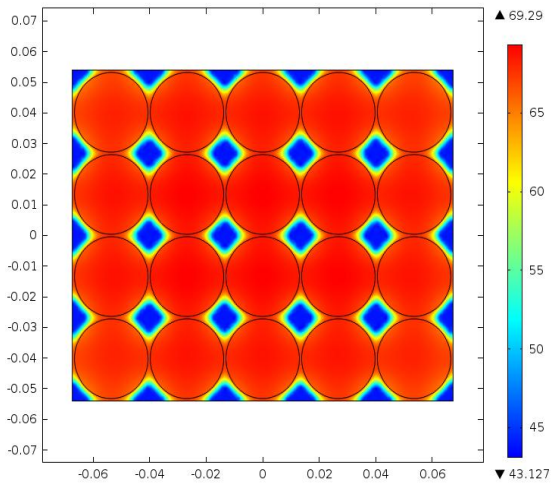
Figura B.47: Resultados para la celda 26650, tasa de descarga 10C, temperatura inicial 30°C y NPG.



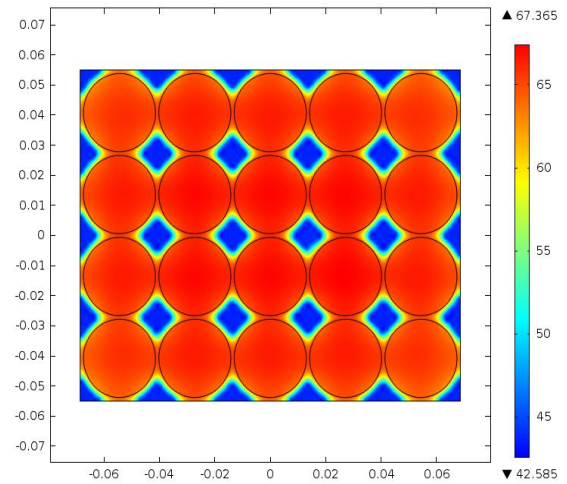
(a) $t = 6 \text{ min}$, $\text{esp}_{pcm} = 0.0 \text{ mm}$.



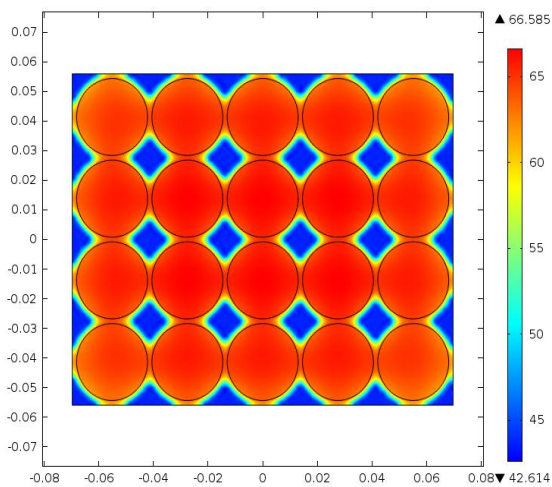
(b) $t = 6 \text{ min}$, $\text{esp}_{pcm} = 0.4 \text{ mm}$.



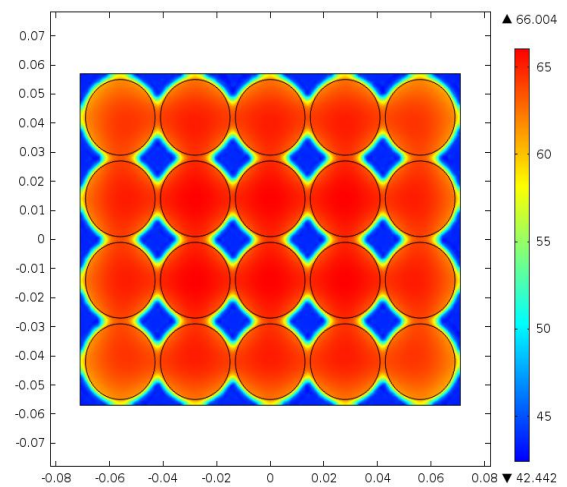
(c) $t = 6 \text{ min}$, $\text{esp}_{pcm} = 0.8 \text{ mm}$.



(d) $t = 6 \text{ min}$, $\text{esp}_{pcm} = 1.2 \text{ mm}$.



(e) $t = 6 \text{ min}$, $\text{esp}_{pcm} = 1.6 \text{ mm}$.



(f) $t = 6 \text{ min}$, $\text{esp}_{pcm} = 2.0 \text{ mm}$.

Figura B.48: Resultados para la celda 26650, tasa de descarga 10C, temperatura inicial 40°C y NPG.

