



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

ANÁLISIS FLUIDODINÁMICO COMPUTACIONAL PARA DETERMINAR EL EFECTO TÉRMICO DE LA CARCASA EN EL ENFRIAMIENTO DE BATERÍAS ION-LITIO

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO

SERGIO ALEJANDRO CONTRERAS GALLARDO

PROFESOR GUÍA:
WILLIAMS R. CALDERON MUÑOZ

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
JORGE REYES MARAMBIO
ALVARO VALENCIA MUSALEM

SANTIAGO DE CHILE
2017

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE:** Ingeniero Civil Mecánico
POR: Sergio Alejandro Contreras Gallardo
FECHA: 02/06/2017
PROFESOR GUÍA: Williams Calderón Muñoz

ANÁLISIS FLUIDODINÁMICO COMPUTACIONAL PARA DETERMINAR EL EFECTO TÉRMICO DE LA CARCASA EN EL ENFRIAMIENTO DE BATERÍAS ION-LITIO

Una batería ion-Litio es un dispositivo de almacenamiento energético compuesto de celdas eléctricas con sales de Litio, que se agrupan en módulos para conformar una estructura mayor llamada empaquetamiento. Son la mejor alternativa de almacenamiento en autos eléctricos o sistemas de energías renovables, sin embargo su rendimiento y vida útil se ven altamente afectados por las temperaturas de operación. Esto motiva la realización del presente trabajo de título apoyado por el Centro de Energía de la FCFM, en el marco del proyecto EOBLI que busca optimizar el desempeño de baterías ion-Litio a través del diseño óptimo de empaquetamientos.

El objetivo de este trabajo es implementar un modelo fluidodinámico computacional (CFD), para determinar los efectos térmicos de la carcasa de un empaquetamiento, sobre el enfriamiento de celdas cilíndricas ion-Litio sometidas a refrigeración forzada con aire. El modelo es la representación 3D de un montaje experimental, del cual se conoce la medición de temperatura de enfriamiento de la celda en el tiempo y que consta de un módulo con carcasa de madera y 5 celdas cilíndricas enfriadas con aire desde 302 [K] hasta 292 [K] luego de 2500[s].

Se utiliza el software ANSYS basado en el cálculo de volúmenes finitos con mallado de geometrías, seleccionando un mallado de 1600000 elementos y un modelo de turbulencia k-e RNG, con un tratamiento de pared Enhanced Wall Treatment para resolución de capa límite. La validación y calibración del modelo se logra satisfactoriamente ajustando la temperatura de enfriamiento de las celdas entregada por el modelo con la curva de temperatura conocida del montaje experimental. La pérdida de carga resultante es de 12 [Pa], la velocidad máxima entre celdas es de 6 [m/s] y el coeficiente convectivo por celda es cercano a los 60 [W/m²K], lo que se verifica con bibliografía para intercambiadores de calor de tubo con flujo cruzado.

Para el análisis térmico se varía la materialidad, longitud y temperatura de la carcasa. Se analizan 5 materiales, comparando resultados para el campo de temperaturas, coeficientes convectivos y el flujo de calor en las interfaces batería-aire y carcasa-aire. Se concluye que la materialidad de la carcasa a temperatura, $T=292$ [K], no afecta el enfriamiento de las celdas, pero una carcasa refrigerada a $T=275$ [K] permite reducir el tiempo de enfriamiento de las celdas hasta en un 40% respecto al caso inicial, aunque esto es un resultado independiente del material de carcasa utilizado, ya que entre usar un conductor térmico o un aislante, la diferencia es solo de 1[*min*] y un $\Delta T=1$ [K], valor que de todos modos podría mitigar envejecimiento después de varios ciclos de carga y descarga. Por último, aumentar la superficie de intercambio carcasa-aire, favorece la disipación térmica y el enfriamiento de las celdas.

Basado en los resultados obtenidos, se propone un estudio futuro de carcasas con el uso de materiales conductores y aislantes en forma estratégica para direccionar el flujo de calor. Se recomienda validar lo anterior con el diseño de geometrías orientadas a la refrigeración.

Agradecimientos

Hace una cantidad de años que casi no me alcanzan en las manos para contar, decidí salir del Norte en búsqueda de cosas nuevas. Fue un viaje largo de idas y vueltas entre asientos ásperos y a veces confortables que me trasladaban entre los distintos lugares mentales y físicos, para plantearme una sola cosa, algo que la gente llama desafío.

Los obstáculos y las dificultades fueron mis compañeros constantes. Pero, en la vida hay que ser como un saiyajin, enfrentarse a todo y recuperarse con más fuerza. Dicen que el que nunca se ha equivocado, no conoce lo que es ponerse de pie nuevamente.

Agradezco a mi madre Verónica, y a mi querido viejo, Sergio, que son el motor de mi vida, mis heroes, que con su amor y esa perfecta forma en que demuestran tanta fe en sus hijos, me dieron fuerza para cumplir esta meta. Igual a mi hermana Gilia por su cariño y positivismo, a mi hermano Felipin por recargarme siempre con alegría y bondad.

A toda la familia, abuelos, primos, tios, en especial a mis Tios Sonia y Eric con mis primas que han sido mi otra familia en Santiago. A mis Tios Claudio y Leticia, por llevarme a la infancia cada vez que visitaron la capital. Y a mi querido Tio Gabriel, el hermano mayor que nunca tuve, que con consejos sabios y apoyo ha sido un pilar importante en mi vida y durante este proceso.

Agradezco a mis amigos de infancia, de cabro chico Tocopilla, al Christian, y a mi querido compadre Roberto, el amigo de toda la vida, con quien hasta compañeros de pensión fuimos en Santiago, también a sus familias con quienes crecí y que más de alguna vez me dieron muchas onces, almuerzos y vituperios varios, porque Milo no me hizo grande, ellos sí.

A la loca más linda, mi compañera durante este proceso, la señorita Constanza Ortiz, que es especial para mí, que me brindó cariño, amor, alegría, felicidad y confianza.

A toda la gente que conocí en stgo a los amigos de voluntariados, a la Tropa y las miles de anécdotas, a las tardes de algebra con la Jazmin y la Coni, a los de PES que le gané al Gary y a todos los que me hicieron la universidad pulenta. Obviamente larga vida a los pasturris a mi querido amigo “Mariro”, al “Maldonado” y al “Guapablo” que hicieron mi paso en la U el más zatackeadado de todos y seguimos escribiendo historia.

Gracias también a mis profesores William y Jorge por la voluntad para entender mis horarios de trabajo ajustados, por su orientación y apoyo en todo este proceso. Agradezco a mi universidad, donde aprendí lo que a mi juicio es el objetivo principal de esta etapa, y es el concepto de universalidad, la idea de participar, actuar, conocer, vivir, en donde el verdadero aprendizaje está en las personas, en conocer a los demás, en hablar con gente que no piensa como tú, en cuestionarte las cosas que has aprendido para ser mejor profesional.

Por último agradezco a la vida y agradezco a cada una de las dificultades que tuve durante este viaje y que me permiten disfrutar esto como nadie lo puede imaginar.

Tabla de Contenido

1	Introducción	1
1.1	Antecedentes Generales.....	2
1.1.1	Batería de Litio	2
1.1.2	Módulo y Empaquetamiento.....	2
1.2	Motivación.....	3
1.3	Objetivos y Alcances	4
1.3.1	Objetivo General	4
1.3.2	Objetivos específicos	4
1.3.3	Alcances.....	4
2	Metodología	5
2.1	Recursos.....	5
3	Antecedentes	6
3.1	Estándares en Baterías	6
3.2	Virtudes baterías de Litio	7
3.3	Celda de ion-Litio	7
3.3.1	Celda cilíndrica.....	9
3.4	Modelación Fluidodinámica.....	10
3.4.1	Capa límite fluidodinámica.....	10
3.4.2	Diámetro Hidráulico.....	11
3.4.3	Factor de Fricción.....	11
3.4.4	Turbulencia	12
3.5	Modelación térmica	13
3.5.1	Conducción	13
3.5.2	Convección	13
3.5.3	Capa límite térmica	13
3.5.4	Números Adimensionales	14
3.5.5	Balance energético	15
3.6	Intercambiadores de calor.....	16
3.6.1	Configuración de tubos	16
3.6.2	Pérdida de Carga en haz de tubos.....	17
3.6.3	Correlación para el cálculo de Nussel.....	19
3.6.4	Pérdida de Carga en flujo interno.....	20
3.7	Conceptos para una simulación en ANSYS.....	20

3.7.1	Modelo de Turbulencia $k - \epsilon$	20
3.7.2	Tratamiento de paredes	22
3.7.3	Cálculo de $y+$ para capa límite	22
3.8	Desempeño térmico de las baterías de Litio	23
3.8.1	Forma de generación de calor	23
3.8.2	Efectos de la temperatura sobre la operación de baterías	24
3.8.3	Modelo de enfriamiento exponencial	25
3.8.4	Estado del arte estudios sobre desempeño térmico	26
3.8.5	Trabajos previos	26
3.8.6	Modelo Fractal.....	27
4	Diseño simulación computacional.....	28
4.1	Montaje experimental existente de Moser.....	28
4.1.1	Componentes del Montaje	28
4.1.2	Selección de arreglo escalonado.....	30
4.2	Parámetros del Modelo computacional	31
4.2.1	Dimensiones y Materiales.....	31
4.2.2	Condiciones de Operación	32
4.3	Cálculos Teóricos de Validación	33
4.3.1	Caracterización propiedades de los materiales.....	34
4.4	Construcción del modelo 3D.....	35
4.4.1	Configuración CAD en ANSYS.....	36
4.4.2	Generación de volumen de control.....	37
5	Validación y Resultados del Modelo.....	38
5.1	Estudio de Mallado	38
5.1.1	Configuración Inicial Fluent.....	38
5.1.2	Resultados pruebas de mallado	40
5.1.3	Selección Malla definitiva	41
5.2	Estudio de configuración en Fluent	43
5.2.1	Estudio Modelo de Turbulencia	43
5.3	Verificación fluidodinámica.....	45
5.4	Resultados térmicos	48
6	Estudio de Materiales para la carcasa.....	52
6.1	Selección de materiales	52
6.2	Estudio comparativo	54
7	Estudio de Temperaturas para la carcasa	58

7.1	Análisis por temperatura constante a 275 [K]	58
7.2	Análisis por temperatura inicial a 275 [K]	64
7.3	Comparación 3 casos de temperatura	70
7.4	Cambio longitud en geometría	71
7.4.1	Geometría 1- Sin modificación	71
7.4.2	Geometría 2- Alargamiento Aguas Abajo	71
7.4.3	Geometría 3- Alargamiento Aguas Arriba.....	72
7.4.4	Estudio térmico Geometrías	72
➤	Carcasa a T constante= 275 [K]	72
8	Conclusiones y Recomendaciones.....	77
8.1	Discusiones generales	77
8.1.1	Sobre Desarrollo de Baterías eléctricas	77
8.1.2	Sobre el Modelamiento Fluidodinámico.....	77
8.1.3	Sobre el Trabajo realizado	77
8.2	Conclusiones	78
8.2.1	Sobre la validación del modelo	78
8.2.2	Sobre el estudio térmico.....	78
8.3	Recomendaciones.....	79
8.3.1	Trabajo Futuro	79
	Bibliografía.....	80
Anexo A.	Mediciones montaje experimental Centro de Energía	83
Anexo B.	Estudio Sensibilidad Turbulencia.....	92
Anexo C.	Tablas de Datos	95
Anexo D.	Hojas de datos de materiales.....	100
Anexo E.	Resultados Complementarios Geometrías 2 y 3.....	110
Anexo F.	Estudio Relacionado - Geometría 4 (10 celdas).....	118

Índice de Figuras

Figura 1-1: Ejemplos de operación de baterías [Fuente: Informe interno Centro de Energía].	1
Figura 1-2 : Tipos de baterías usadas. [Fuente: Informe interno Centro de Energía]	2
Figura 1-3: Esquema Celdas [Fuente: Informe interno Centro de Energía]	3
Figura 2-1: Diagrama metodología de trabajo. [Elaboración Propia]	5
Figura 3-1: Funcionamiento de una batería. [Fuente: Adaptación [7]]	7
Figura 3-2. : Propiedades batería de Cobalto. [Fuente: Adaptación [5]]	8
Figura 3-3: Propiedades batería de Manganeso. [Fuente: Adaptación [5]]	8
Figura 3-4: Propiedades batería de Fosfato.[Fuente: Adaptación [5]]	9
Figura 3-5 : Interior de una celda cilíndrica. [Fuente: Adaptación [8]]	9
Figura 3-6: Capa límite fluidodinámica para flujo interno laminar. [Fuente: Adaptación [11]]	10
Figura 3-7: Diagrama de Moody [Fuente: Adaptación [11]]	12
Figura 3-8: Capa límite térmico. [Fuente: Adaptación [11]]	14
Figura 3-9 : Cubo diferencial para balance energético [10]	15
Figura 3-10 : Esquema banco de tubos en flujo cruzado [Fuente: Adaptación [11]]	16
Figura 3-11 : Arreglos para un banco de Tubos. (a) Alineado. (b) Escalonado [11]	17
Figura 3-12 : Flujo a través de un banco de Tubos. (a) Alineado. (b) Escalonado[11]	17
Figura 3-13 : Factor de fricción y de corrección para configuración Alineada [11]	18
Figura 3-14 : Factor de fricción y de corrección para configuración Escalonada [11]	18
Figura 3-15 : Constantes C_1 y m para la correlación de Grimson. [Fuente: Adaptación [11]]	19
Figura 3-16 : Constantes C_1 y m para la correlación de Grimson [Fuente: Adaptación [11]]	19
Figura 3-17: Rango temperatura óptima de operación. [Fuente: Adaptación [13]]	24
Figura 3-18: Estado de carga/degradación con temperaturas. [Fuente: Adaptación [14][21]]	24
Figura 4-1: Celda Ión-Litio ICR 26650 [Fuente: Adaptación [8]]	29
Figura 4-2: Caja con ventilador Thermaltake TT-12025. [Fuente: aliexpress.es]	29
Figura 4-3: Montaje experimental de 5 celdas [8]	30
Figura 4-4: Medidas para el modelo	31
Figura 4-5 : Esquema condiciones de borde	32
Figura 4-6: Diseño CAD empaquetamiento:	36
Figura 4-7: Importación de CAD a ANSYS-Fluent	36
Figura 4-8: Derecha: Dirección de avance del aire, Izquierda: Nomenclatura celdas	37
Figura 5-1: Configuración inicial	38
Figura 5-2: Convección exterior	39
Figura 5-3: Ingreso Propiedades de Materiales. Arriba: Celda. Abajo: Madera	39
Figura 5-4: Temperatura inicial baterías	40
Figura 5-5: Prueba de mallado – Refinamiento según Tamaño de Elementos	40
Figura 5-6: Prueba de mallado-Refinamiento según tamaño Number of Cells	41
Figura 5-7: Corte vista en planta de mallado	42
Figura 5-8: Corte vista lateral de mallado	42
Figura 5-9: Orden de magnitud celda adyacente en superficie	43
Figura 5-10: Comparación Modelo de Turbulencia y Tratamiento de Pared	44
Figura 5-11: Configuración final del Modelo de Turbulencia	44
Figura 5-12: Comparación Final RNG-k-e ENH y Datos Experimentales	45
Figura 5-13 : Presión del aire – Contorno Plano medio en Planta y Lateral	45
Figura 5-14 : Velocidad del aire–Renderizado de Volumen	46

Figura 5-15 : Velocidad del aire – Isométrico Grafica por Vectores y Contornos	47
Figura 5-16 : Velocidad del aire – Líneas de Flujo y Vistas de Contorno	47
Figura 5-17 : Temperaturas Empaquetamiento - Vistas de Contorno – 80 s	48
Figura 5-18 : Temperaturas Empaquetamiento - Vistas de Contorno – 240 s	48
Figura 5-19: Temperaturas Empaquetamiento - Vistas de Contorno – 700 s	49
Figura 5-20 : Temperaturas Empaquetamiento - Vistas de Contorno – 2500 s	49
Figura 5-21 : Decaimiento térmico de cada batería baterías – Módulo con Carcasa de Madera ...	50
Figura 5-22 : Coeficiente convectivo promedio en la interface batería-aire para cada celda	50
Figura 5-23 : Flujo promedio de Calor cedido por unidad de área en la interface celda aire	51
Figura 6-1 : Comparación conductividad térmica y eléctrica [Fuente: CES Edupack]	52
Figura 6-2 : Calor superficial promedio cedido al aire en la cara interna de la carcasa	54
Figura 6-3 : Coeficiente convectivo promedio en la cara interna de la carcasa	55
Figura 6-4 : Calor superficial promedio cedido al aire en la cara externa de la carcasa	55
Figura 6-5 : Coeficiente de convección por unidad de superficie externa de la carcasa	56
Figura 6-6 : Comparación decaimiento para Celda 1 con cinco materiales	56
Figura 6-7 : Comparación decaimiento para Celda 4 con cinco materiales	57
Figura 7-1 : Decaimiento térmico de celda 1 usando carcasas de distinto material	58
Figura 7-2 : Decaimiento térmico de celda 2 usando carcasas de distinto material	59
Figura 7-3 : Decaimiento térmico de celda 4 usando carcasas de distinto material	59
Figura 7-4 : Coeficiente convectivo promedio en interface celda 1-aire.....	60
Figura 7-5 : Coeficiente convectivo promedio en interface celda 2-aire.....	61
Figura 7-6 : Coeficiente convectivo promedio en interface celda 4-aire.....	61
Figura 7-7 : Campo temperaturas - 275 [k] cte. – Tiempos en [s]: 80.....	62
Figura 7-8 : Campo temperaturas - 275 [k] cte. – Tiempos en [s]: 300.....	63
Figura 7-9 : Campo temperaturas - 275 [k] cte. – Tiempos en [s]: 800.....	63
Figura 7-10 : Campo temperaturas - 275 [k] cte. – Tiempos en [s]: 1900	64
Figura 7-11 : Decaimiento térmico de celda 1 usando carcasas de distinto material	65
Figura 7-12 : Decaimiento térmico de celda 2 usando carcasas de distinto material	65
Figura 7-13 : Decaimiento térmico de celda 4 usando carcasas de distinto material	66
Figura 7-14 : Coeficiente convectivo promedio en interface celda 1-aire.....	66
Figura 7-15 : Coeficiente convectivo promedio en interface celda 2-aire.....	67
Figura 7-16 : Coeficiente convectivo promedio en interface celda 4-aire.....	67
Figura 7-17 : Campo temperaturas - 275 [k] cte. – Tiempos en [s]: 100.....	68
Figura 7-18 : Campo temperaturas - 275 [k] cte. – Tiempos en [s]: 600.....	69
Figura 7-19 : Campo temperaturas - 275 [k] cte. – Tiempos en [s]: 1500	69
Figura 7-20 : Campo temperaturas - 275 [k] cte. – Tiempos en [s]: 2300	70
Figura 7-21 : Decaimiento térmico 4 usando carcasas a distinta condición de borde	70
Figura 7-22 : Isométrico del CAD de la Geometría 2	71
Figura 7-23 : Isométrico del CAD de la Geometría 3	72
Figura 7-24 : Decaimiento según geometrías para celda 1	73
Figura 7-25 : Decaimiento según geometrías para celda 2	73
Figura 7-26 : Decaimiento según geometrías para celda 4	74
Figura 7-27 : Temperatura en el eje Z del módulo (Ver Anexo E).....	74
Figura 7-28 : Decaimiento según geometrías para celda 1	75
Figura 7-29 : Decaimiento según geometrías para celda 2	75
Figura 7-30 : Decaimiento según geometrías para celda 4	76
Figura 7-31 : Temperatura en el eje Z del módulo (Ver Anexo E).....	76

Capítulo 1

1 Introducción

Las baterías son dispositivos de almacenamiento energético que han revolucionado la industria de artefactos electrónicos móviles y el desarrollo de tecnologías para la generación de electricidad, con métodos más sustentables y eficientes. Se fabrican agrupando varias unidades básicas llamadas celdas eléctricas, en una estructura mayor denominada empaquetamiento, cuyo diseño se vuelve importante en el desempeño del dispositivo.

Dos aplicaciones interesantes son el almacenamiento de electricidad con baterías para disminuir el efecto de incertidumbre y variabilidad en sistemas de generación con fuentes renovables, y su uso en la alimentación de motores eléctricos para la migración de autos a combustión, hacia autos eléctricos [1], como se ve en la Figura 1-1.

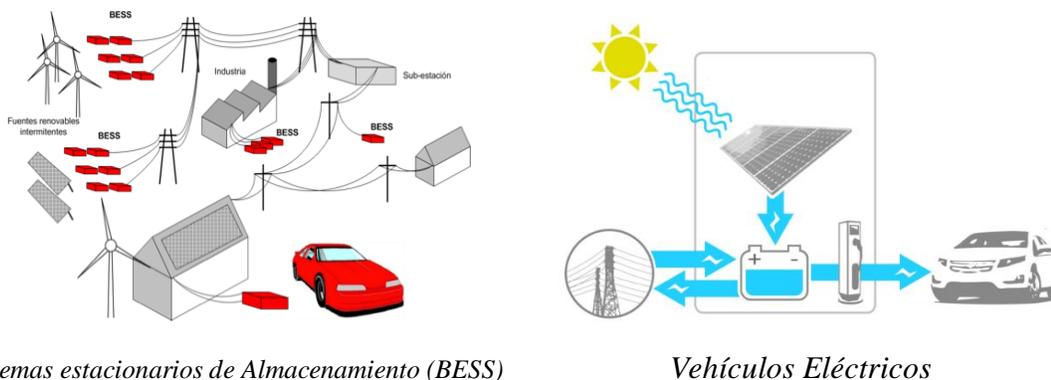


Figura 1-1: Ejemplos de operación de baterías [Fuente: Informe interno Centro de Energía].

En particular, el Litio es el más usado para el desarrollo de baterías en aplicaciones móviles, por ser más liviano y de mayor densidad energética [2], lo que a su vez, permite desarrollar baterías más compactas y eficientes. Sin embargo, se debe tener cuidado con las condiciones térmicas de operación ya que, bajas temperaturas disminuyen la eficiencia y altas temperaturas disminuyen el ciclo de vida, es decir, que si no se trabaja en los rangos de temperatura adecuados, el funcionamiento de la batería se verá altamente afectado [2].

El empaquetamiento incluye tanto el grupo de celdas como también los elementos de soporte, protección y conexión, por lo que las condiciones geométricas, la disposición espacial de las celdas y la materialidad de la carcasa del empaquetamiento, influyen directamente en las temperaturas óptimas de operación, lo que a su vez afecta el rendimiento eléctrico y la vida útil de ésta [1][3].

El trabajo descrito en esta memoria, consiste en desarrollar un modelo computacional, para un empaquetamiento de baterías eléctricas, analizando condiciones de borde relacionadas con los materiales y dimensiones de diseño de la carcasa del empaquetamiento.

1.1 Antecedentes Generales

Para una correcta comprensión de los objetivos de este trabajo, se procede a describir de forma general los conceptos de batería, celda y empaquetamiento.

1.1.1 Batería de Litio

Las baterías de Litio son fabricadas en base a sales electrolíticas de ion-Litio. Son conocidas como baterías ion-Litio y comenzaron a ser investigadas en 1912 como baterías no recargables, pudiéndose fabricar la primera de este tipo en el año 1970 [4], sin embargo el mayor desafío tecnológico consistía en la creación de baterías que pudieran ser recargables, aumentando la durabilidad. Después de una serie de desarrollos en los años 80s, en 1991 se generaron las primeras baterías recargables, enviadas a Japón para su producción masiva, manteniéndose en desarrollo constante hasta la actualidad.

Debido a que la energía que se convierte en la batería es de carácter químico, estas no están sujetas a las limitaciones del Ciclo de Carnot, como es el caso de la combustión o motores de calor.

Las baterías funcionan gracias a un componente básico llamado celda, el cual corresponde a un dispositivo químico, conformado por un ánodo y un cátodo que transportan electrones entre ellos, en forma reversible, a través de una sal electrolítica de Litio, lo que permite el almacenamiento energía eléctrica. El material del ánodo y el cátodo puede variar entre una batería y otra, otorgándole más o menos capacidad y eficiencia [5], además existen distintos tipos de geometrías para las baterías, acorde a la aplicación de esta. En el laboratorio del Centro de Energía de la FCFM se trabaja con baterías prismáticas, pouch y cilíndricas, ver Figura 1-2.



Figura 1-2 : Tipos de baterías usadas. [Fuente: Informe interno Centro de Energía]

Las prismáticas que son las más grandes y de forma rectangular, para funciona no es necesario agruparlas con otras celdas pero es mucho más difícil su control, dado su peso y tamaño.

Las baterías pouch son baterías planas que para entrar en operación suelen ser apiladas una sobre otra o una contigua a la otra, para formar un arreglo de baterías lineal más grande.

Las baterías cilíndricas pueden ser agrupadas en más configuraciones distintas dada su geometría y aquello permite mejores oportunidades de optimizar su desempeño.

1.1.2 Módulo y Empaquetamiento

Para ordenar las celdas en un empaquetamiento, existe una unidad intermedia denominada módulo, el cual corresponde a una agrupación de celdas en una configuración espacial específica, cuya replicación conformará el empaquetamiento.

Por lo tanto, la celda determina las características en cuanto a capacidad o tiempos de tensión y corriente y su agrupación otorga las características de operación a la batería. Por otro lado, el empaquetamiento que por lo general suele denominarse como batería propiamente tal, corresponde a la conexión entre varios módulos de celdas conectados con otros elementos complementarios como sensores, convertidores de tensión, estructuras de soporte etc. En la Figura 1-3 se puede ver esquemáticamente la diferencia entre una celda, un módulo y un empaquetamiento.

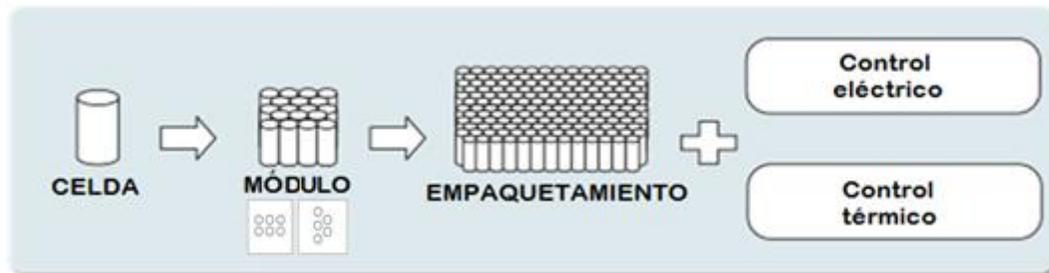


Figura 1-3: Esquema Celdas [Fuente: Informe interno Centro de Energía]

1.2 Motivación

Dado que el rendimiento de las baterías se ve afectado por su desempeño térmico y este a su vez depende de las condiciones de empaquetamiento de las celdas, el desafío es poder encontrar diseños óptimos para fabricar baterías que operen en los rangos de temperatura adecuados, con buen rendimiento, vida útil y además sean compactos y de bajo peso.

Para estudiar la problemática, es posible generar modelos matemáticos, simulaciones con fluidodinámica computacional (CFD) o montajes experimentales. Básicamente el estudio del control y diseño de baterías presenta los siguientes desafíos:

- Mejorar los modelos computacionales, acercándolos a la realidad, para optimizar los tiempos de diseño.
- Investigar formas óptimas y novedosas de refrigeración atacando el efecto térmico para mejorar el rendimiento y la vida útil.
- Diseñar empaquetamientos compactos y livianos, que no afecten el desempeño de la batería.

El Centro de energía de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas (FCFM) de la Universidad de Chile ha impulsado el proyecto EOBLI (Empaquetamiento Óptimo de Baterías de Litio), con el objetivo de generar un modelo capaz de optimizar el diseño del empaquetamiento, de manera de obtener baterías de menor tamaño pero con buen rendimiento eléctrico y buen desempeño térmico.

En dicho contexto surge la motivación del presente trabajo de título, que se enfoca en estudiar la influencia de la disipación térmica en la carcasa del empaquetamiento, dada por el tipo de material, para abrir caminos nuevos al problema del control térmico y aportar en la búsqueda de diseños óptimos que favorezcan el rendimiento de las baterías de Litio.

1.3 Objetivos y Alcances

1.3.1 Objetivo General

El objetivo de este trabajo es implementar un modelo fluidodinámico computacional (CFD) en 3D para evaluar los efectos térmicos de la materialidad y dimensión de la carcasa de un empaquetamiento, sobre el enfriamiento de celdas cilíndricas ion Litio, sometidas a refrigeración forzada con aire.

1.3.2 Objetivos específicos

Los objetivos específicos para este trabajo son los siguientes:

- Simular en el software ANSYS, el montaje experimental existente de un módulo de celdas cilíndricas con carcasa de madera, otorgado por el centro de energía de la FCFM.
- Calibrar la simulación a partir de la temperatura de enfriamiento de las celdas en el tiempo, conocida para el montaje experimental modelado.
- Seleccionar nuevos materiales de alta conductividad térmica y baja conductividad eléctrica, para modificar el material de la carcasa del módulo de celdas cilíndricas simulado.
- Estudiar el efecto térmico de la materialidad y temperatura de la carcasa sobre el enfriamiento de las celdas.
- Generar modificaciones en el largo de la carcasa en la dirección de avance del aire, aguas arriba y aguas debajo de las celdas.
- Analizar la influencia térmica de la modificación del largo de la carcasa sobre el enfriamiento de las celdas.

1.3.3 Alcances

Los alcances de este trabajo están definidos según lo siguiente:

- Se hace uso del montaje experimental existente para definir las condiciones de borde y operación del modelo fluidodinámico. Para condiciones no conocidas del montaje, se hace estudio de sensibilidad o se verifica con cálculo teórico de intercambiadores de calor.
- Para el estudio térmico se varían solo las propiedades del material de carcasa, la temperatura de la carcasa y la longitud en la dirección de avance del aire, respetando la forma geométrica del montaje experimental de base
- El módulo simulado es de 5 celdas, manteniendo constante la distancia de separación entre ellas. Se comparan en total cinco materiales y dos temperaturas para la carcasa.

Capítulo 2

2 Metodología

A continuación se muestra un diagrama de la metodología de este trabajo. Flechas grises indican información de retroalimentación y flechas verdes indican información de avance:

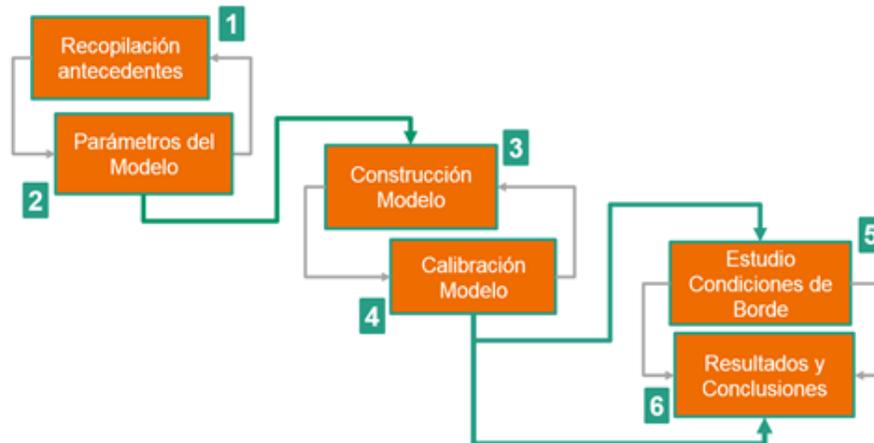


Figura 2-1: Diagrama metodología de trabajo. [Elaboración Propia]

- **Revisión bibliográfica y recopilación de antecedentes:** Recopilación de antecedentes sobre modelos previos para baterías ion-Litio. Revisión del montaje existente realizado previamente por el centro de energía para definir los parámetros del modelo computacional.
- **Definición de los parámetros físicos para el modelo:** Se definen los parámetros de diseño de las simulaciones. Esto incluye definir las condiciones de operación, dimensiones y propiedades de los materiales.
- **Construcción y calibración del modelo computacional:** Se construye modelo mediante un CAD 3D que es importado al módulo CFD-Fluent de ANSYS, realizando el estudio de configuración adecuado para la simulación.
- **Estudio de condiciones de borde de la simulación:** Se estudiará la influencia de condiciones de borde en las paredes y dimensiones del modelo, sobre el comportamiento térmico de las celdas. Primero, para materiales y dimensiones usadas en montaje experimental y luego análisis con dimensiones y materiales distintos.
- **Análisis de resultados y conclusiones:** Se compararán los resultados del modelo con los resultados en modelos experimentales y modelos computacionales previos, para concluir sobre los efectos de las condiciones de borde estudiadas sobre el enfriamiento de la celda.

2.1 Recursos

Este trabajo fue desarrollado mediante recursos no financieros, asociados al soporte y disponibilidad de software:

- Espacios y computadores del Departamento de Ingeniería Mecánica y del Laboratorio de Redes Inteligentes del Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Chile.
- Software ANSYS, mediante licencia académica provista por el Departamento de Ingeniería Mecánica.

Capítulo 3

3 Antecedentes

Se presentan los antecedentes específicos relacionados con el presente trabajo de título. Este capítulo permite entender el marco teórico respecto a simulaciones fluidodinámicas y el desempeño térmico en baterías de Litio.

3.1 Estándares en Baterías

Las baterías eléctricas forman parte integral en la industria y del desarrollo tecnológico. Sin embargo, ya se ha investigado distintos eventos no deseados, como explosividad o sobre calentamiento, durante el uso o investigación de estos dispositivos [6]. Por esto, es necesaria e importante la existencia de regulación tanto en el ámbito tecnológico como en el ámbito de seguridad.

Las entidades de normativa internacional IEC y ANSI, proveen directrices para regular los procedimientos en el uso e investigación de baterías eléctricas [7]. La Tabla 3-1 y la Tabla 3-2, se presentan organismos normativos importantes para la seguridad de baterías eléctricas.

Tabla 3-1: Estándares de seguridad [6]

Publicación	Título
American Standards Institute ANSI C18.1M, Part 2	American National Standard for Portable Primary Cells and Batteries with Aqueous Electrolyte—Safety Standard
ANSI C18.2M, Part 2	American National Standard for Portable Rechargeable Cells and Batteries—Safety Standard
ANSI C18.3M, Part 2	American National Standard for Portable Lithium Primary Cells and Batteries—Safety Standard
International Electrotechnical Commission IEC 60086-4 IEC 60086-5 IEC 61809	Primary Batteries—Part 4: Safety for Lithium Batteries Primary Batteries—Part 5: Safety of Batteries with Aqueous Electrolyte Safety for Portable Sealed Alkaline Secondary Cells and Batteries
Underwriters Laboratories UL1642 UL2054	Standard for Lithium Batteries Standard for Household and Commercial Batteries

Tabla 3-2: Documentos regulatorios de seguridad [6]

Organización	Título
Department of Transportation (DOT) Federal Aviation Administration (FAA)	Code of Federal Regulations—Title 49 Transportation TSO C042, Lithium Batteries (referencing RTCA Document DO-227 “Minimum Operational Performance Standards for Lithium Batteries”)
International Air Transport Association (IATA)	Dangerous Goods Regulations
International Civil Aviation Association (ICAO)	Technical Instructions for the Safe Transport of Dangerous Goods
United Nations (UN)	Recommendations on the Transportation of Dangerous Goods Manual of Tests and Criteria

3.2 Virtudes baterías de Litio

Las normas de fabricación para las baterías las clasifican en varios grupos, los que básicamente pueden simplificarse en baterías no recargables, y recargables [7]. En estas últimas el Litio aparece como un electrolito muy atractivo, pues es liviano y permite generar altos voltajes, logrando apoderarse del mercado en las últimas dos décadas. Sus ventajas son [7]:

- Altos voltajes, por sobre 4 V, dependiendo del material del cátodo, comparado con los 1,5 [V] de la mayoría de los sistemas primarios de batería
- Alta energía específica y energía por densidad, (sobre 200 [Wh/kg] y 400 [Wh/L]), entre 2 a 4 veces mejor que una batería convencional de Zinc.
- Pueden operar en amplios rangos de temperatura hasta 70 [°C] y en ocasiones hasta 150 [°C], aunque no es recomendable.
- Tienen una descarga más estable que baterías diseñadas con otros componentes químicos.
- Tienen una mayor vida disponible, hasta 10 años trabajando en las temperaturas nominales de operación.

3.3 Celda de ion-Litio

Una celda ión-Litio es un dispositivo utilizado para el almacenamiento de energía que funciona utilizando un electrolito conformado por una sal de Litio, un ánodo y un cátodo [8]. Dentro de la celda se genera una reacción electro química reversible, que provoca el transporte de electrones entre el ánodo y el cátodo, en ambas direcciones [7].

Este proceso permite que la celda ion-Litio sea recargable en dos etapas; una etapa de descarga, en la que el electrolito permite el traspaso de iones desde el ánodo hacia el cátodo, mientras un separador evita el contacto directo entre ambos; y una etapa de carga, con el circuito cerrado entre el ánodo y el cátodo, generando un flujo de electrones en dirección opuesta a la etapa de descarga.

Ambos flujos permiten la carga y descarga del dispositivo y según la composición química la reacción puede ser más o menos eficiente en términos de almacenamiento energético. En la Figura 3-1 se puede apreciar la forma en que una batería de Litio puede funcionar.

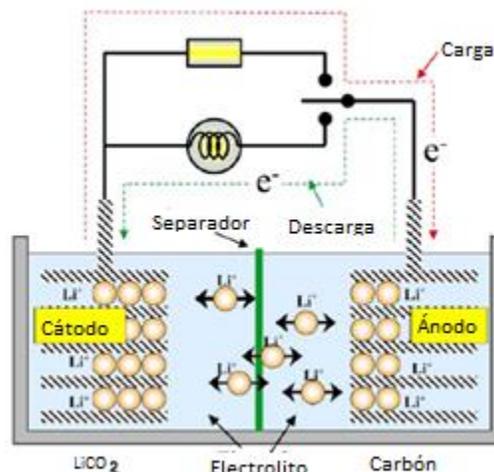


Figura 3-1: Funcionamiento de una batería. [Fuente: Adaptación [7]]

Según el material de su electrodo existen distintos tipos de baterías, en base a cobalto, manganeso o fosfato. [5]. El tipo de electrodo dará propiedades distintas a una u otra batería, lo cual se aprecia en las imágenes que serán presentadas a continuación.

- Batería de Oxido de Cobalto LiCoO_2

Son de baja resistencia interna, y rápidas en cargar, siendo las más utilizadas por costo calidad, ver Figura 3-2.

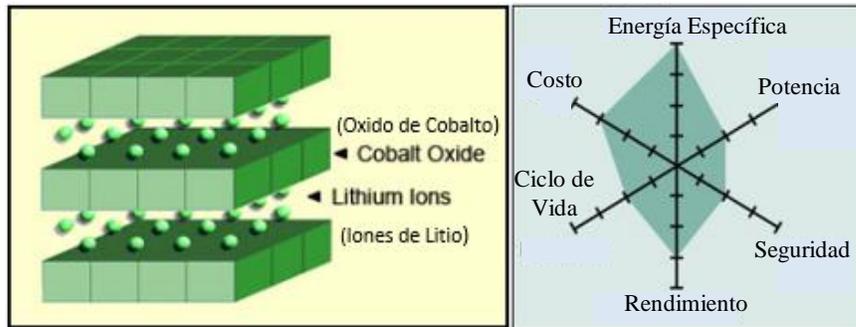


Figura 3-2. : Propiedades batería de Cobalto. [Fuente: Adaptación [5]]

- Batería de Oxido de Manganeso LiMn_2O_4

Es la más costosa, pero la de mejor calidad, en general por el costo no es usada en forma masiva. Su energía específica es alta y al mismo tiempo es más estable y segura. Ver Figura 3-3.

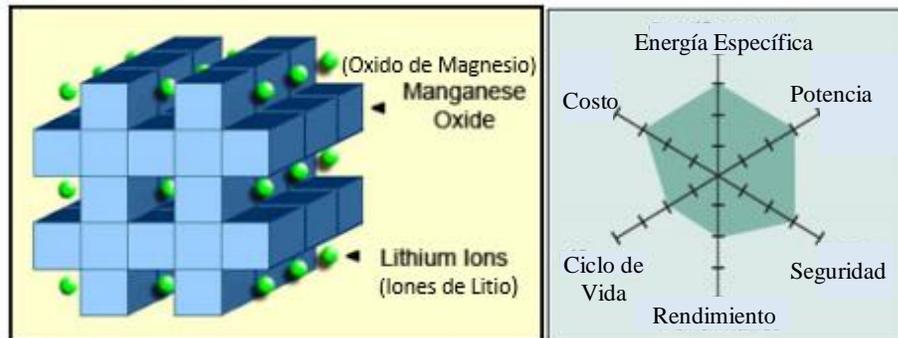


Figura 3-3: Propiedades batería de Manganeso. [Fuente: Adaptación [5]]

- Batería de Hierro Fosfato LiFePo_4

Es tienen una resistencia eléctrica alta, lo que implica menor energía específica, por lo que suelen no seleccionarse debido a que son de un costo no mucho más bajo que una las clases de baterías anteriores. Sin embargo son muy seguras y de alta potencia por lo que son utilizadas en autos eléctricos. Ver Figura 3-4.

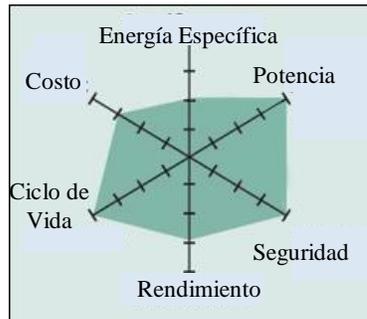


Figura 3-4: Propiedades batería de Fosfato.[Fuente: Adaptación [5]]

3.3.1 Celda cilíndrica

La celda cilíndrica, ha tomado fuerza en el mercado, como baterías para automóviles. Los estudios sobre ellas son relativamente nuevos [1] [2] [9]. En general se busca modelar el comportamiento térmico de la batería cilíndrica, caracterizar su composición química, o sus propiedades térmicas. En la Figura 3-5, se presenta el interior de una batería cilíndrica.

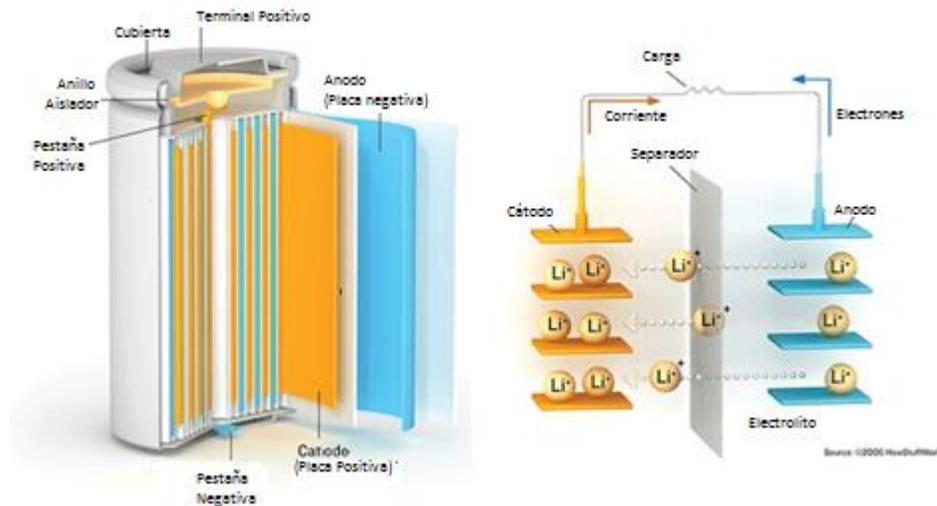


Figura 3-5 : Interior de una celda cilíndrica. [Fuente: Adaptación [8]]

Dada su geometría, es posible conformar empaquetamientos no lineales de distintos tamaños y ajustar la distancia entre ellas para aprovechamiento de espacio. Sin embargo se debe tener cuidado en el diseño para evitar el sobrecalentamiento. En general los modelos de empaquetamientos de celdas cilíndricas se enfocan en la refrigeración [6].

3.4 Modelación Fluidodinámica

Dado que se trabajará con aire, el software de simulación debe utilizar física para fluidos para sus cálculos. Las ecuaciones que gobiernan el movimiento del fluido son las ecuaciones de Navier-Stokes [10] Estas ecuaciones describen el movimiento de un flujo Newtoniano, en donde la ecuación (3.1) es la ley de conservación de momento lineal y la ecuación (3.3) es la ecuación de conservación de masa [11]:

$$\frac{\partial(\rho\vec{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho V\vec{V}) = \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot (\mu\nabla\vec{V}) + Sm \quad (3.1)$$

Donde p es la presión, ρ es la densidad, \vec{V} es el vector de velocidad y el término Sm representa fuentes nuevas de momentum.

$$\vec{V} = u\hat{i} + v\hat{j} + w\hat{k} \quad (3.2)$$

$$\frac{\partial(\rho\vec{V})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\vec{V}) = 0 \quad (3.3)$$

3.4.1 Capa límite fluidodinámica

En el momento en que un fluido entre contacto con una superficie sólida, aparecen esfuerzos de corte entre ambas superficies producto de los efectos viscosos [11]. Esto provoca que en la interface fluido-sólido, la velocidad del fluido sea nula y luego aumente al alejarse del sólido.

Por ejemplo, si se considera un flujo interno laminar, es posible detectar una zona de entrada en donde la capa límite superior e inferior se unen hasta formar un flujo desarrollado (Fully Developed Region), ver Figura 3-6. En caso contrario se dice que el fluido no se alcanza a desarrollar y se presenta una región de entrada (Entrance Región).

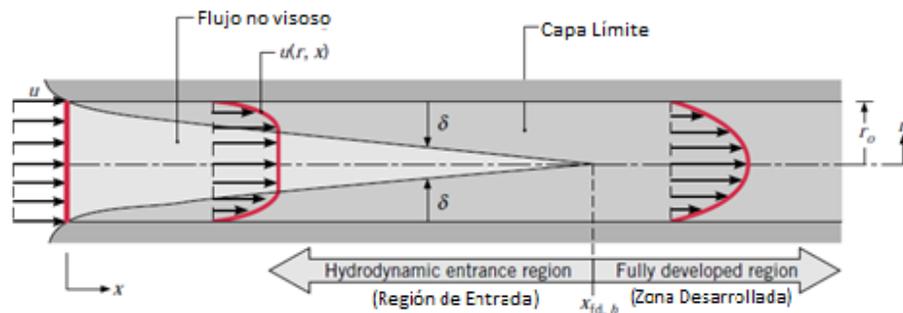


Figura 3-6: Capa límite fluidodinámica para flujo interno laminar. [Fuente: Adaptación [11]]

3.4.2 Diámetro Hidráulico

Aunque una capa límite suele definirse para flujos internos dentro de tubos circulares, en muchas aplicaciones ingenieriles el transporte se realiza en tubos no circulares. Para ello una primera aproximación a estos problemas es la definición de un diámetro hidráulico o diámetro efectivo [11]. Éste se determina mediante la siguiente ecuación

$$D_H = \frac{4A_C}{P} \quad (3.4)$$

En donde A_C es la sección transversal efectiva por la que circula el fluido mientras que P es conocido como perímetro mojado, correspondiente al perímetro que realmente entra en contacto con el área. Para una sección rectangular de largo L y ancho H el diámetro hidráulico sería

$$D_H = \frac{4 LH}{2(L + H)} \quad (3.5)$$

3.4.3 Factor de Fricción

Para flujos internos, una preocupación en ingeniería es la existencia de pérdida de carga, o caída de presión en el fluido cuando este circula por el interior de un tubo [11]. Dicha pérdida se produce debido a la fricción presente en la interface fluido sólido, debida a los efectos de viscosidad, velocidad, la densidad del fluido y el diámetro de paso.

Para determinar la pérdida de carga es conveniente trabajar con el diagrama factor de fricción de Darcy, el cual es un parámetro adimensional definido según la siguiente expresión

$$f = \frac{-\left(\frac{dp}{dx}\right) 2D}{\rho V_m^2} \quad (3.6)$$

Donde ρ es la densidad, D es el diámetro hidráulico y V_m es la velocidad media del fluido en el interior del tubo. No se debe confundir el factor recién descrito con el factor el coeficiente de fricción, el cual relaciona los efectos fricción con los esfuerzos de corte τ_s en la superficie y es definido como sigue:

$$C_f = \frac{2\tau_s}{\rho V_m^2} \quad (3.7)$$

Para obtener el factor de fricción en forma más expedita, se conoce el Diagrama de Moody, que se presenta en la Figura 3-7

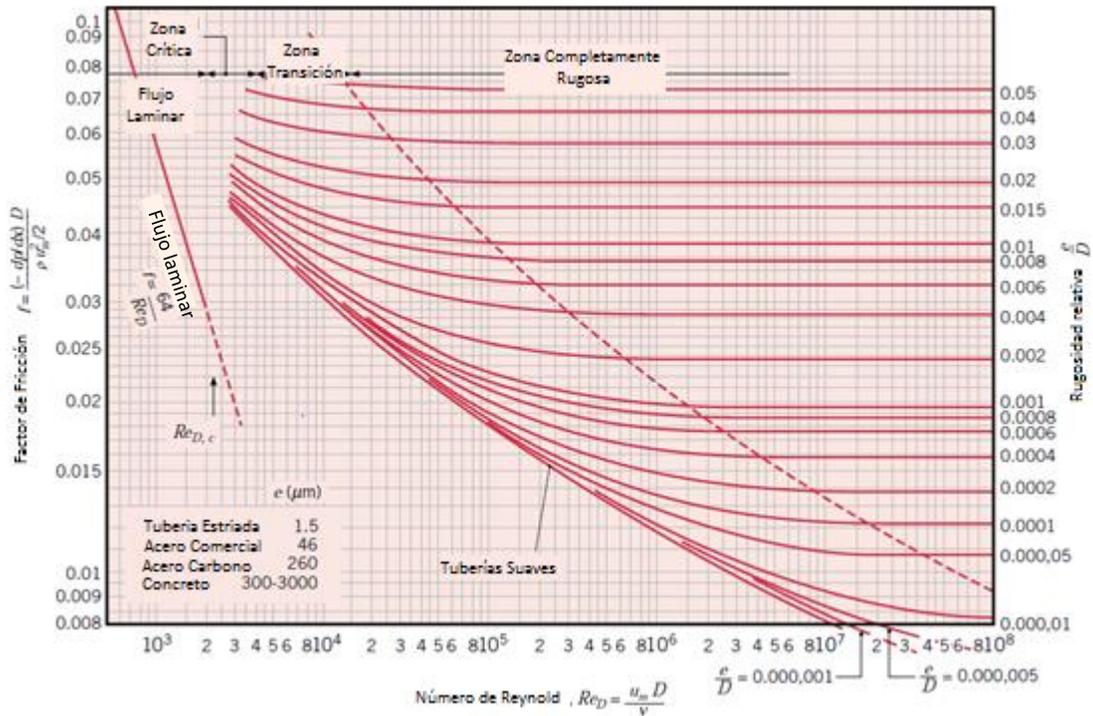


Figura 3-7: Diagrama de Moody [Fuente: Adaptación [11]]

3.4.4 Turbulencia

Como se puede apreciar en la Figura 3-7, el factor de fricción no solo está definido para un flujo laminar, sino que también se debe conocer otros parámetros como la rugosidad del material y si el flujo presenta inestabilidad que se puede traducir en un flujo turbulento [11].

Para definir un flujo turbulento se define el conocido número adimensional, denominado Número de Reynolds, que relaciona la inercia del fluido con sus fuerzas viscosas. Este se define por la ecuación (3.8).

$$Re_D = \frac{\rho V_M D}{\mu} \quad (3.8)$$

Donde ρ es la densidad, μ representa la viscosidad dinámica del fluido, V_M la velocidad media y D el diámetro.

Sin embargo suelen existir otras expresiones para problemas en que la dimensión representativa no es el diámetro, sino que el largo, por ejemplo, sin embargo dichas relaciones no son necesarias para el estudio del presente trabajo de título. Debido a que el flujo de aire cruza celdas cilíndricas será necesario aplicar bibliografía de intercambiadores de calor, que se presenta más adelante.

3.5 Modelación térmica

Para lograr realizar este trabajo de título, se necesitará conocimiento y entendimiento del área de la ingeniería mecánica relacionada con los modelos térmicos. Eso quiere decir que se aplicarán conocimientos sobre balances de energía, transferencia de calor y el uso de condiciones de borde (condiciones de conducción, convección, radiación, velocidades, temperaturas, presiones, etc.) [11].

3.5.1 Conducción

Corresponde a la transferencia de calor por medios sólidos, gracias a la actividad molecular presente en el cuerpo. La energía de excitación de las partículas en el cuerpo de mayor temperatura, transmiten su energía al cuerpo de menor temperatura [10].

La ecuación que describe el fenómeno de conducción está gobernada por la Ley de Fourier y se puede ver en la ecuación (3.9):

$$\dot{q} = -k\nabla T \quad (3.9)$$

Donde la constante k es conocida como la conductividad térmica $\left[\frac{W}{m \cdot K}\right]$ y es una propiedad característica del material en donde se produce la conducción

3.5.2 Convección

Corresponde a la transferencia de calor a través de un fluido en movimiento, mediante la difusión molecular [10]. Cuando el fluido entra en contacto con una superficie se produce una interfaz denominada capa límite, en la que las velocidades varían desde 0 en la superficie hasta u_∞ lejos de la superficie. Junto con ello se produce el mismo efecto cuando la temperatura de la superficie y el fluido difieren produciéndose una capa límite térmica en que las temperaturas van desde T_S en la superficie, hasta T_∞ lejana a ella.

La ecuación que describe el fenómeno de convección está gobernada por la Ley de enfriamiento de Newton se puede apreciar en la ecuación (3.10):

$$\dot{q} = h(T_S - T_\infty) \quad (3.10)$$

Donde la constante h es conocida como coeficiente de convección $\left[\frac{W}{m \cdot K}\right]$ y es una propiedad característica del material en donde se produce la conducción.

3.5.3 Capa límite térmica

Como se indicó anteriormente, al igual que en el caso de la fluidodinámica, en transferencia de calor, para flujos internos, también existe la presencia de una capa límite térmica [11], producida por los gradientes de transferencia de calor entre el fluido y el sólido durante la convección.

La temperatura fuera de una capa límite térmica es igual a T_∞ , mientras que dentro de ella, la transferencia se produce principalmente dentro de la capa límite, producto de la diferencia de temperatura entre la pared T_s y la temperatura del fluido, y es comandada por el coeficiente convectivo presente en la ecuación (3.10).

Cuando se tiene una condición de temperatura fija e la superficie es posible ver una capa límite térmica completamente desarrollada como la que se presenta en la Figura 3-8

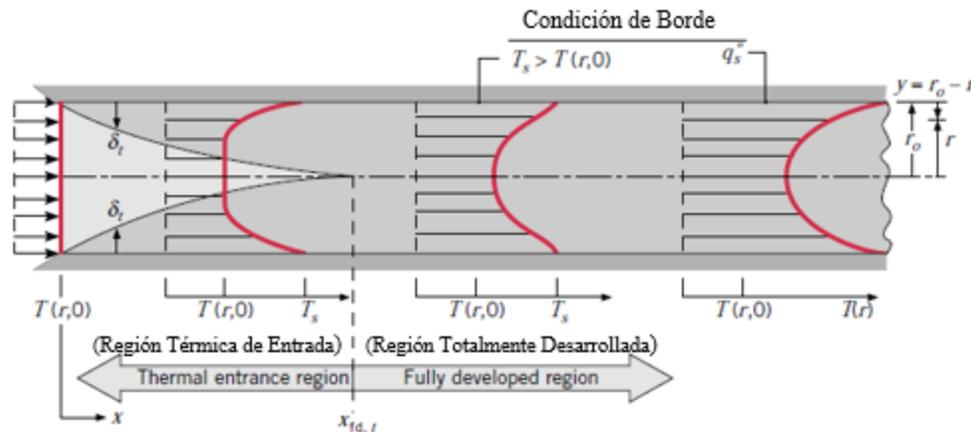


Figura 3-8: Capa límite térmico. [Fuente: Adaptación [11]]

3.5.4 Números Adimensionales

Durante la transferencia de calor es también útil definir grupos adimensionales que relacionen las propiedades más importantes del fenómeno. En el caso térmico y en particular para este trabajo, será necesario conocer el número de Prandtl y el número de Nussel.

El número de Prandtl relaciona las propiedades viscosas con las propiedades térmicas del fluido y se define de la siguiente forma:

$$Pr = \frac{u \cdot c_p}{k_f} \quad (3.11)$$

Donde u es la viscosidad dinámica del fluido en, k_f es la conductividad térmica del fluido y c_p es el calor específico.

A su vez el número de Nusselt, es un coeficiente de superficie y es utilizado para relacionar los gradientes de temperatura entre el aire y el sólido mediante. Se define en función del coeficiente convectivo, la conductividad del fluido y el largo de la región de contacto:

$$Nu_l = \frac{h \cdot L}{k_f} \quad (3.12)$$

Debido a que el coeficiente convectivo varía conforme varía la temperatura de la superficie del sólido, o conforme varía la transferencia de calor, se definen correlaciones experimentales para el Número de Nusselt, como una función de otros números adimensionales como el Número de Reynold y el Número de Prandtl.

3.5.5 Balance energético

Para poder entender de forma correcta la transferencia de calor en un cuerpo, se debe tener conocimiento sobre la ecuación de conservación de energía que involucra la evolución y distribución de la temperatura.

El balance de energía en un cuerpo cualquiera se puede obtener en forma genérica a partir de un cubo diferencial como se puede apreciar en la Figura 1.1. Se indican los flujos de energía ocupando los principios de series de Taylor [10] y volúmenes diferenciales.

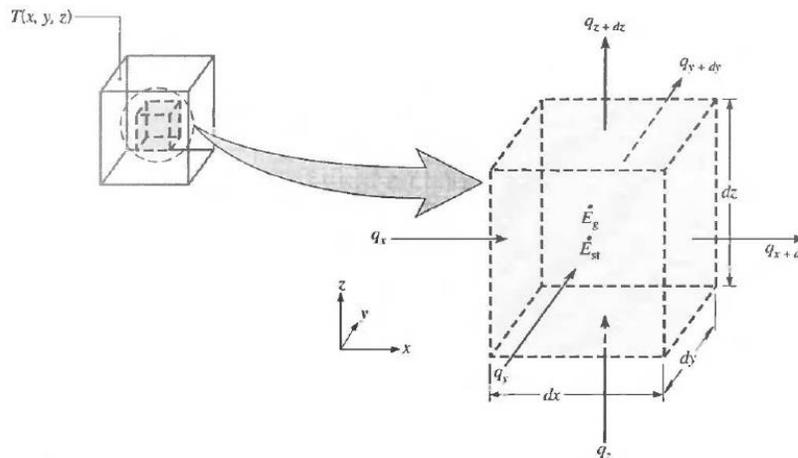


Figura 3-9 : Cubo diferencial para balance energético [10]

Si se toma dicho cubo diferencial como un volumen de control, el principio de conservación de energía indica que la energía total dentro de dicho volumen (\dot{E}_{st}) es igual a la energía que se genera (\dot{E}_g) más la energía que ingresa (\dot{E}_{in}), menos la energía que sale del volumen (\dot{E}_{out}). Esto se puede apreciar en la ecuación siguiente:

$$\dot{E}_{st} = \dot{E}_{in} + \dot{E}_g - \dot{E}_{out} \quad (3.13)$$

Ocupando el balance de la ecuación (3.13), y aplicando la ley de Fourier a los elementos del cubo diferencial se obtiene la ecuación general de difusión térmica en sólidos presentada en la ecuación (3.14). En ella aparece la temperatura, la generación de calor \dot{q} , la densidad ρ y el poder calorífico C_p .

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{q} = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3.14)$$

3.6 Intercambiadores de calor

Para la realización de las simulaciones en este trabajo, es necesario recurrir a la literatura sobre intercambiadores de calor [10]. Estos son dispositivos que permiten transferir calor de un fluido a otro, en la mayoría de los casos a través de otra superficie, sin que los flujos entren en contacto directo. Un tipo de intercambiador útil para las simulaciones son los intercambiadores de tubos con flujo cruzado [11]

En la Figura 3-10 se muestra el esquema de un banco de tubos por que transportan un fluido interno y son sometidos a un flujo cruzado de un fluido externo, provocando el intercambio térmico. Un empaquetamiento de batería de celdas cilíndricas refrigerado con aire, se asemeja a un intercambiador de tubos, solo que en este caso el tubo, sería la celda eléctrica.

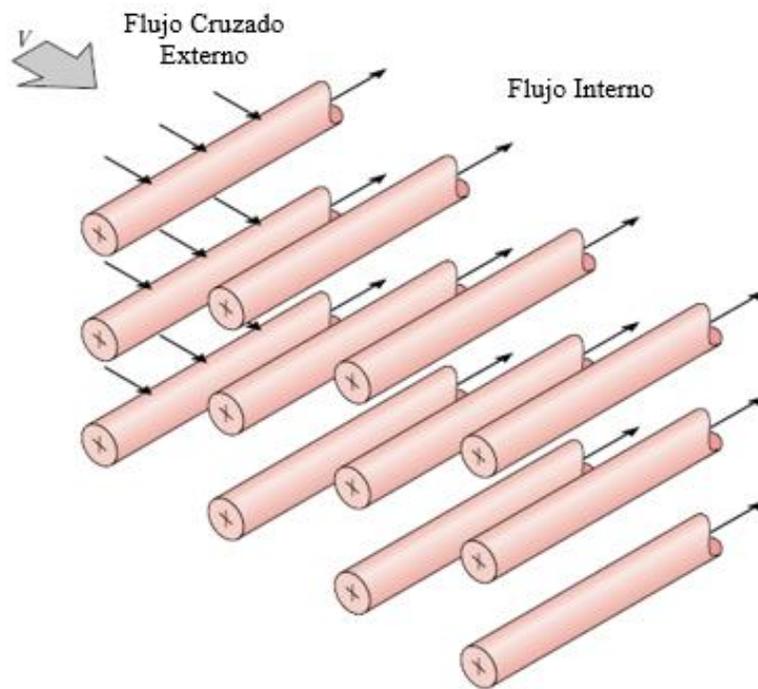


Figura 3-10 : Esquema banco de tubos en flujo cruzado [Fuente: Adaptación [11]]

3.6.1 Configuración de tubos

Típicamente se conocen dos arreglos para el banco de tubos, conocido como arreglo En Línea o Alineado y el arreglo Escalonado. En la Figura 3-11 se presentan ambos tipo de arreglo y además se indican las distancias vertical S_L y horizontal S_T , necesarias para el cálculo térmico fluidodinámico de estos dispositivos.

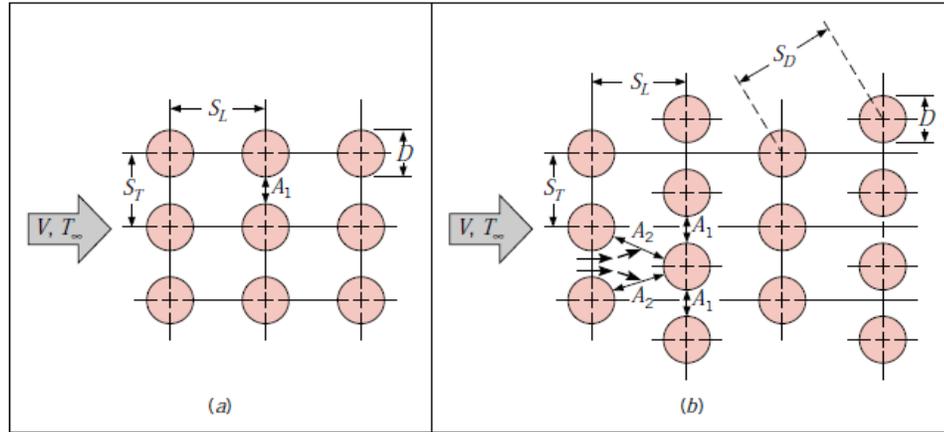


Figura 3-11 : Arreglos para un banco de Tubos. (a) Alineado. (b) Escalonado [11]

3.6.2 Pérdida de Carga en haz de tubos

Un fluido que pasa por un arreglo de tubos, se ve enfrentado a puntos de estancamiento y zonas de turbulencia, producto de la separación del flujo y los eventos de fricción entre el aire y la superficie de cada tubo. En la Figura 3-12 se muestra como se vería el flujo de un fluido a través de un banco de tubos.

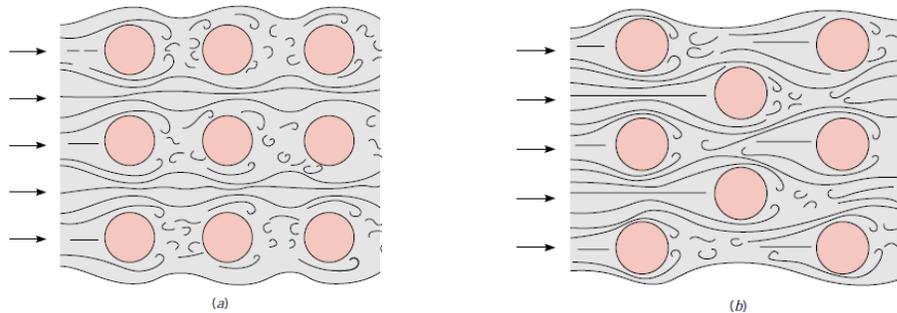


Figura 3-12 : Flujo a través de un banco de Tubos. (a) Alineado. (b) Escalonado[11]

Los eventos fluidodinámicos provocan una pérdida de carga caracterizada por cada arreglo, pero que en general es gobernada por la siguiente ecuación[11]:

$$\Delta P = N_L \chi \left(\rho \frac{V_{max}^2}{2} \right) f \quad (3.15)$$

En donde N_L es la cantidad de espacios entre tubos y el factor de fricción f con el factor de corrección χ se pueden obtener a partir de las gráficas de la Figura 3-13 y la Figura 3-14, según el tipo de arreglo del banco de tubos.

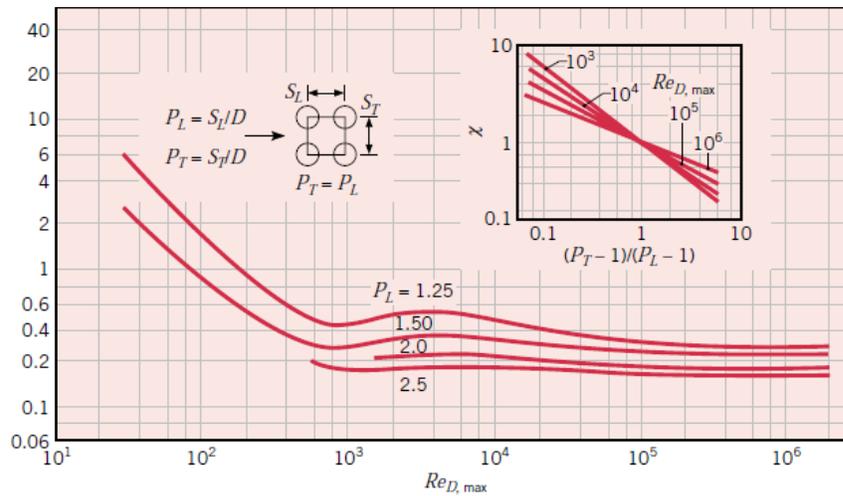


Figura 3-13 : Factor de fricción y de corrección para configuración Alineada [11]

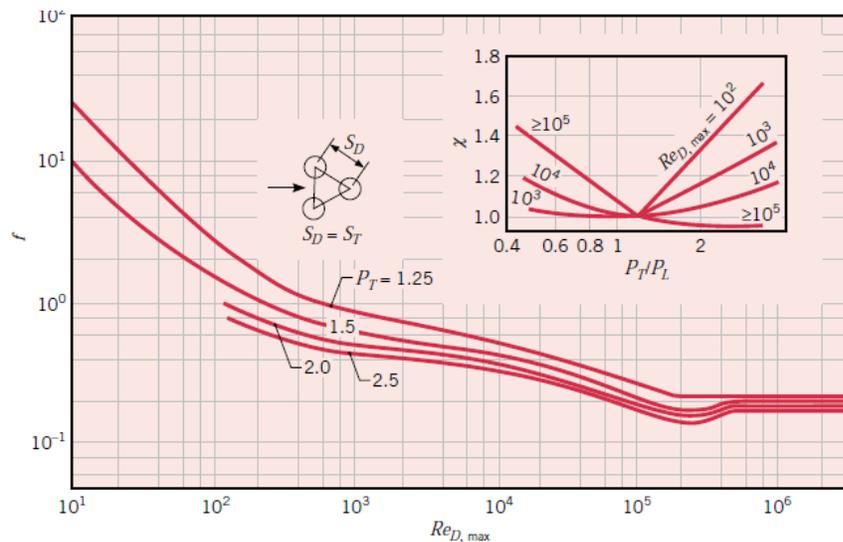


Figura 3-14 : Factor de fricción y de corrección para configuración Escalonada [11]

Para poder usar estas gráficas se deben calcular las razones de dimensión $P_L = S_L/D$ y $P_T = S_T/D$, y se debe calcular el Reynold máximo $Re_{D,max}$, correspondiente al calculado con la máxima velocidad del fluido, que por continuidad se debe producirse justo en el espacio entre dos tubos. Esta velocidad se calcula según la siguiente expresión [11]:

$$V_{max} = a V \frac{S_T}{(S_D - D)} \quad (3.16)$$

Donde a tiene valor 1 si el arreglo es Lineal y tiene un valor igual a 0,5 si el arreglo es Escalonado. Por otro lado V es la velocidad con la que el fluido llega al banco de tubos.

3.6.3 Correlación para el cálculo de Nussel

Como se mencionó anteriormente, un número adicional de utilizado es el número de Nussel, porque permite representa mediante un valor el nivel de transferencia de calor entre el fluido y la superficie.

Se utilizará el valor de Nussel en la superficie de cada celda (de cada tubo en caso de un intercambiador), para obtener una referencia teórica durante la validación de las simulaciones. Para ello se hará uso de la correlación de Grimson [11], que se presenta en la siguiente ecuación:

$$Nu_D = 1.13 C_1 C_2 Re_{D,max} Pr^{1/3} \quad (3.17)$$

Donde el valor de las constantes C_1 y m se obtienen de la siguiente tabla en función de la geometría de tubos:

S_L/D	S_T/D							
	1.25		1.5		2.0		3.0	
	C_1	m	C_1	m	C_1	m	C_1	m
Alineado								
1.25	0.348	0.592	0.275	0.608	0.100	0.704	0.0633	0.752
1.50	0.367	0.586	0.250	0.620	0.101	0.702	0.0678	0.744
2.00	0.418	0.570	0.299	0.602	0.229	0.632	0.198	0.648
3.00	0.290	0.601	0.357	0.584	0.374	0.581	0.286	0.608
Escalonado								
0.600	—	—	—	—	—	—	0.213	0.636
0.900	—	—	—	—	0.446	0.571	0.401	0.581
1.000	—	—	0.497	0.558	—	—	—	—
1.125	—	—	—	—	0.478	0.565	0.518	0.560
1.250	0.518	0.556	0.505	0.554	0.519	0.556	0.522	0.562
1.500	0.451	0.568	0.460	0.562	0.452	0.568	0.488	0.568
2.000	0.404	0.572	0.416	0.568	0.482	0.556	0.449	0.570
3.000	0.310	0.592	0.356	0.580	0.440	0.562	0.428	0.574

Figura 3-15 : Constantes C_1 y m para la correlación de Grimson. [Fuente: Adaptación [11]]

C_2 es un factor de corrección que sólo aplica cuando el número de tubos de la configuración el término N_L inferior a 10, de lo contrario C_2 debe valer 1.

N_L	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Alineado	0.64	0.80	0.87	0.90	0.92	0.94	0.96	0.98	0.99
Escalonado	0.68	0.75	0.83	0.89	0.92	0.95	0.97	0.98	0.99

Figura 3-16 : Constantes C_1 y m para la correlación de Grimson [Fuente: Adaptación [11]]

3.6.4 Pérdida de Carga en flujo interno

Para este trabajo será útil también conocer el cálculo de pérdida en carga de flujo interno en porciones del empaquetamiento donde no hay flujo cruzado con las celdas. Para esto se usa la caída de presión por Darcy, según la ecuación siguiente:

$$\Delta P = \frac{\rho V^2 f L}{2D} \quad (3.18)$$

Donde V es la velocidad del fluido dentro del tubo, L es el largo del tubo, D es el diámetro y f se obtiene a partir del gráfico presentado en la Figura 3-7

3.7 Conceptos para una simulación en ANSYS

Las simulaciones en ANSYS involucran la teoría de los volúmenes finitos, que se encargan de discretizar las ecuaciones que dominan la física del problema. Esto lo logra utilizando volúmenes pequeños que formulan y resuelven las ecuaciones dentro de volúmenes de control, mediante la teoría de métodos numéricos, resolviendo todas las ecuaciones gobernantes del sistema [10].

La interfaz gráfica de estos programas permite realizar una desratización de las geometrías mediante el método de mallado, lo cual permite dividir el sólido o superficie en una gran cantidad de elementos. Por otro lado es necesario tener en cuenta la naturaleza del problema al momento de simular en ANSYS, pues en la mayoría de las ocasiones, el fenómeno no tiene comportamiento laminar y es necesario la incorporación de modelos de turbulencia. Entre los que destaca como uno de los más utilizados, el modelo (k- ϵ) y es aceptado para el enfriamiento de baterías eléctricas [10].

3.7.1 Modelo de Turbulencia $k - \epsilon$

Este modelo tiene un tensor de esfuerzo dado por [10]:

$$t_{ij} = 2\mu_T \overline{d_{ij}} - \frac{2}{3} \bar{\rho} K \delta_{ij} \quad (3.19)$$

Donde la viscosidad de vórtice turbulento μ_T se define como:

$$\mu_T = \frac{\bar{\rho} c_\mu K^2}{\epsilon} \quad (3.20)$$

Con ε denominada como razón de disipación cinética turbulenta:

$$\varepsilon = \nu \overline{v'_{i,j} v'_{i,j}} \quad (3.21)$$

Estas ecuaciones tiene como incógnitas las variables K y ε . Para determinálas, es necesario ocupar ecuaciones de transporte para que puedan ser obtenidas a través de la ecuación de momentum:

$$\frac{\partial}{\partial x}(\bar{\rho}K) + \frac{\partial}{\partial y}(\bar{\rho}K\bar{v}_i)_{,i} = (\bar{\tau}_{ij}\bar{v}_j)_{,j} - \bar{\rho}\varepsilon + (\mu_k K_{,i})_{,i} \quad (3.22)$$

$$\frac{\partial}{\partial x}(\bar{\rho}\varepsilon) + (\bar{\rho}\varepsilon\bar{v}_i)_{,i} = c_{\varepsilon 1}(\bar{\tau}_{ij}\bar{v}_j)_{,j} - \frac{c_{\varepsilon 2}\bar{\rho}\varepsilon^2}{2} + (\mu_\varepsilon \varepsilon_{,i})_{,i} \quad (3.23)$$

Donde

$$\mu_k = \mu + \frac{\mu_T}{\sigma_K} \quad \mu_\varepsilon = \mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon} \quad \mu = 0,009 \quad c_{\varepsilon 1} = 1,45 \text{ a } 1,55 \quad c_{\varepsilon 2} = 1,92 \text{ a } 2,00$$

$$\sigma_K = 1 \quad \sigma_\varepsilon = 1,3$$

Existen distintas modalidades para el modelo de turbulencia (k-e), dependiendo de la aplicabilidad a los distintos fenómenos [12]. La mayoría de esas modalidades son mejoramientos de otras, pero aun así no siempre es conveniente usar los modelos k-e más modernos pues son más complejos y consumen más recursos computacionales. Se debe encontrar un equilibrio entre complejidad del fenómeno y la economización de recursos computacionales.

➤ k-e Estándar (SKE)

Es el método más utilizado dentro de la gama k-e, pero presenta inestabilidades al momento de trabajar con fluidos que muestren alta separación o contengan líneas de flujo con curvaturas altas o grandes gradientes de presión.

➤ k-e RNG

Este método contiene incorporado un modelo para mejorar el cálculo de viscosidad diferencial para efectos de bajo Reynolds. Además posee una fórmula analítica para el cálculo de numero adimensionales presentes en las ecuaciones, se adapta a fenómenos que presenten remolinos y funcionan bastante bien en flujos con esfuerzo de corte complejos, alta tasa de deformación y separación.

➤ k-e Realizable (RKE)

Satisface ciertas limitaciones matemáticas sobre esfuerzos de Reynolds para flujos turbulentos y es útil en problemas con dispersión de chorros planos y redondos. Es útil para capa límites con fuertes gradientes de presión y recirculaciones.

3.7.2 Tratamiento de paredes

Otro elemento necesario en fenómenos en que la interacción en las interfaces se vuelve importante, son los modelos de tratamiento de paredes. Esto quiere decir, la forma en que la simulación resolverá capas límites durante su cálculo numérico.

En particular el modelo k-e no es óptimo en el cálculo de paredes, por lo que es necesario incluir un método para dicho propósito, tomando dos caminos posibles[12]

➤ Funciones de pared

En este caso la física del fenómeno se resuelve mediante ecuaciones que completan las zonas en que k-e no es válido, lo que permite usar mallas menos finas en las interfaces. Existen dos importantes en ANSYS:

- Standard Wall Function, que permite aprovechar los datos conocidos por el cálculo en la zona turbulenta cuando las capas de turbulencia están en equilibrio.
- Non-Equilibrium Wall Function, que permite trabajar cuando no hay equilibrio en las capas turbulentas, y se presentan mayores gradientes de presión.

➤ Enhanced Wall Treatment

Este método utiliza el cálculo directo a partir de la desratización de malla en las interfaces. Por ello es necesario el uso de mallas más finas, pero permite realizar cálculos de buena manera en fenómenos en donde hay bajos esfuerzos viscosos y bajo Reynolds en zonas de pared cercana.

3.7.3 Cálculo de y^+ para capa límite

Cuando se trabaja con funciones de mejoramiento de pared (Enhanced Wall Treatment), dado que el cálculo se realiza mediante el refinamiento de malla, es necesario que el espesor de las capas adyacentes a la interface sea el adecuado para que no se produzcan omisiones de cálculo durante la simulación.

En particular se debe procurar que el centroide de las celdas adyacentes se encuentre dentro de la subcapa viscosa. Para esto surge un término denominado como y^+ , cuyo valor debe ser igual a 1, para que la condición recién descrita se cumpla. Este parámetro se calcula según la siguiente lista de ecuaciones:

$$y^+ = \frac{\rho V_t y}{\mu} \quad (3.24)$$

$$V_t = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \quad (3.25)$$

$$\tau_w = \frac{1}{2} C_f \rho U^2 \quad (3.26)$$

Con $C_f = 0.079 Re_d^{-0.25}$. Con ello es posible encontrar el espesor real necesario en la capa límite y , despejándolo de la ecuación (3.24):

$$y = \frac{y^+ \mu}{\rho V_t} \quad (3.27)$$

3.8 Desempeño térmico de las baterías de Litio

Dado que la celda funciona en base a reacciones químicas exotérmicas, su funcionamiento y rendimiento está íntimamente relacionado con la temperatura, es indispensable el manejo térmico del banco en carga y descarga, para aminorar el riesgo de sobre calentamiento, e incluso de explosión.

3.8.1 Forma de generación de calor

El calor generado en una batería puede generarse por las distintas manifestaciones químicas o por su efecto como resistencia eléctrica. Bernardi et al., realizó un balance de energía que se presenta en el paper de L.H Sae et al. [1], en donde se presenta la siguiente expresión para el calor generado por una batería:

$$Q_{gen} = i \left(E_0 - V_{batt} + T \frac{\partial U}{\partial T} \right) + i^2 R_c \quad (3.28)$$

Donde i es la corriente, R_c es la resistencia interna de la batería, V_{batt} es el voltaje de trabajo y E_0 es la f.e.m. introducida.

Por lo general se tiene que la causa predominante son los efectos por resistencia eléctrica [2] por lo que el calor generado se expresa como:

$$Q_{gen} = i^2 R_c \quad (3.29)$$

3.8.2 Efectos de la temperatura sobre la operación de baterías

Se recomienda que los rangos de operación estén entre 24°C y 45 °C [13] (ver Figura 3-17), y que la diferencia de temperatura entre las celdas del empaquetamiento no supere los 5°C [1].

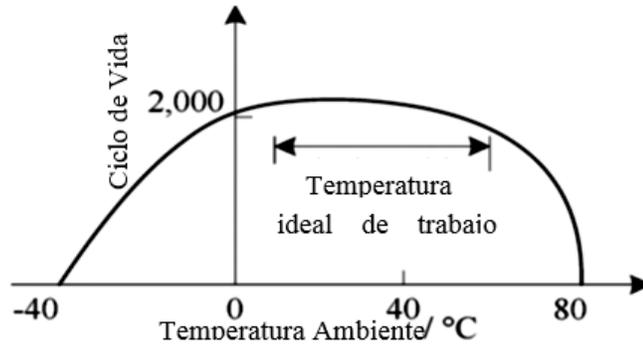


Figura 3-17: Rango temperatura óptima de operación. [Fuente: Adaptación [13]]

Por otro lado la diferencia de temperatura de operación o de enfriamiento entre un ciclo u otro puede provocar un aumento en el envejecimiento respecto a los ciclos anteriores [14], lo que significa que la batería se degrada más rápido y disminuye su durabilidad. En la Figura 3-18 se puede apreciar como a mayor temperatura la degradación aumenta entre un ciclo y otro de vida.

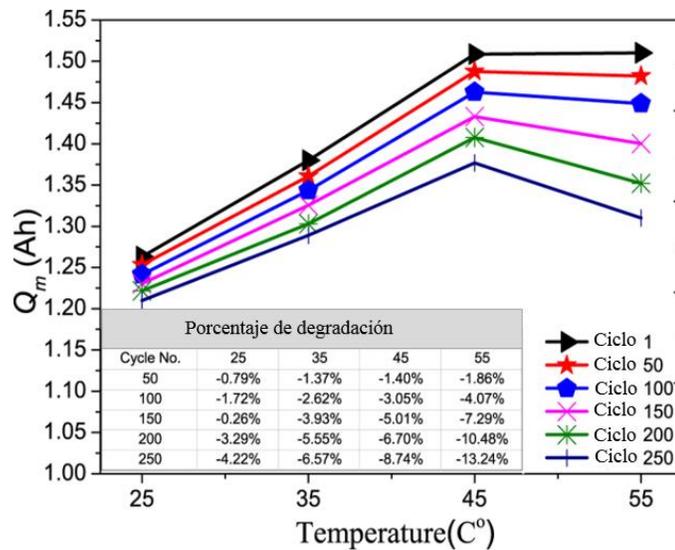


Figura 3-18: Estado de carga/degradación con temperaturas. [Fuente: Adaptación [14][21]]

Dado lo anterior, se hace indispensable el estudio de los empaquetamientos, ya que un buen diseño definirá su desempeño y costo. Actualmente existen numerosos modelos térmicos computacionales y experimentales que intentan ayudar a conocer el comportamiento térmico de baterías cilíndricas. Esto tiene que estar enfocado a resolver aspectos mecánicos, aspectos eléctricos, de diseño y económicos.

3.8.3 Modelo de enfriamiento exponencial

Con modelos teóricos de la sección 3.9, se puede obtener una ecuación para la temperatura entre celdas de los empaquetamientos, en la fase de descarga, asumiendo que el factor más importante es la convección, despreciando los efectos de conducción y la generación interna de temperatura antes de la descarga [6]. Por conservación de energía se puede definir:

$$\frac{dE_{vc}}{dt} = \dot{E}_{in} + \dot{E}_g - \dot{E}_{out} \quad (3.30)$$

Con:

- E_{vc} la energía de un volumen de control.
- \dot{E}_{in} la energía que se le entrega al volumen de control.
- \dot{E}_g la energía generada en el volumen de control, (ser nuclear, eléctrica o química)
- \dot{E}_{out} la energía expulsada del volumen de control.

Si el volumen de control es la una celda, la ecuación (3.10) queda como:

$$mc_p \frac{dT}{dt} = \dot{Q}_{in} + \dot{Q}_g - \dot{Q}_{out} \quad (3.31)$$

Con:

- m la masa de cuerpo.
- c_p la capacidad calórica específica del cuerpo.
- T la temperatura del cuerpo.
- \dot{Q}_{in} el calor entregado al cuerpo.
- \dot{Q}_{out} el calor cedido por el cuerpo.
- \dot{Q}_g calor generado por el cuerpo, (reacción electroquímica).

Como se desprecian los efectos de conducción y la celda esta desconectada y sometida solo a enfriamiento, no se genera calor, ni se le entrega, quedando:

$$mc \frac{dT}{dt} = -\dot{Q}_{out} \quad (3.32)$$

Bajo el supuesto final de que la pérdida de energía se realiza solamente por convección, se llega a la siguiente ecuación diferencial:

$$mc \frac{dT}{dt} = -hA(T(t) - T_{\infty}) \quad (3.33)$$

Con:

- h el coeficiente de convección.
- A la superficie en contacto con el fluido.
- $T(t)$ la temperatura del cuerpo en función del tiempo.
- T_{∞} la temperatura en el infinito, en este caso temperatura ambiente.

La solución a esta ecuación es conocida como es conocida como modelo exponencial o lumped model (ecuación 3.25) [10].

$$T(t) = (T_0 - T_{\infty})e^{-\frac{t}{\tau}} + T_{\infty} \quad (3.34)$$

3.8.4 Estado del arte estudios sobre desempeño térmico

Existen modelos eléctricos que mediante balances de energía permiten entender la forma en que la temperatura afecta el rendimiento de la batería y modelos matemáticos que han logrado encontrar predecir el campo de temperaturas sin aplicar ecuaciones térmicas. Estos modelos son mencionados por Jorge Reyes en su trabajo de memoria [10], pero no están directamente relacionados con lo que busca el presente trabajo de título, por lo que no serán profundizados.

La mayoría de los trabajos realizados utilizan celdas prismáticas como base de sus modelos y también disposiciones lineales, lo que limita el espectro de análisis.

Además los estudios están preferentemente enfocados en la celda y su comportamiento térmico y son pocos los que toman un estudio de refrigeración considerando los efectos del empaquetamiento y menos aún la disipación térmica en paredes del banco de baterías.

3.8.5 Trabajos previos

Entre trabajos previos, uno de los que más se acerca es el realizado por Lip Huat Saw et al. [9] quien desarrolla un análisis del comportamiento térmico de una pack Ion-Litio, fijándose en la generación de 38 a 120 celdas, y valida las simulaciones con resultados experimentales. El estudio se hace en 3D utilizando refrigeración en un pack bastante sofisticado que dirige el flujo en forma óptima. El modelo computacional basado en ecuaciones de transferencia de calor, es corroborado experimentalmente de forma exitosa.

Igualmente Hongguang et al. [3] mezcla 3 tipos de modelos distintos de batería para las simulaciones. Mide temperaturas y caídas de presión, y trabaja mediante CFD Fluent. Obtiene conclusiones sobre la geometría del empaquetamiento. Nombran a una configuración como Z, y concluyen que es la que obtiene mejores resultados.

El parámetro a medir es la distancia entre las celdas, sin embargo el trabajo se realiza con celdas pouch. Es un acercamiento a análisis de efectos de empaquetamiento, pero no para celdas cilíndricas. K.J Tseng et al [2] se dedica a la investigación con CFD, esta investigación se acerca bastante a las modelaciones a realizar, prueba distintas configuraciones de empaquetamiento. Sin embargo, se modela par 24 baterías cilíndricas, y no se analizan los efectos de paredes, que es uno de los análisis que se quiere realizar en esta memoria.

3.8.6 Modelo Fractal

Reyes et al., han desarrollado un mejor ajuste que el modelo exponencial, a datos experimentales del decaimiento exponencial de baterías refrigeradas con aire, haciendo uso de un método conocido como derivadas fractales, que son detalladas detallados en su paper de investigación [15].

Esta publicación ha permitido demostrar que el modelo de decaimiento exponencial no es estrictamente el mejor método para modelar el fenómeno físico de enfriamiento en baterías, debido a las simplificaciones que éste necesita.

Los efectos debido a la turbulencia durante la refrigeración y los efectos de energía interna de las Baterías, produce que el modelo exponencial se mantenga como una aproximación teórica al fenómeno real.

Sin embargo, a pesar de que las derivadas fractales permiten ajustar de mejor forma el comportamiento real del decaimiento, el modelo exponencial está en la base teórica de los programas de simulación fluidodinámica computacional como ANSYS y sigue siendo un excelente modelo para comparar otras variables relacionadas con el enfriamiento.

Capítulo 4

4 Diseño simulación computacional

Para construir el modelo computacional es necesario estudiar el montaje experimental construido previamente por Francisco Moser, en su primera fase de trabajo de título [8]. A partir de dicho montaje se definen las dimensiones del modelo computacional., respetando los mismos espesores, altos, largos y anchos de cada elemento del pack. Además se conocen los datos de decaimiento térmico de las celdas, con los cuales se calibrará el modelo.

Junto con ello se definen las propiedades de cada material, mediante el uso de literatura sobre la caracterización de baterías y las bases de datos de materiales incluidas en ANSYS.

Es importante recalcar que este montaje es existente y no forma parte del desarrollo de este trabajo de título, sino que es proporcionado por el Centro de Energía para la validación de las simulaciones y construcción del modelo computacional.

4.1 Montaje experimental existente de Moser

Los datos presentados a en esta sección corresponden a los resultados obtenidos por Francisco Moser para el montaje mencionado. El objetivo de dicho montaje fue estudiar el enfriamiento de un empaquetamiento con carcasa de madera soportando un módulo de 5 celdas. El detalle se encuentra descrito en el Anexo A.

Por otro lado el informe interno del Centro de energía, contiene información sobre las condiciones de operación de este experimento [16]. En dicho informe se explica que la refrigeración se realizó una vez que las baterías fueron totalmente descargadas, mismo instante en que se enciende el ventilador para el ingreso del aire al empaquetamiento, por un tiempo de 40 min hasta lograr que las baterías se enfríen desde 303 [K] hasta 292 [K]. Con esto se definen posteriormente las condiciones de operación para la velocidad del viento, temperatura inicial de la descarga y tiempo para las simulaciones del presente trabajo de título.

4.1.1 Componentes del Montaje

A continuación se describen los componentes del montaje experimental, que serán representados en el modelo 3D de la simulación fluidodinámica:

- Celdas cilíndricas ICR 26650

Las celdas ICR, son celdas tipo electrodo de cobalto LiCoO_2 . El montaje conecta 5 celdas conectadas en paralelo y se conectan termocuplas para el monitoreo térmico. En la Figura 4-1 se muestra una imagen de la celda utilizada en el experimento.

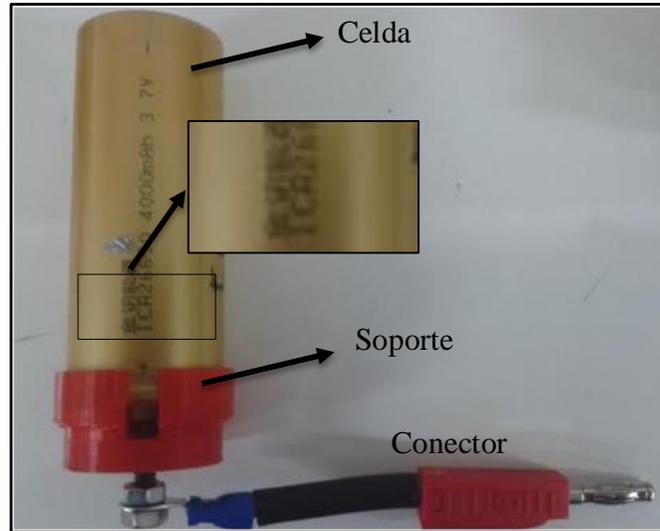


Figura 4-1: Celda Ión-Litio ICR 26650 [Fuente: Adaptación [8]]

➤ Ventilador Thermaltake TT-12025

Otro elemento importante es el ventilador utilizado, para el enfriamiento del banco de celdas, extraído de un computador. Este ventilador entrega un flujo de 40 CFM. Por las condiciones del experimento la medición de velocidad no es exacta y por tanto se utilizaran las dimensiones de la entrada de aire y el caudal del ventilador para calibrar y encontrar la velocidad adecuada para el modelo en ANSYS. En la Figura 4-2 se muestra una imagen del ventilador ocupado para el montaje del prototipo experimental.



Figura 4-2: Caja con ventilador Thermaltake TT-12025. [Fuente: aliexpress.es]

4.1.2 Selección de arreglo escalonado

Moser montó el ventilador y las 5 celdas sobre un empaquetamiento con carcasa de madera, provisto de una tobera que permite la conexión del ventilador y el traspaso de aire al banco de baterías. Esto fue hecho para una dos tipo de arreglo: Escalonado y Alineado.

Sin embargo, entre los resultados descritos por Moser, se aprecia que el arreglo experimental con menor error versus simulaciones realizadas en ese mismo trabajo, fue el arreglo escalonado, como se muestra en la siguiente tabla [8]:

Tabla 4-1: Resumen resultados montaje experimental [8]

	Escalonada	Alineada
Tau experimental [s]	500	800
Tau modelos computacionales [s]	400	500
error %	30	40

Por ello se selecciona la configuración escalonada para el modelo fluidodinámico. En la Figura 4-3 se muestra el montaje experimental descrito previamente y la carcasa de madera utilizada, para el arreglo escalonado de 5 celdas. Además se aprecia una la tobera incorporada al módulo para adaptar el tamaño del ventilador.

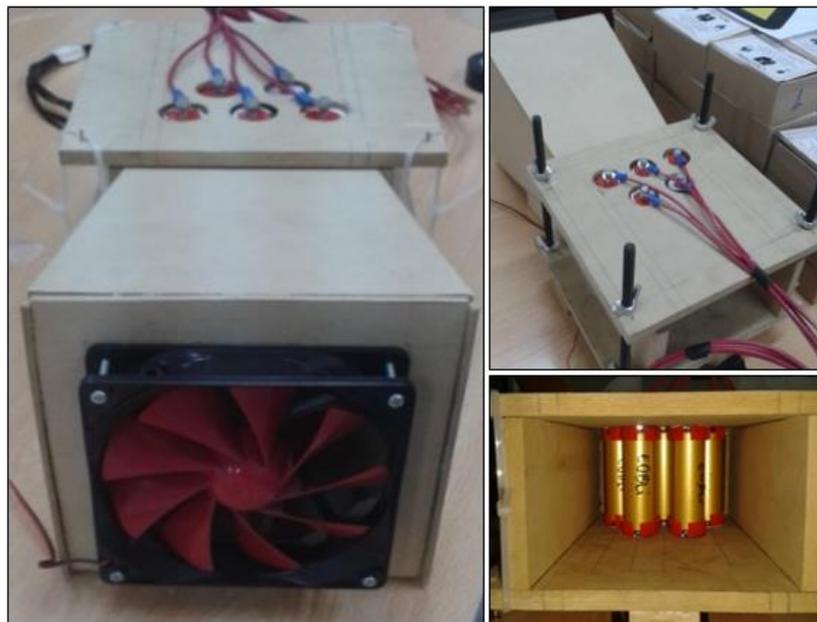


Figura 4-3: Montaje experimental de 5 celdas [8]

4.2 Parámetros del Modelo computacional

Una vez reconocido el montaje experimental se definen los parámetros para simular y calibrar el modelo, a partir de los datos disponibles.

4.2.1 Dimensiones y Materiales

Tomando las medidas de la carcasa de madera ocupada para el experimento se determina que el empaquetamiento debe tener 131 mm de ancho, 71 mm de alto y baterías en configuración escalonada separadas a en $S_L = S_T = 39\text{ mm}$, como se aprecia en la Figura 4-4.

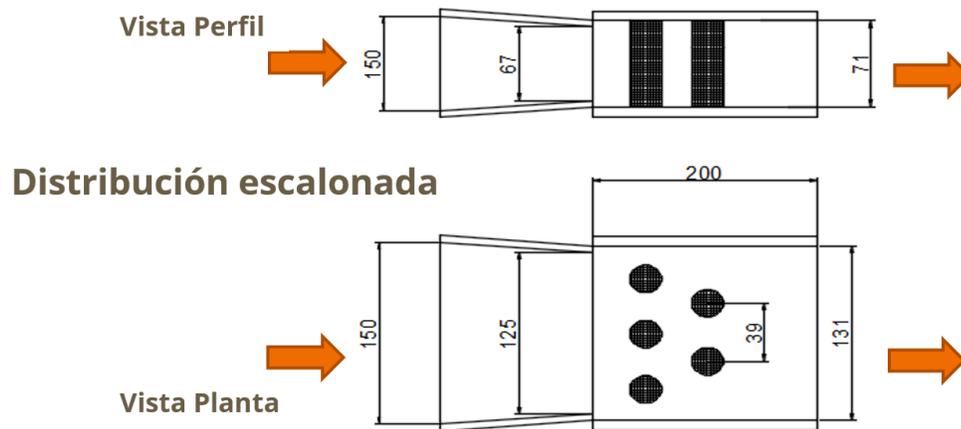


Figura 4-4: Medidas para el modelo

Las flechas naranjas indican la dirección del flujo de aire y los elementos de color negro corresponden a las baterías de Litio. El espesor de las paredes de la carcasa es de 9 mm y las diámetro de la batería son obtenidas a partir de la información proporcionada por los informes internos del Centro de energía [16]. En resumen de los datos para el empaquetamiento se tiene:

Tabla 4-2: Resumen datos módulo de 5 celdas seleccionado

Módulo Experimental	
Material Carcasa	Madera
Espesor Madera [mm]	9
Tipo Baterías	Litio tipo ICR
Número de Baterías	5
Tipo de arreglo	Escalonado
Velocidad del viento [m/s]	1.9
Diámetro/Alto baterías[mm]	26/66

4.2.2 Condiciones de Operación

Las condiciones de operación son las condiciones de borde y condiciones iniciales utilizadas en el modelo computacional. Esto incluye definir la velocidad de entrada del viento, la presión de salida y la temperatura inicial de las baterías antes del enfriamiento.

Respecto al aire, se tomó la medida del área del ventilador y a partir de su flujo de operación (40 CFM). Se deduce que la velocidad de entrada del aire es de 1.9 [m/s], valor que será una condición de borde para la simulación, como se puede ver en la Figura 4-5.

Por otro lado, la temperatura de las baterías se obtiene de la información del montaje experimental para el instante en que las baterías están completamente descargadas y comienza la etapa de enfriamiento. Dicha información indica que la temperatura inicial de diseño para las baterías es de 29°C o 302 K, lo que también será una condición inicial para la simulación

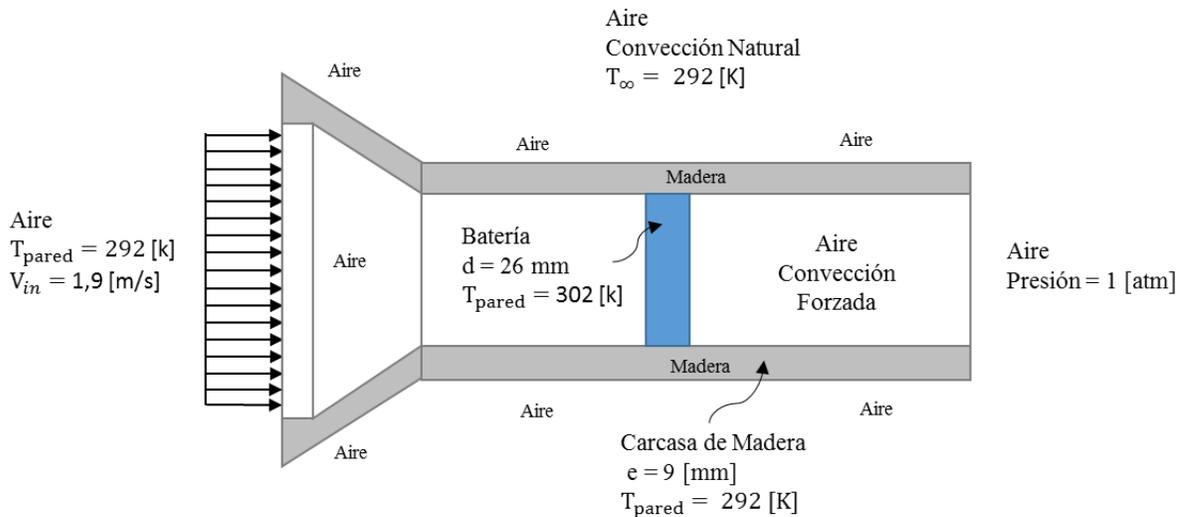


Figura 4-5 : Esquema condiciones de borde

Para el exterior se asume aire con velocidad nula y coeficiente convectivo igual a 15 [W/mK], valor obtenido de fuente bibliográfica [11]. En el interior de la batería la convección es forzada y el coeficiente convectivo que interesa en el análisis será obtenido a partir de la simulación.

Por otro lado el empaquetamiento está abierto al final, por lo tanto la condición de borde a la salida será una de presión atmosférica al igual que en la entrada, esto es 1 [atm]. Por tanto se asume para la configuración en ANSYS una presión relativa nula entre la entrada y la salida del empaquetamiento. En la Tabla 4-3 se presenta un resumen de las condiciones de operación.

Tabla 4-3: Resumen Condiciones Operación

Ventilador	
Modelo	Thermaltake TT-12025.
Diámetro Ventilador [mm]	110
Flujo Ventilador [CFM]	40
Velocidad Viento [m/s]	1,9
Empaquetamiento y Baterías	
Temperatura inicial Baterías [K]	302
Temperatura inicial Carcasa	292
Presión a la salida [atm]	1
Aire	
Densidad [Kg/m ³]	1,2
Viscosidad [Kg/m.s]	0,000015
Capacidad calorífica [J /Kg K]	1006,45
Coefficiente conductivo [W/m]	0,0242

4.3 Cálculos Teóricos de Validación

Se parte con la obtención del número de Reynolds según la teoría presentada en la sección 3.6.2, calculando y seleccionando los valores adecuado para St, Sl y con ello la razón Pt/Pl que permite obtener lo factores para el cálculo de Reynold en un haz de tubos. Luego se obtiene el Reynolds para la zona de la carcasa donde no hay celdas utilizando el diagrama de Moody y la teoría de la sección 3.6.4. La Tabla 4-1 resumen de cálculo y valores para el Reynolds del módulo:

Tabla 4-4: Resumen Reynolds Modulo 5 Celdas

Reynolds Zona Tubos	5928
Sd	0,044
St	0,039
Sl	0,039
Umax [m/s]	5,70
Pt/Pl	1,00
Pt	1,50
Reynolds Carcasa	14125
Ancho [m]	0,131
Alto [m]	0,072
Diámetro [m]	0,09
Largo [m]	0,2
l/D	2,2

A partir de lo anterior se consideran dos tramos, antes y después de las baterías en que se usa la ecuación (3.18). Posteriormente se utiliza la teoría de intercambiador de tubos y la ecuación (3.15), para la pérdida en tubos. El resumen se presenta en la tabla siguiente:

Tabla 4-5: Resumen Pérdida de Carga

Caída de presión en arreglo baterías	
X	1
NL	2
f	0,3
Pérdida tubos [Pa]	11,7
Caída de presión en carcasa	
f	0,02
l	160
Pérdida carcasa [Pa]	0,644
Caída total	
Pérdida Total [Pa]	12,34

4.3.1 Caracterización propiedades de los materiales

Las propiedades de la madera son importadas directamente de la base de datos de Fluent, pero se corrige y verifica el calor específico con las propiedades encontradas para madera mediante el software de selección de materiales CES Edupack Anexo D. En la Tabla 4-6 se resumen las propiedades seleccionadas para ingresar a la simulación.

Tabla 4-6: Propiedades madera

Madera	
Densidad [Kg/m ³]	700
Calor Específico [J /Kg K]	1710
Coefficiente conductivo [W/mK]	0,173

Para las baterías se utiliza la literatura, ya que no solo están compuestas de Litio sino que están conformadas por varias capas que delimitan la sal electrolítica, el ánodo y el cátodo, por lo tanto es necesario encontrar literatura que permita caracterizar las propiedades térmicas de la batería.

Para ello se busca la caracterización de las tres baterías seleccionadas, es decir, para la batería con electrodo en base a Fostato [17], en base a Mnaganeso[18] y en base a Cobalto [19]. Si bien la batería ICR utilizada en el experimento es en base a cobalto, se utilizan promedios entre las propiedades para lograr una aproximación que recopile efectos en las tres caracterizaciones investigadas.

Finalmente se decide que para la batería se ocupara un calor específico de 1300 [J/Kg K], una densidad de 2000 [Kg/m³] y una conductividad térmica de 1,17 [W/Mk].

Tabla 4-7: Propiedades batería

Batería ion-Litio	
Densidad [Kg/m ³]	2000
Calor Específico [J /Kg K]	1300
Coefficiente conductivo [W/mK]	1,17

Utilizando la correlación de Grimsim mediante la ecuación (3.17) se calcula el número de Nussel para una celda acorde a las dimensiones y condiciones de operación descrita previamente. Con ello es posible a partir de la ecuación (3.12), obtener el coeficiente convectivo de la celda.

Tabla 4-8: Resumen Calculo Nussel y Coeficiente convectivo h

Prandtl	0,6382
C1	0,35
C2	0,92
m	0,6
Nussel	86
Diámetro [m]	0,026
Coefficiente conductivo [W/mk]	0,0242
h [W/m²K]	81

El coeficiente convectivo calculado es referencial para saber un orden de magnitud, pues considera un Nussel constante calculado a partir de una correlación, mientras que ANSYS calcula el coeficiente convectivo a partir de la ecuación de Newton para convección, presentada en la sección 3.5.2, lo que implica que este valor variará con el tiempo y con la temperatura de cada celda, utilizando una temperatura de referencia del aire constante igual a 292 [K].

Por tanto es de esperar que cuando la temperatura de algún sólido alcance la temperatura de referencia del aire, el valor del coeficiente convectivo se elevará rápidamente por un tema numérico, ya que el delta temperatura estará en el denominador para la ecuación de Newton.

4.4 Construcción del modelo 3D

A partir de las condiciones de operación de finidas se procede al levantamiento del CAD para el módulo y la posterior importación en ANSYS-Fluent. En ANSYS se genera un volumen de control para el aire, a partir de un negativo de la geometría y el uso de operaciones booleanas de unión y sustracción sobre los elementos del CAD importado.

En la Figura 4-6 se puede observar el modelo CAD, que considera la batería (color amarillo) y los soportes diseñados en el montaje experimental para la instalación en la caja de madera. Por otro lado, el diseño de la caja de madera considera la misma geometría que el montaje experimental.

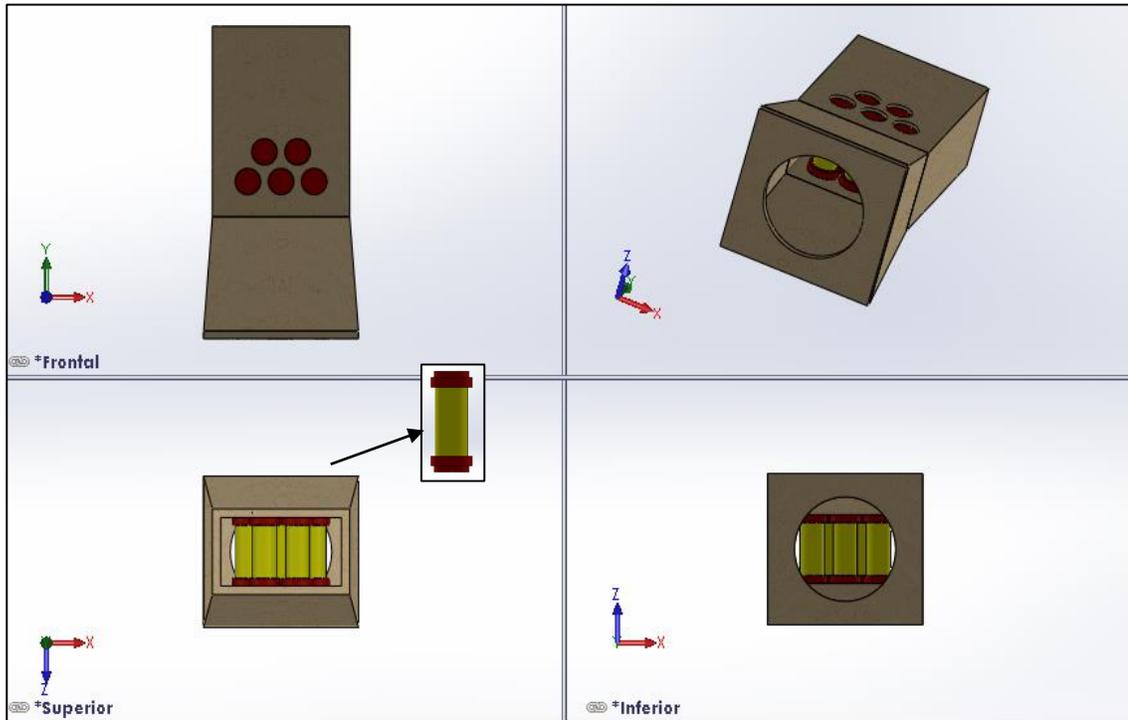


Figura 4-6: Diseño CAD empaquetamiento:

4.4.1 Configuración CAD en ANSYS

El modelo CAD se importa en Fluent ANSYS para ingresar las condiciones de operación también definidas el capítulo 4.2. La Figura 4-7 muestra la apariencia del diseño y se pueden identificar las paredes de madera, los soportes, las baterías y su configuración escalonada.

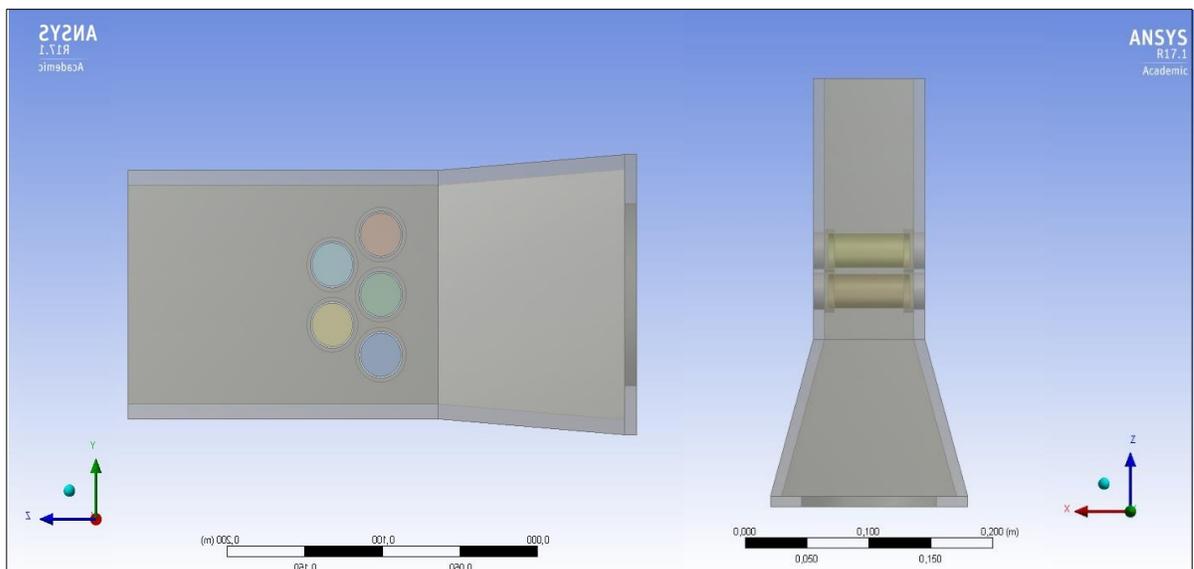


Figura 4-7: Importación de CAD a ANSYS-Fluent

4.4.2 Generación de volumen de control

En la geometría importada es necesario definir el volumen de control de aire y para ello se realizan operaciones booleanas. Se traspasa un paralelepípedo a lo largo de toda la geometría y luego a este se sustraen los elementos que serán sólidos, como la madera y las baterías, pero sin que estos desaparezcan del diseño.

➤ Nomenclatura y Ejes coordenados

El eje Z es el eje por el cual ingresa el aire mientras que el Eje Y con el Eje X, definen la sección transversal al aire. En la Figura 4-8 (Derecha) se muestra un isométrico del empaquetamiento y se puede apreciar la dirección de entrada del aire, considerada en el modelo.

La convención para identificar las baterías durante el presente trabajo, estas se numeran en orden creciente del eje Y primera fila baterías 1, 2 y 3 y en la segunda fila las baterías 4 y 5, como se puede ver en la Figura 4-8 (Izquierda).

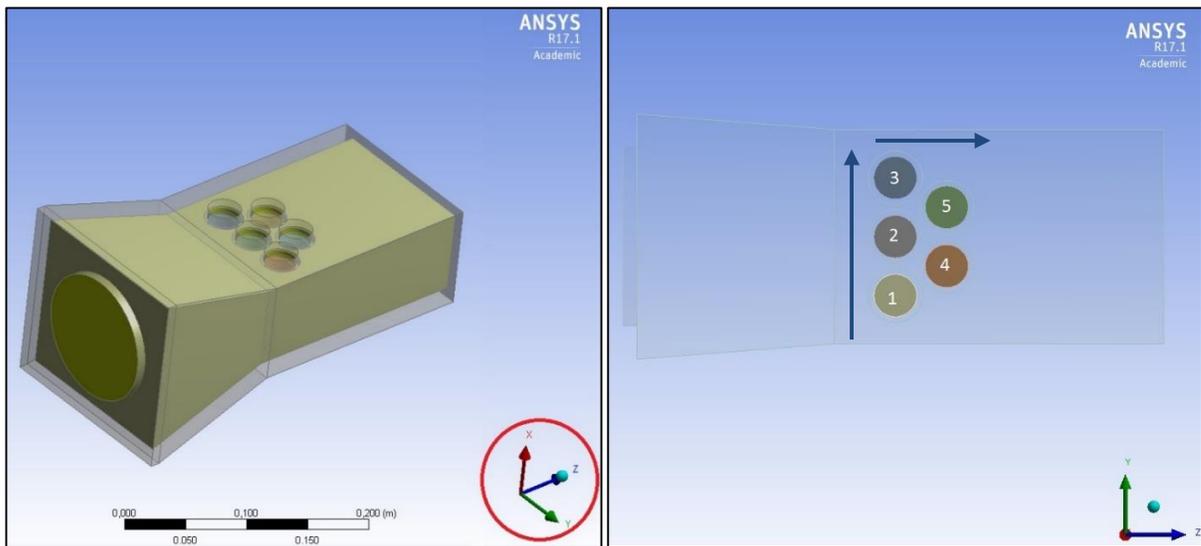


Figura 4-8: Derecha: Dirección de avance del aire, Izquierda: Nomenclatura celdas

La convención para identificar las celdas es de izquierda a derecha y desde la entrada a la salida, como se puede ver en la Cabe destacar que la carcasa del módulo también podrá ser identificada como pack en algunos casos para evitar la redundancia de nombres.

Capítulo 5

5 Validación y Resultados del Modelo

5.1 Estudio de Mallado

Una vez ingresadas las condiciones de operación se realiza el mallado del empaquetamiento para el posterior análisis de volúmenes finito a través en Ansys-Fluent. Para la primera malla se consideran las siguientes consideraciones:

- Se configura un máximo de 300.000 mil elementos, antes de la prueba de mallado.
- Se considera tipología Shared Topology para lograr malla continua entre interfaces
- Se incluye un método de inflación en las interfaces.
- Utilizando las ecuaciones para y^+ de la sección 3.7.3, se obtiene que el tamaño del elemento adyacente a la pared debe ser de 0,2 mm (Ver Tabla 5-1).

Tabla 5-1: Resumen cálculo “y” capa adyacente

Re	5928	
U	1,9	[m/s]
Ut	0,0786	[m/s]
d	1,2	[Kg/m3]
u	0,000015	[Kg/m-s]
t	0,00741	
Cf	0,00342	
y+	1	
y	0,2	[mm]

5.1.1 Configuración Inicial Fluent

Al iniciar Fluent lo primero es activar el proceso transiente y las ecuaciones de energía:

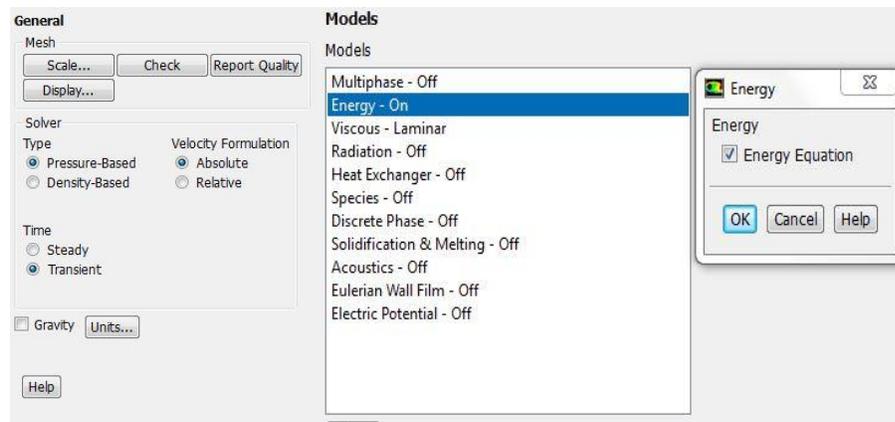


Figura 5-1: Configuración inicial

Se considera convección natural con coeficiente de convección constante para el aire en el exterior igual a 15 [W/m²k], obtenido de la bibliografía [11]. Lo anterior se aprecia en la Figura 5-2, mientras que la Figura 5-3 muestra las propiedades del aire y la madera configuradas para el modelo.

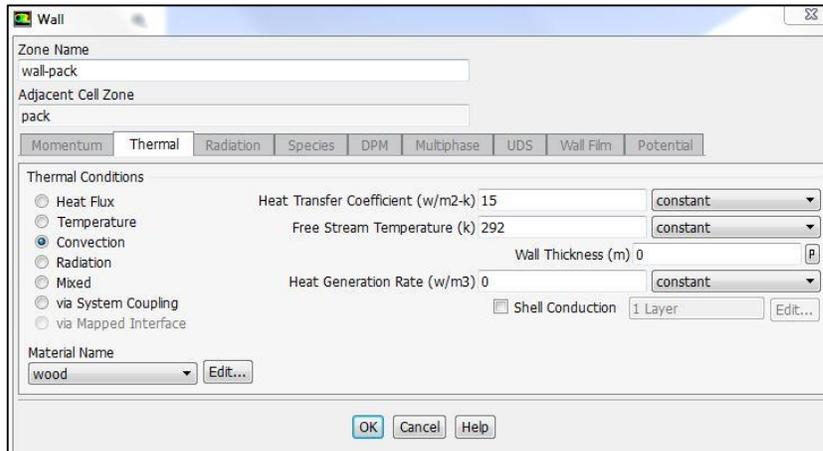


Figura 5-2: Convección exterior

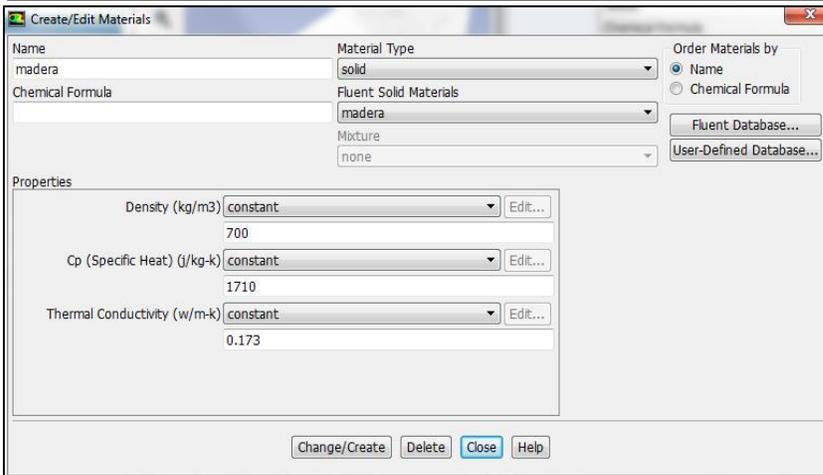
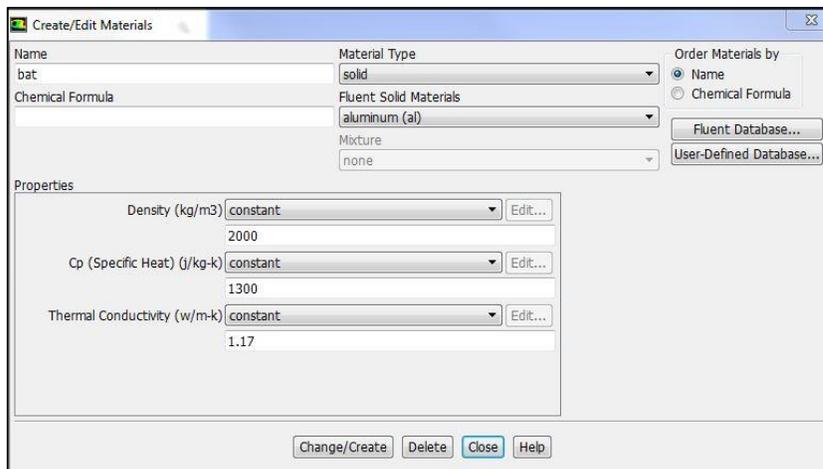


Figura 5-3: Ingreso Propiedades de Materiales. Arriba: Celda. Abajo: Madera

Para dar la condición inicial de temperatura de las celdas se ingresa un “Patch” para inicializarlas con 302 [K], como se puede ver en la Figura 5-4.

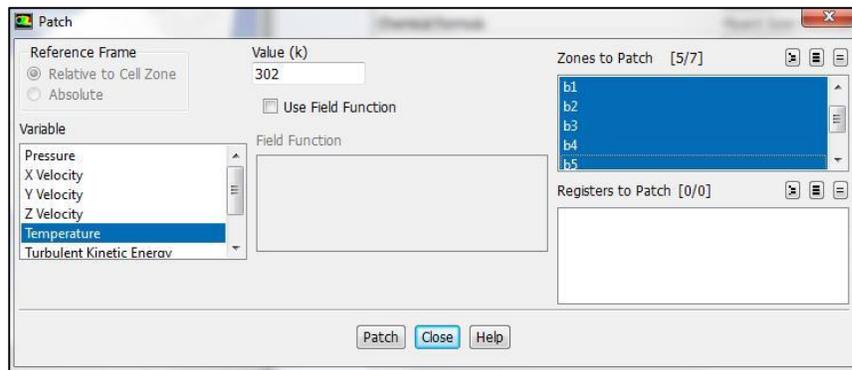


Figura 5-4: Temperatura inicial baterías

5.1.2 Resultados pruebas de mado

Con la configuración previa se lleva a cabo una prueba de mallas en donde se compara el decaimiento térmico de la batería número 4 en función de del tiempo.

El procedimiento se realiza mediante el cambio de tamaño de los elementos. Sin embargo a medida que se aumenta el número de elementos, se obtiene que la malla se vuelve independiente a los 6000000 de elementos, (ver Figura 5-5), lo cual es un costo muy alto en términos de simulación.

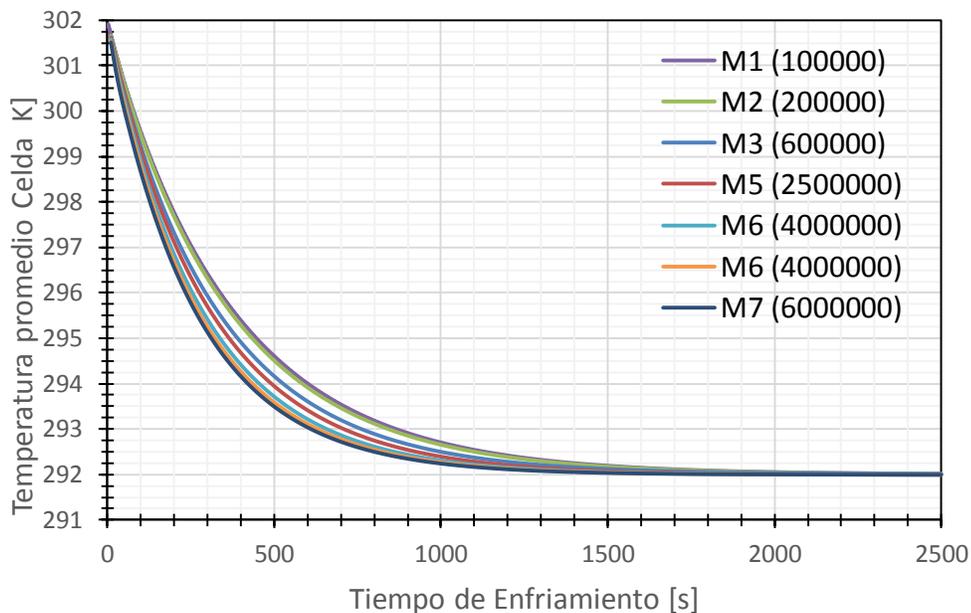


Figura 5-5: Prueba de mado – Refinamiento según Tamaño de Elementos

Se utiliza un método alternativo para la prueba de mallas, con el fin de encontrar una independencia de menos elementos. Para ello se modifica el comando “number around cells”, que modifica la cantidad de elementos en la vecindad de otro elemento. La Figura 5-6 muestra que dicho método otorga un mejor resultado y que la malla se vuelve independiente del número elemento para una cantidad de 160000 elementos, la cual es una cantidad aceptable respecto a los recursos computacionales disponibles. Entre paréntesis se indica la cantidad de elementos de cada malla.

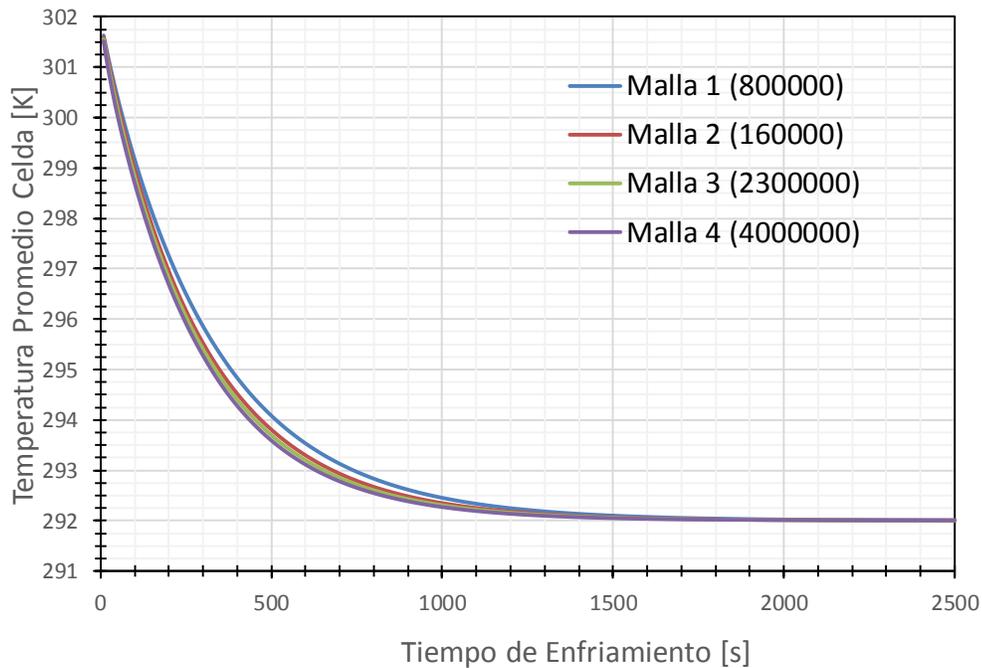


Figura 5-6: Prueba de mallado-Refinamiento según tamaño Number of Cells

5.1.3 Selección Malla definitiva

A partir de la prueba anterior, se selecciona una malla de 1600000 elementos, con refinamiento de malla en las superficies incluyendo un primer elemento adyacente a las interfaces cercano al orden de 0,2 [mm], obtenido del cálculo de y^+ . La y la Figura 5-7 y la Figura 5-8 muestran cortes en planta y vista lateral para la malla seleccionada.

Es posible apreciar un refinamiento de malla alrededor de las celdas para el cálculo de capa límite, además se han utilizado elementos hexaédricos para el mallado de cada celda cilíndrica. En las interfaces los nodos de la malla son compartidos por sólido y fluido gracias al uso del comando “Share Topology”.

También es posible ver en la Figura 5-9 , un zoom de la interface aire-carcasa interior del módulo, en donde se aprecia el orden de magnitud cercano a 0,2 [mm] mencionado con anterioridad. En el resto del volumen se utilizan elementos 4 mm en promedio dado que reducir el tamaño en esas zonas significa incremento de recursos computacionales innecesarios.

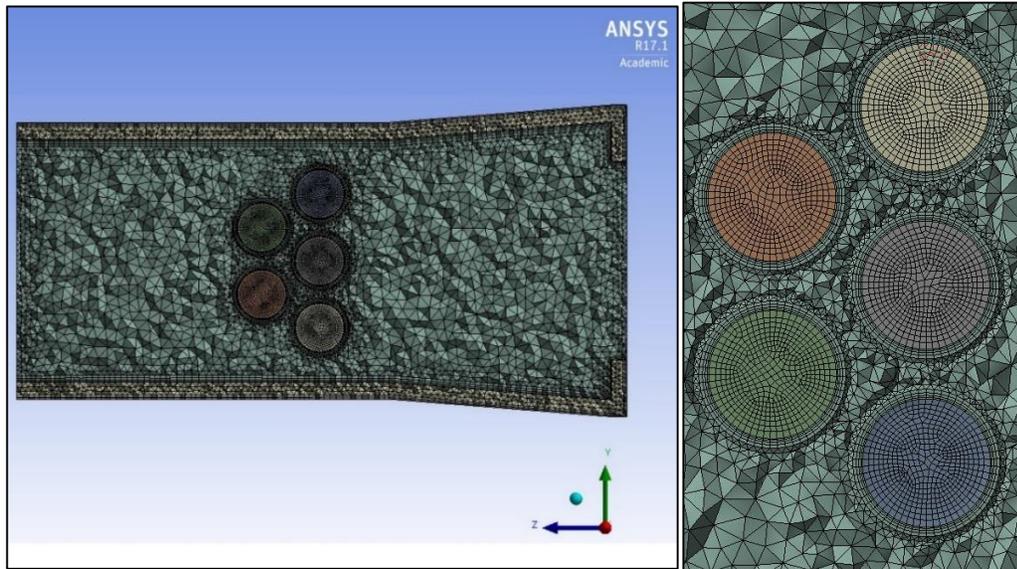


Figura 5-7: Corte vista en planta de mallado.

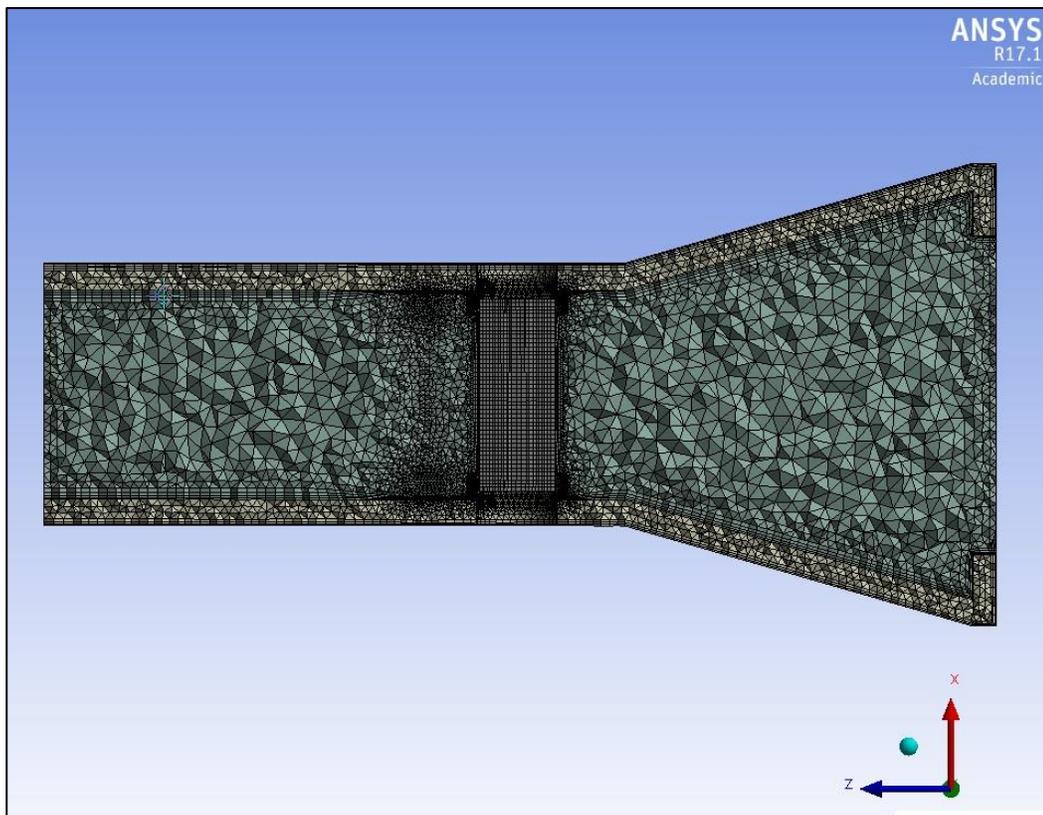


Figura 5-8: Corte vista lateral de mallado

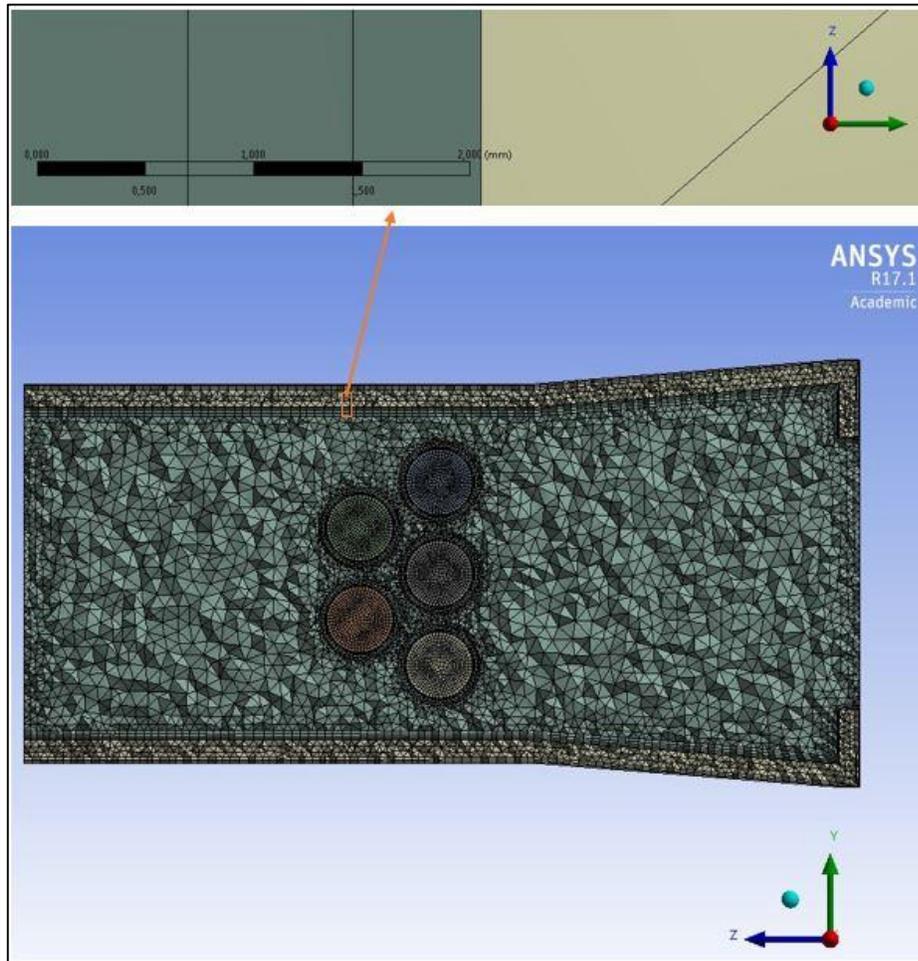


Figura 5-9: Orden de magnitud celda adyacente en superficie

5.2 Estudio de configuración en Fluent

5.2.1 Estudio Modelo de Turbulencia

Como se indicó anteriormente, existen distintos modelos de turbulencia que pueden modelar el fluido, sin embargo dado que este modelo no se basa directamente en una publicación previa, se utiliza el modelo de turbulencia k-e. Se realiza un análisis de sensibilidad sobre la curva de decaimiento de las baterías, para distintos modelos k-e en función del tratamiento de paredes utilizado. Se utilizan los datos del montaje experimental para calibrar el estudio de sensibilidad, comparando los modelos: k-e Estándar (STD), k-e RNG y k-e Realizable (RKE). Para cada modelo se estudia el uso de tratamientos de pared Non-Equilibrium Wall Function (NEF) y Enhanced Wall Treatment (ENH).

En la Figura 5-10 se compara el decaimiento de la celda 4 para los distintos modelos de turbulencia versus el promedio de decaimiento de las 5 celdas del montaje experimental. Se aprecia una dependencia del tratamiento de paredes, en donde los métodos con ENH (Enhanced Wall Treatment) se ajustan mejor al experimento. Por tanto se selecciona el modelo k-e RNG, con un tratamiento de paredes Enhanced Wall Treatment, como se ve en la Figura 5-11.

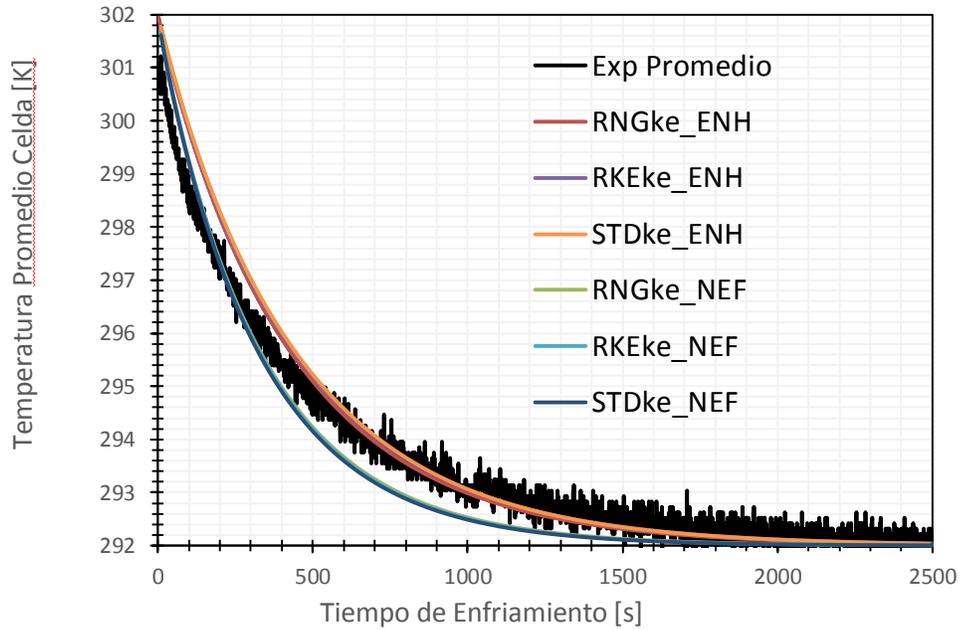


Figura 5-10: Comparación Modelo de Turbulencia y Tratamiento de Pared

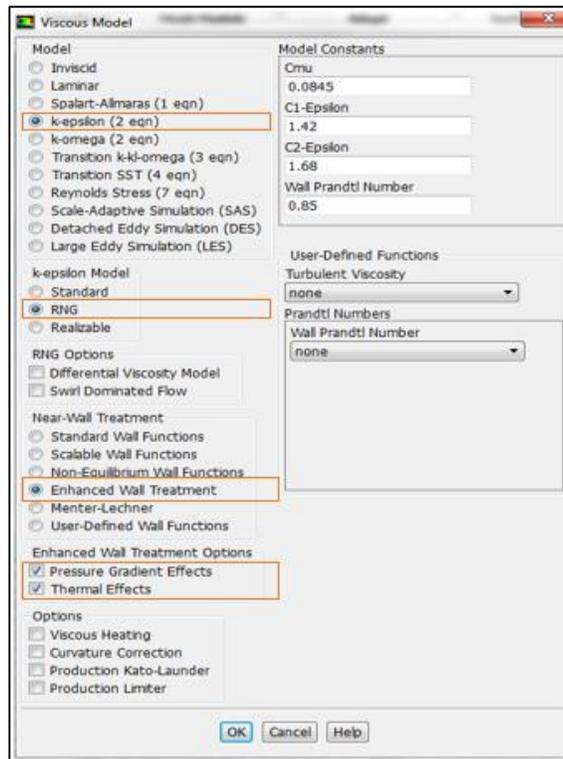


Figura 5-11: Configuración final del Modelo de Turbulencia

En el Anexo B se muestra el resto de los gráficos del estudio de sensibilidad realizado. La Figura 5-12 muestra el ajuste final logrado con la malla y modelo de turbulencia seleccionado. Se compara para las celdas 1-2-4, conforme a la numeración presentada en el capítulo 4.

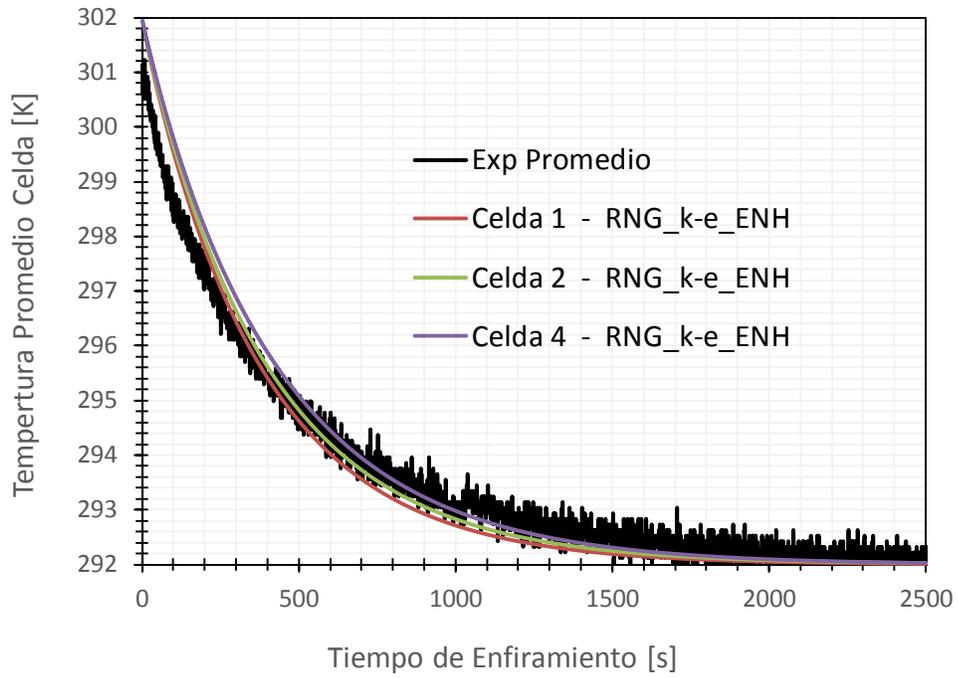


Figura 5-12: Comparación Final RNG-k-e ENH y Datos Experimentales

5.3 Verificación fluidodinámica

A continuación se presentan los campos de presión y velocidad del modelo:

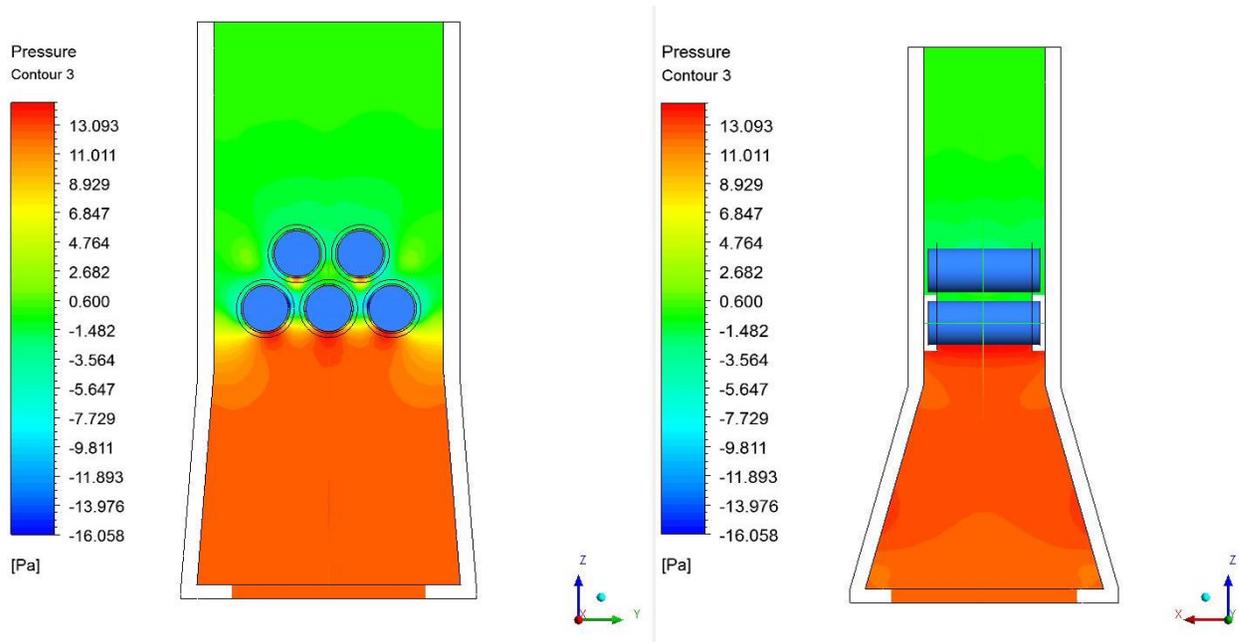


Figura 5-13 : Presión del aire – Contorno Plano medio en Planta y Lateral

De los cálculos teóricos se obtiene una velocidad máxima de 5,7 [m/s] y una pérdida de carga aproximada en el pack de 12 [Pa]. Con la Figura 5-13 se puede verificar que la pérdida del modelo también es aproximadamente de 12 [Pa], mientras que con la Figura 5-14 se identifica una velocidad máxima visible, cercana a 6 [m/s], lo cual valida fluidodinámicamente el modelo.

También es posible notar que la caída de presión es repentina, luego de las baterías, y no así a lo largo del pack. Esto se produce porque la velocidad es baja y por lo tanto la pérdida de carga debida solo a eventos de rugosidad y viscosidad no es tan importante.

Por otro lado en el frente de las celdas se producen puntos de estancamiento y dado que las celdas están bastante juntas, el estancamiento de aire en una celda, se potencia con el estancamiento de la celda adyacente, explicando dicho perfil de presiones.

En cuando a la velocidad, se puede apreciar que se cumplen los efectos de continuidad, pues existe un aumento de velocidad en las zonas de angostamiento. Además existe separación del flujo al cruzar la baterías, como se puede ver en la Figura 5-15 y en la Figura 5-16, lo cual provoca turbulencia con flujos de recirculación favoreciendo la transferencia de calor desde las primeras celdas a las celdas que están cercanas a la entrada de aire, hacia las celdas posteriores, las que por tanto debiesen demorar un poco más en enfriar.

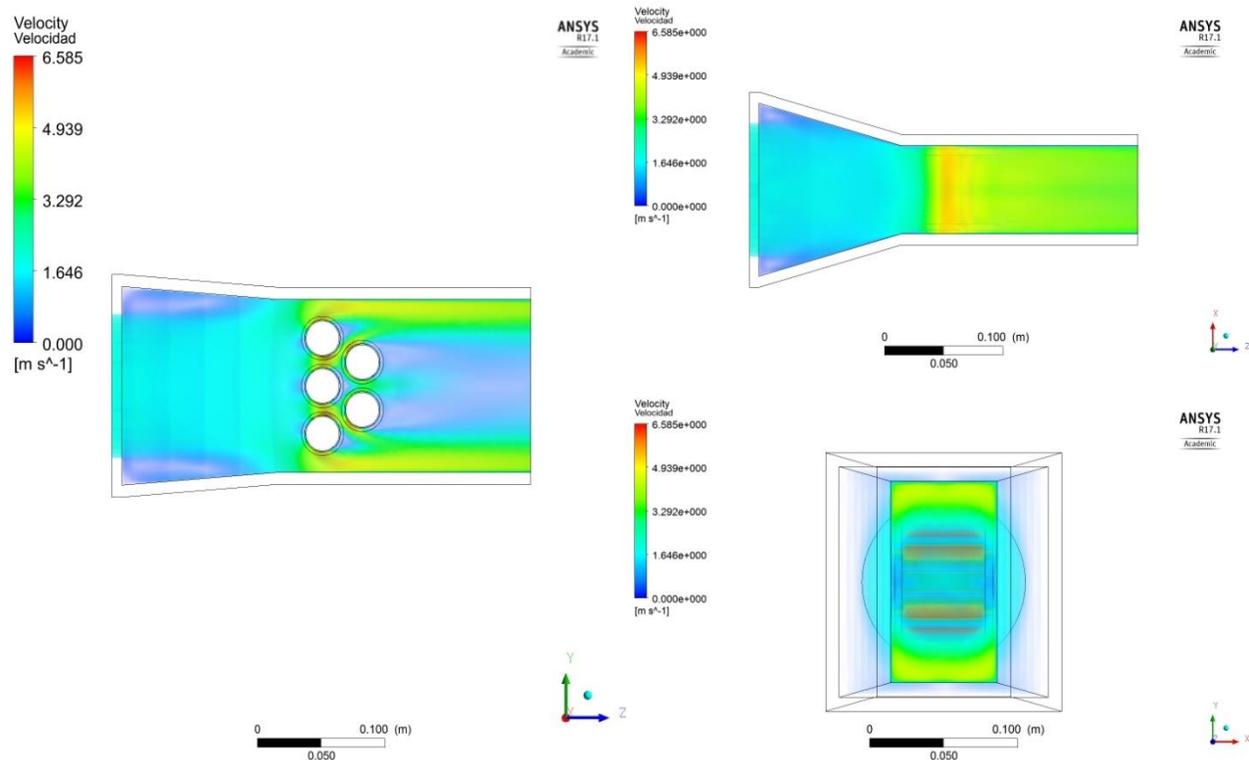


Figura 5-14 : Velocidad del aire–Renderizado de Volumen

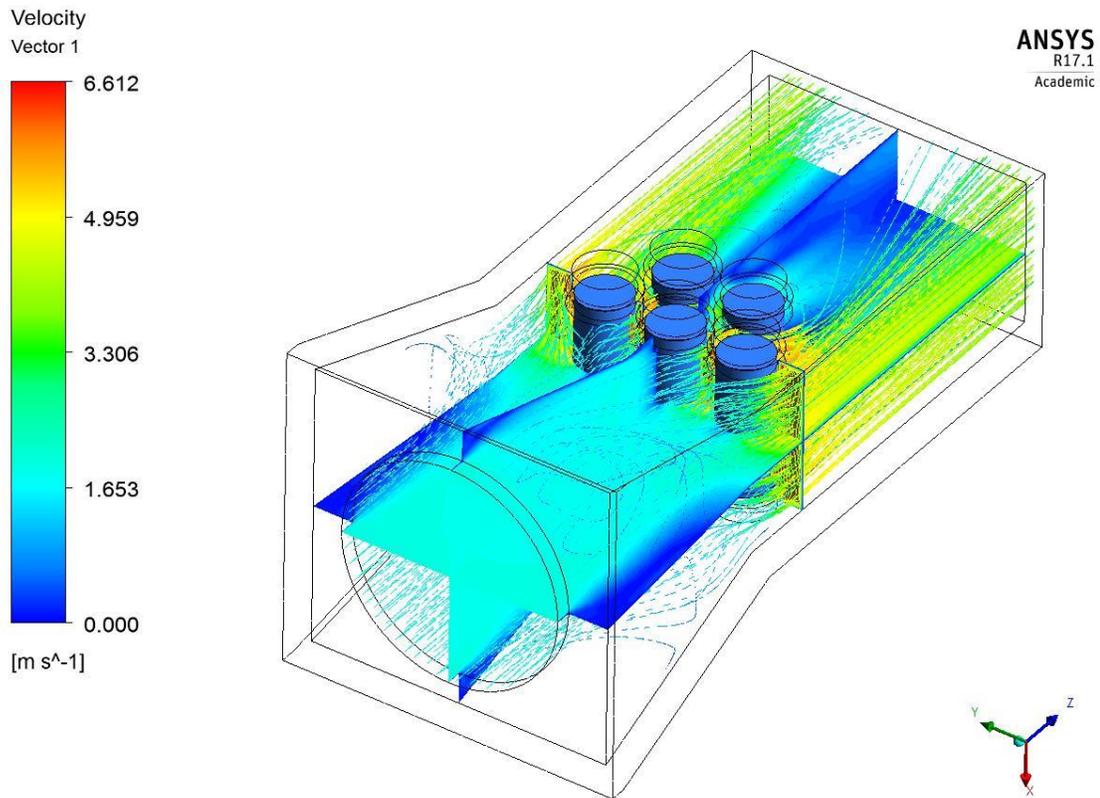


Figura 5-15 : Velocidad del aire – Isométrico Grafica por Vectores y Contornos

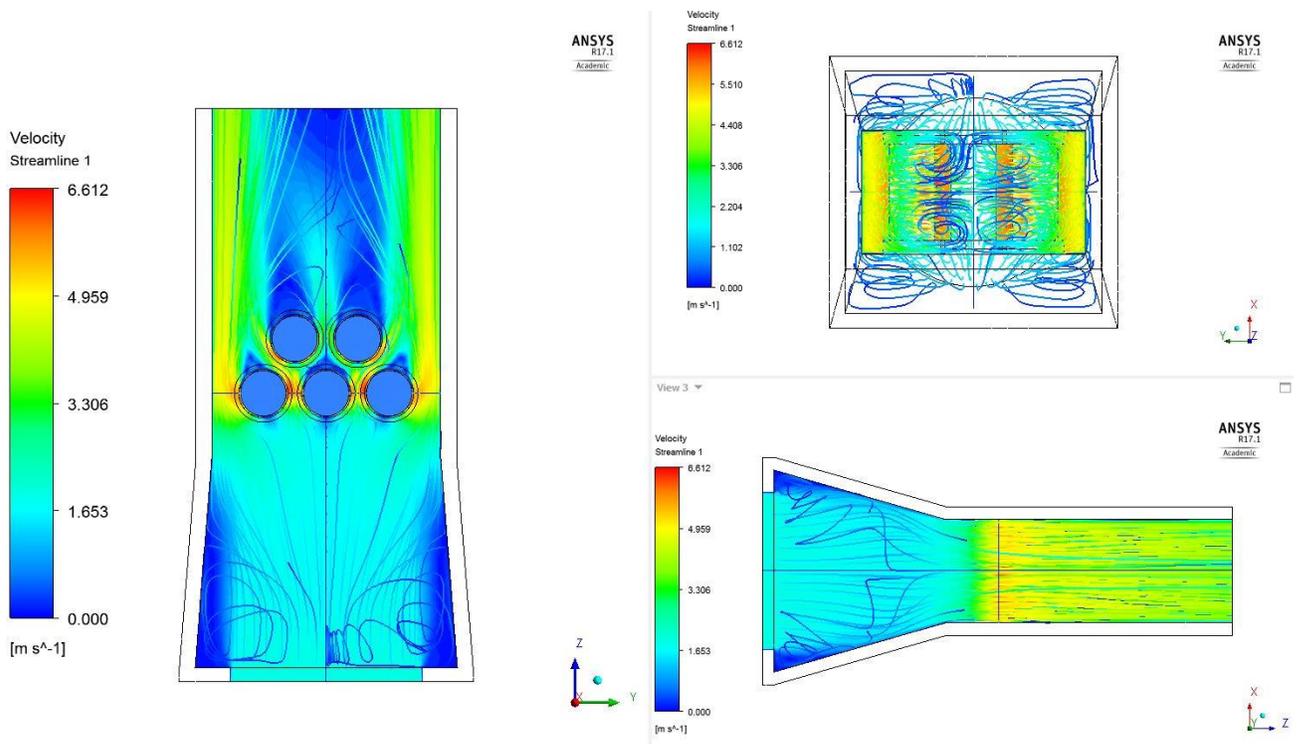


Figura 5-16 : Velocidad del aire – Líneas de Flujo y Vistas de Contorno

5.4 Resultados térmicos

A continuación se muestra el campo de temperatura para una secuencia de cuatro tiempos durante el enfriamiento para el caso base con carcasa de madera estudiada:

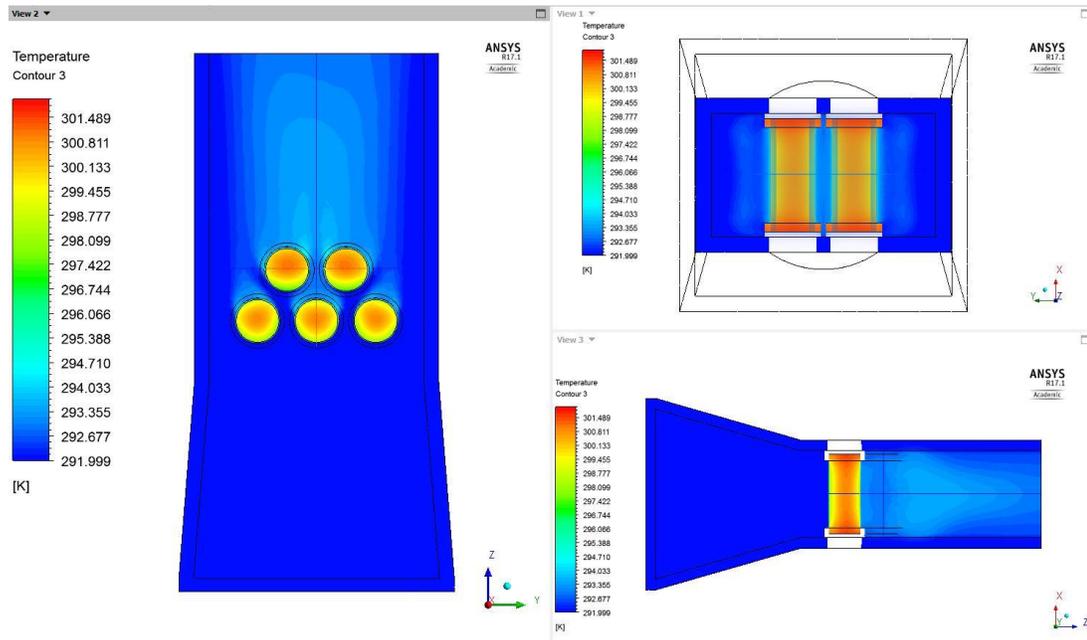


Figura 5-17 : Temperaturas Empaquetamiento - Vistas de Contorno – 80 s

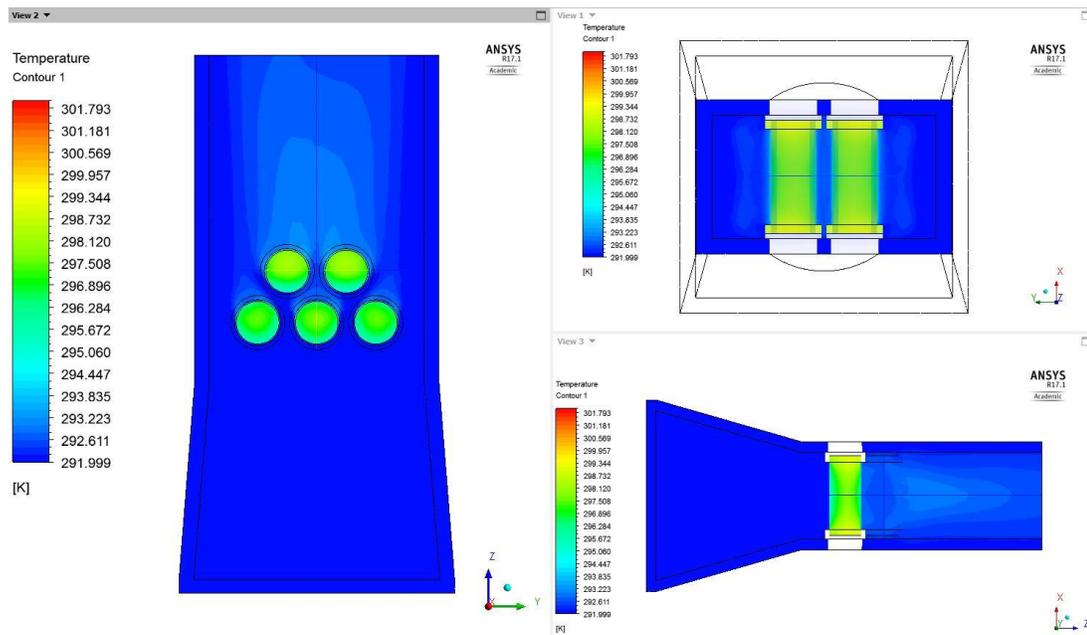


Figura 5-18 : Temperaturas Empaquetamiento - Vistas de Contorno – 240 s

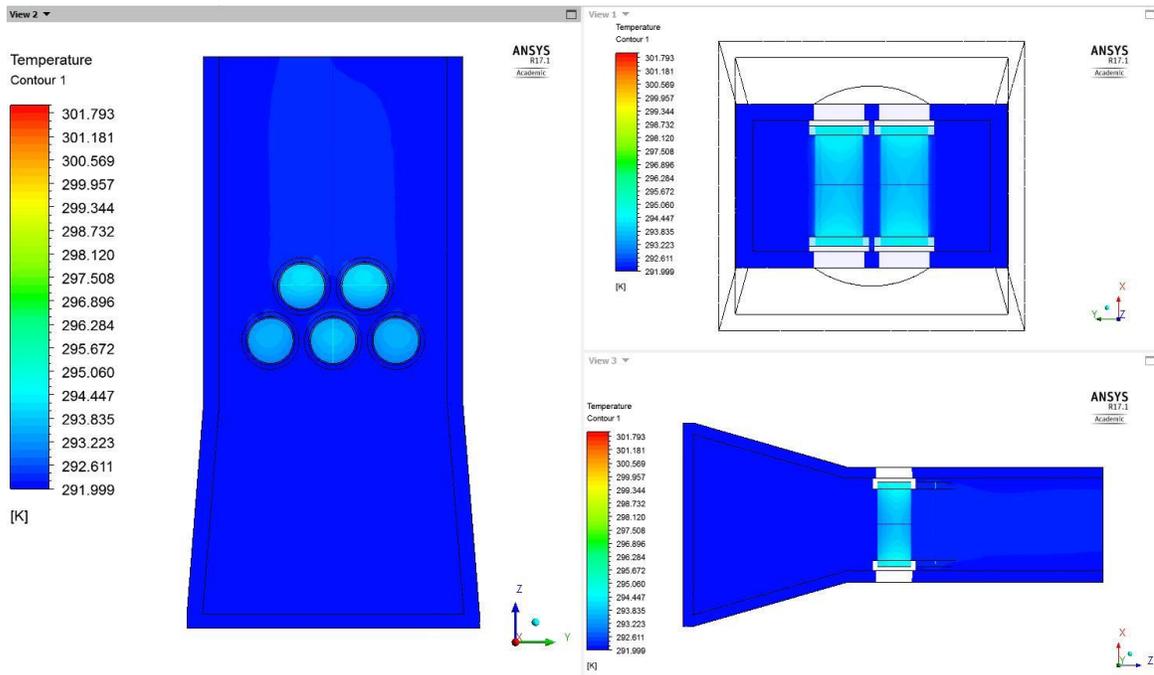


Figura 5-19: Temperaturas Empaquetamiento - Vistas de Contorno – 700 s

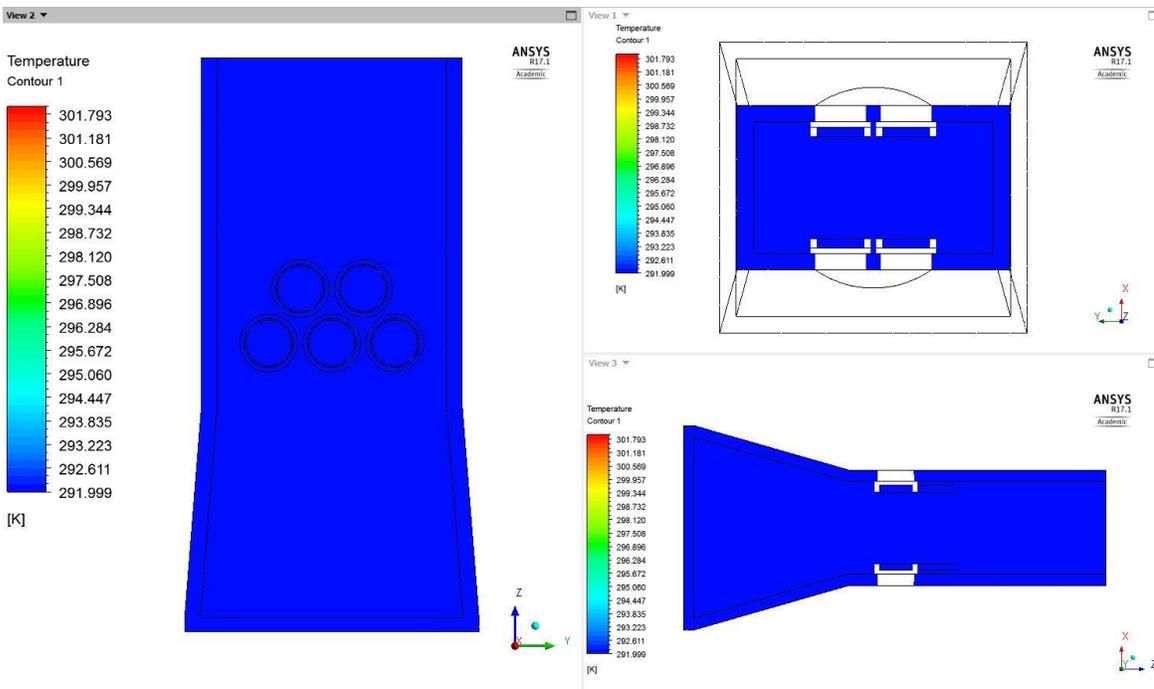


Figura 5-20 : Temperaturas Empaquetamiento - Vistas de Contorno – 2500 s

Se aprecia que las celdas disminuyen progresivamente su temperatura desde 302 [K] hasta llegar al equilibrio en 292 [K] junto a la carcasa y el aire, al cabo de 2500 [s], consistente con lo esperado del el montaje experimental utilizado como base. La Figura 5-21 muestra el comportamiento exponencial para el enfriamiento mostrado en las imágenes anteriores.

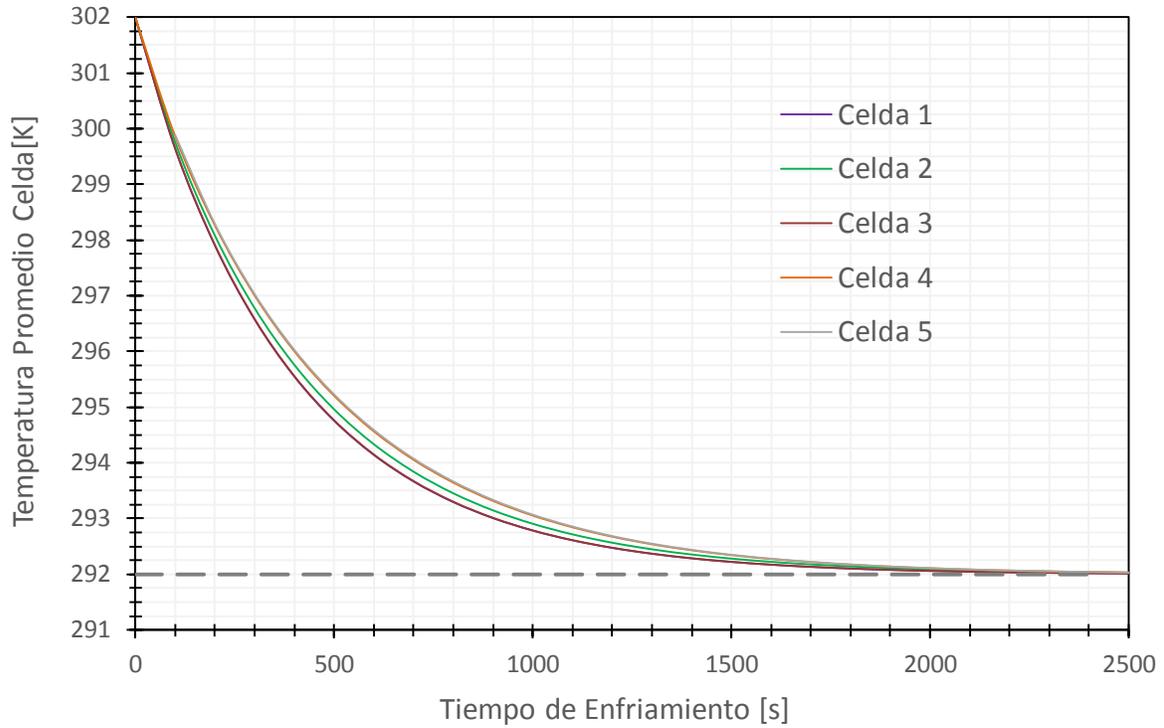


Figura 5-21 : Decaimiento térmico de cada batería baterías – Módulo con Carcasa de Madera

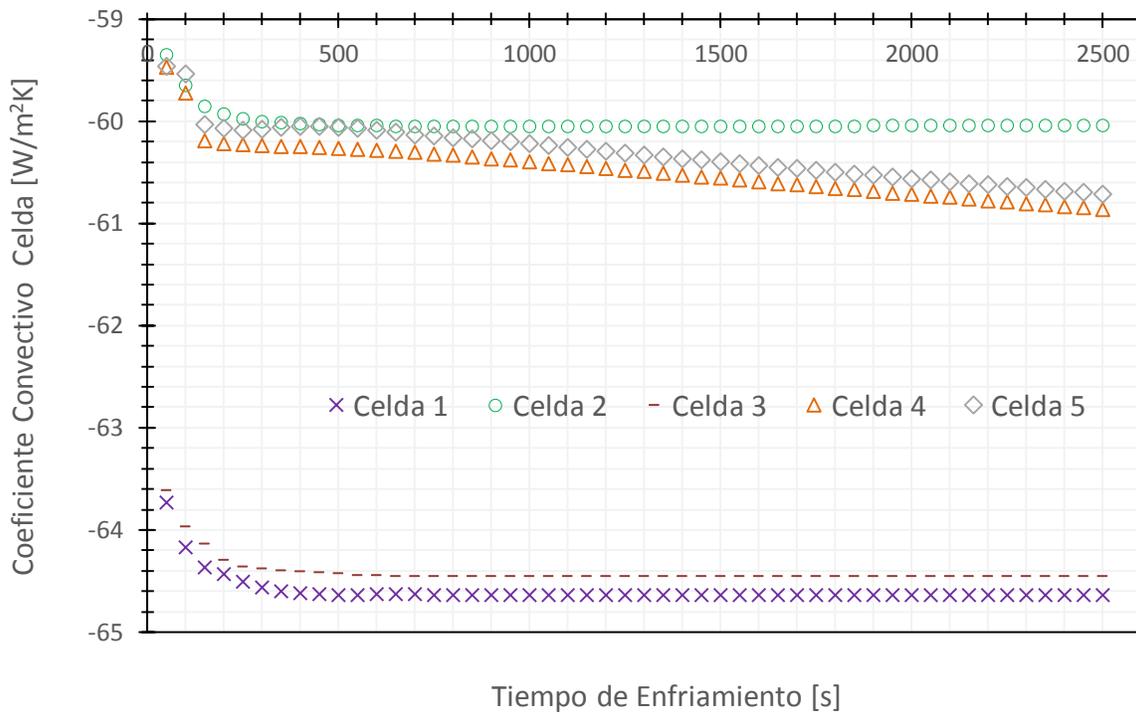


Figura 5-22 : Coeficiente convectivo promedio en la interface batería-aire para cada celda

En la Figura 5-21, se puede ver que las celdas 4 y 5, más alejadas de la entrada de aire tienen un decaimiento menos pronunciado, lo que se traduce en un tiempo de enfriamiento mayor que las celdas 1, 2 y 3, más cercanas a la entrada de aire. Esto es un resultado esperado, debido a que las celdas del frente provocan separación de flujo y por tanto recirculaciones o vórtices que transfieren calor a las celdas posteriores, provocando que estas últimas demoren un poco menos en enfriarse.

A su vez las celdas 1 y 3, más cercanas a los costados, tienen más superficie de contacto con el aire frío por lo que ellas se enfrían algo más rápido que la celda 2. Esto puede verificarse al ver el coeficiente convectivo en la interface celda-aire, mostrado en la Figura 5-22.

Cabe mencionar que el coeficiente convectivo es negativo, pues se obtiene desde la superficie de la batería y dado que ANSYS ocupa la ecuación de Newton para calcular h , lo que expresa dicho gráfico es que la batería pierde calor. Se puede apreciar que las celdas 1 y 3 tienen los coeficientes de transferencia más grandes gracias a su mayor superficie de contacto y mejor respuesta de enfriamiento.

Otra variable de ayuda es la curva de transferencia de calor por unidad de área en la superficie de cada batería, la cual se muestra en la Figura 5-23. En ella se puede ver que las celdas entregan aproximadamente 500 [W/m²], hasta llegar a una transferencia igual a cero debido a que la celda alcanza la temperatura del aire. Nuevamente las baterías 1 y 3 presentan una mayor transferencia de calor y consecuentemente un enfriamiento más rápido.

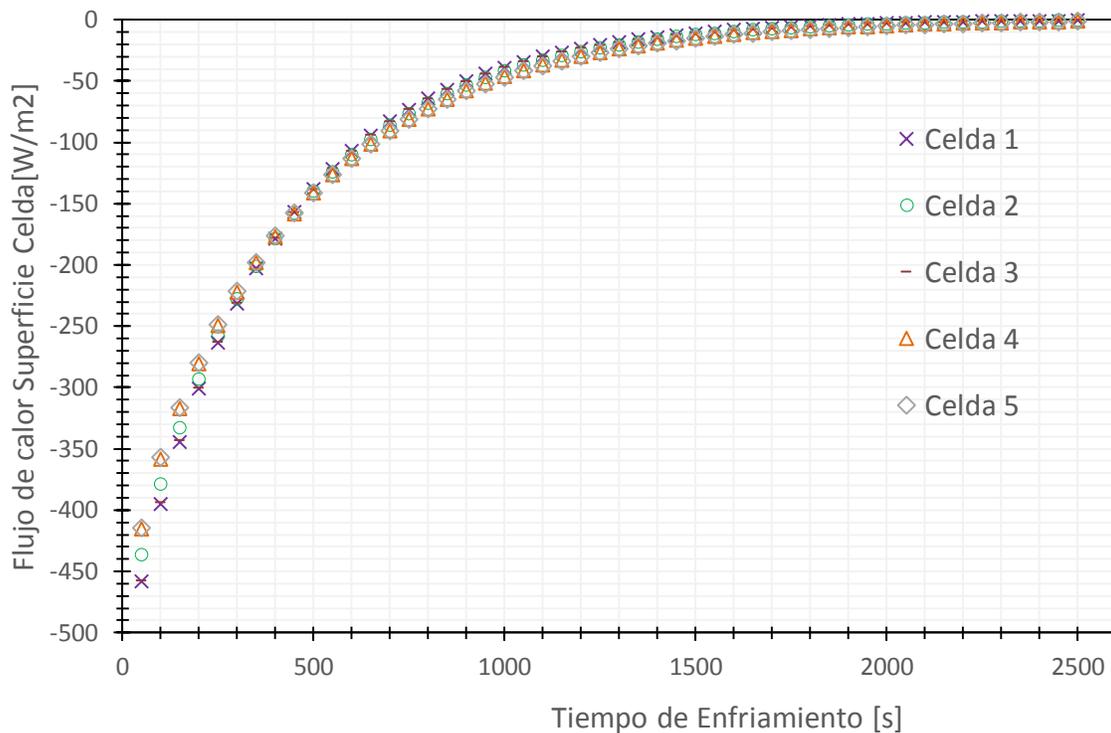


Figura 5-23 : Flujo promedio de Calor cedido por unidad de área en la interface celda aire

En el Anexo C se pueden encontrar tablas con los valores para los parámetros graficados en esta sección.

Capítulo 6

6 Estudio de Materiales para la carcasa

Se puede verificar del capítulo anterior que el modelo representa adecuadamente al montaje experimental utilizado de base, desde su resultado fluidodinámico hasta la respuesta térmica mostrada. Es posible por tanto realizar modificaciones conforme al estudio térmico, para lo cual se parte con un estudio de materialidad de la carcasa, buscando materiales de buena conductividad térmica y baja conductividad eléctrica, cuyo efecto pueda potencialmente favorecer la disipación de calor al interior del módulo, ayudando a la refrigeración de las celdas

No son alcances para este trabajo realizar variaciones de la velocidad del aire, ni de la distancia de separación entre las celdas, por tanto estas son variables consideradas como constantes para un arreglo escalonado, con el fin de solo estudiar el efecto de variaciones en parámetros de la carcasa.

6.1 Selección de materiales

Como criterio de búsqueda se busca la existencia de un aislante térmico y tres nuevos materiales que sean buenos conductores térmicos pero al mismo tiempo funcionen como aislantes eléctricos. Estos materiales, más la madera, conforman un total de 5 materiales de carcasa a comparar. Para ello, se hace uso del software de selección de materiales CES Edupak que permite combinar parámetros de búsqueda en forma estratégica, conforme a las propiedades deseadas de los materiales a seleccionar.

De la búsqueda se descubre que el Nitruro de aluminio y la Alúmina aparecen como aislantes eléctricos con buena conductividad térmica, cercana a la del Aluminio. Estos materiales son elegidos por su posición estratégica en el diagrama, pero además por sus aplicaciones electrónicas, verificadas en las hojas de datos que entrega el programa (Ver Anexo D).

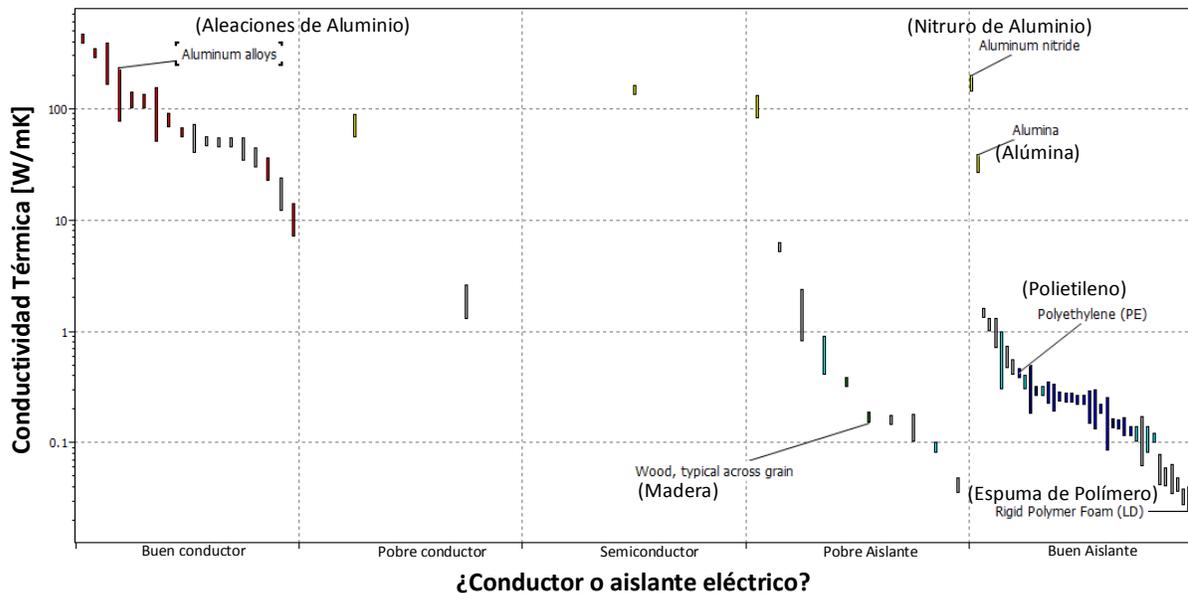


Figura 6-1 : Comparación conductividad térmica y eléctrica [Fuente: CES Edupack]

Se aprecia también la madera dentro del gráfico de comparación y el aislante eléctrico seleccionado es una Espuma rígida de Polímero. Para el tercer material de carcasa se selecciona el Polietileno que si bien es de baja conductividad térmica, existen estudios recientes que demuestran que puede ser utilizado como un conductor térmico, si éste es fabricado mediante fibras de alta resistencia [20][21]. Con éste método el polietileno mantiene las propiedades de un polietileno normal como densidad, calor específico y aislación eléctrica, pero puede llegar a conductividades térmicas de hasta 101 [W/mK][20].

A continuación se presenta una tabla resumen con las propiedades de los materiales seleccionados, que frecuentemente serán identificados por su código, también incluido en la tabla, para reducir el texto en la leyenda de algunos gráficos.

Tabla 6-1: Resumen Propiedades Materiales Seleccionados

Nombre Material	Código	Conductividad Térmica [W/mK]	Calor Específico Cp [J/KgK]	Densidad [Kg/m3]
Madera	M1	Rango: 0,15-0,17 Seleccionada: <u>0,173</u>	Rango: 1660-1710 Seleccionada: <u>1710</u>	Rango: 660-800 Seleccionada: <u>700</u>
Nitruro Aluminio	M2	Rango: 140-200 Seleccionada: <u>200</u>	Rango: 780-820 Seleccionada: <u>820</u>	Rango: 3260-3330 Seleccionada: <u>3260</u>
Espuma Rígida Polímero	M3	Rango: 0,023-0,04 Seleccionada: <u>0,03</u>	Rango: 1120-1910 Seleccionada: <u>1500</u>	Rango: 36-70 Seleccionada: <u>50</u>
Polietileno de Alta Resistencia	M4	Rango: 16,4-104 Seleccionada: <u>60</u>	Seleccionada: <u>1800</u>	Seleccionada: <u>980</u>
Alúmina	M5	Rango: 26-38,5 Seleccionada: <u>26</u>	Rango: 790-820 Seleccionada: <u>820</u>	Rango: 3800-3980 Seleccionada: <u>385</u>

Una vez que se han seleccionado y se han identificado los distintos materiales se procede a realizar el estudio comparativo entre los distintos materiales de carcasa y el efecto que estos pueden generar cuando el módulo se mantiene bajo las mismas temperaturas de operación del caso base con madera, solo modificando el material de carcasa.

6.2 Estudio comparativo

Se comparan los coeficientes convectivo y transferencias de calor superficiales entre el aire y el pack, ocupando los distintos materiales de carcasa seleccionados, para verificar que el modelo muestra diferencias provocadas por la conductividad térmica del material.

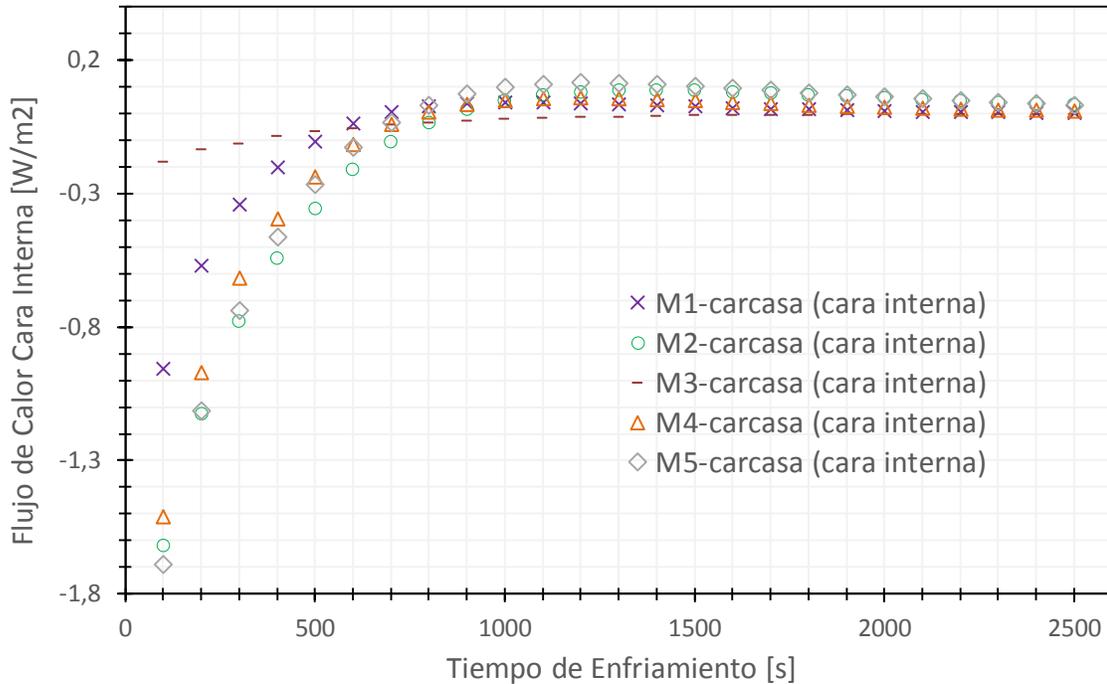


Figura 6-2 : Calor superficial promedio cedido al aire en la cara interna de la carcasa

Si se observa la Figura 6-2, se puede apreciar que si bien el aire que se calienta con la baterías, cede calor a la carcasa, el valor máximo de calor cedido, correspondiente a los tres conductores (M2, M4 y M5), no supera los 2 [W/m²], el cual es un valor bajo debido probablemente a la poca diferencia de temperatura entre el aire y la carcasa, pues el aire que se calienta sale y se renueva rápidamente.

La Figura 6-3 muestra que los coeficientes convectivos, tienen valores negativos al principio pues el aire entrega calor la carcasa, pero positivos al final, pues el aire recibe calor de vuelta. Esto se potencia en los materiales más conductores, ya que, dada su naturaleza de conductor, reparten el calor hacia otros sectores del pack y calientan sectores de aire más frío, lejano a las baterías.

La Figura 6-4 y la Figura 6-5 muestran el flujo de calor y el coeficiente convectivo para la superficie externa de la carcasa. Es posible apreciar que existe una transferencia casi nula de calor al exterior producto de que se trata de convección natural y además se puede verificar que el programa mida un coeficiente convectivo constante igual a 15 [W/m²K], consistente con el valor configurado como condición de borde durante la configuración del modelo.

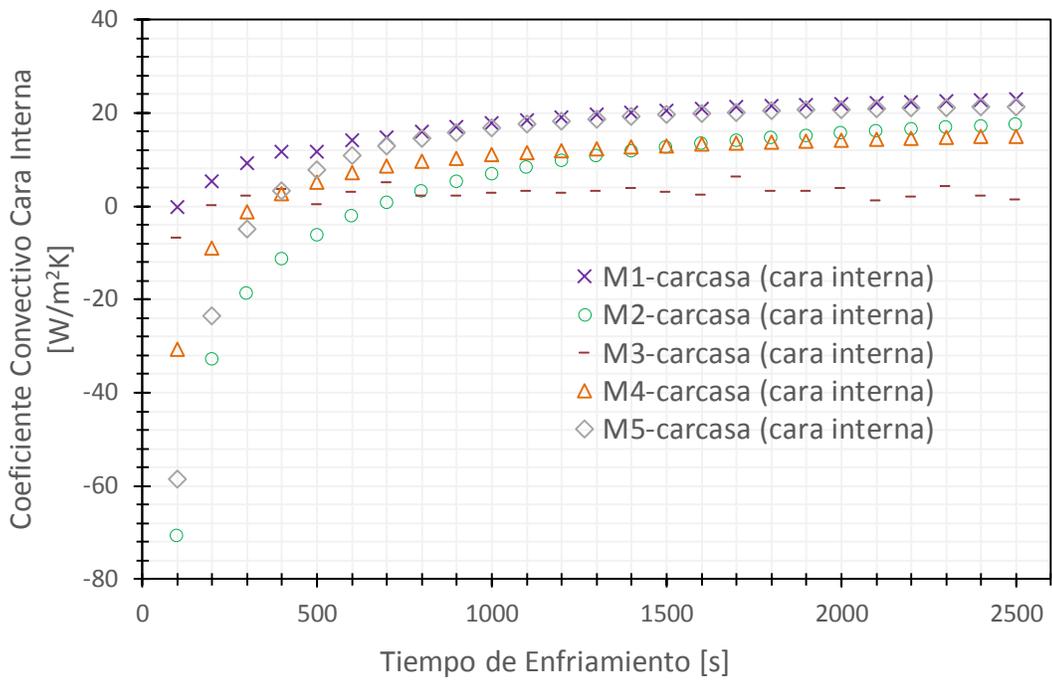


Figura 6-3 : Coeficiente convectivo promedio en la cara interna de la carcasa

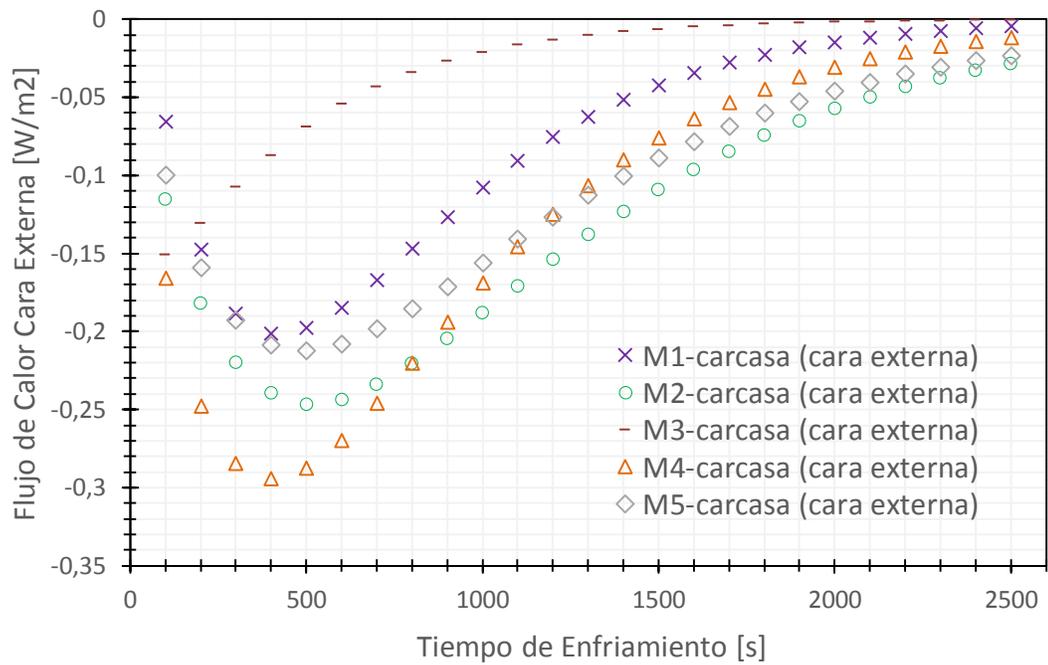


Figura 6-4 : Calor superficial promedio cedido al aire en la cara externa de la carcasa

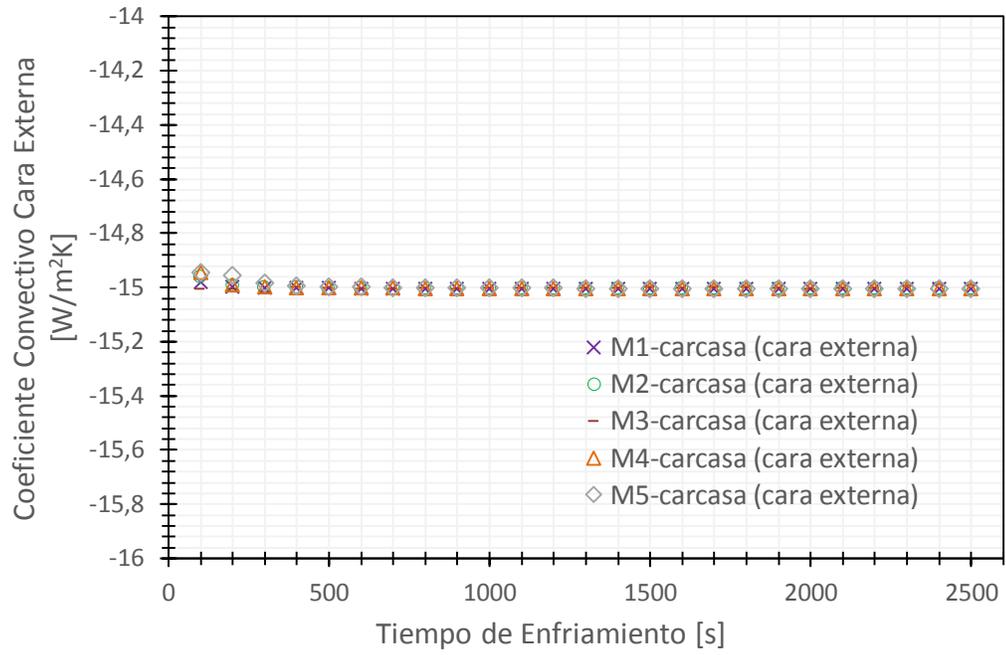


Figura 6-5 : Coeficiente de convección por unidad de superficie externa de la carcasa

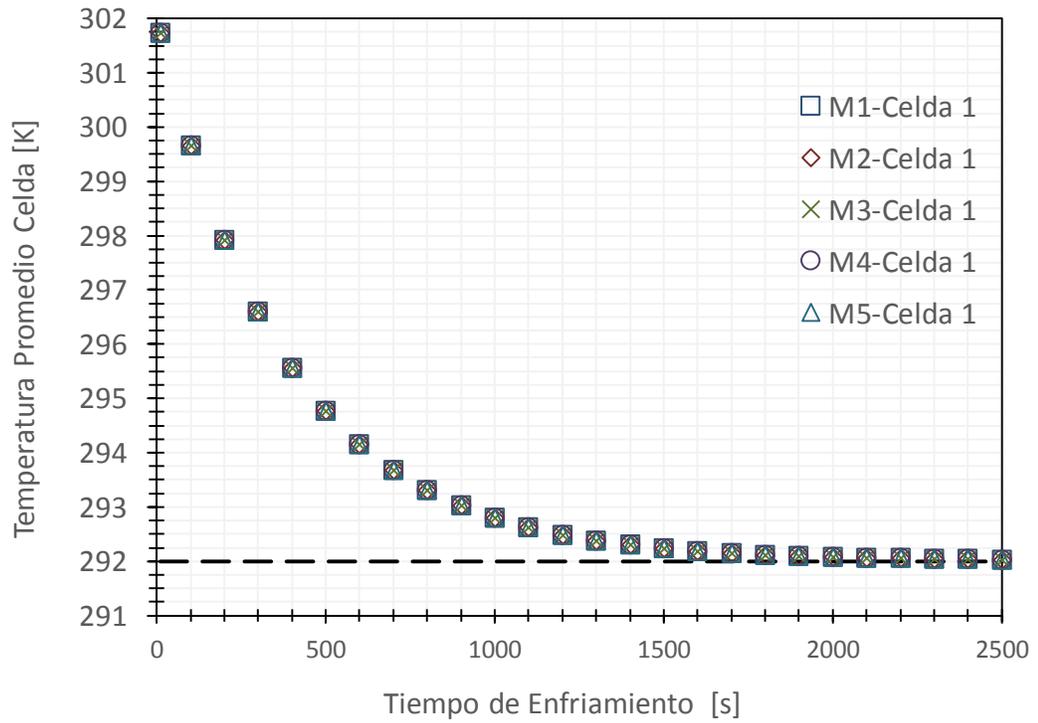


Figura 6-6 : Comparación decaimiento para Celda 1 con cinco materiales

Efectivamente el modelo identifica diferencias en la interface aire-carcasa, al utilizar distintos materiales, pero como la diferencia de temperatura entre la carcasa y el aire es casi nula, los efectos de transferencia también los son por lo que las celdas no sufren cambios en su decaimiento, al utilizar distintos materiales de carcasa. Esto se puede ver en los gráficos de la Figura 6-6 y la Figura 6-7 y dado que la diferencia es nula, se presenta en el Anexo C una tabla con los valores de temperatura, para que se pueda verificar que efectivamente el gráfico corresponde a distintas celdas y el error entre ellas es solo numérico.

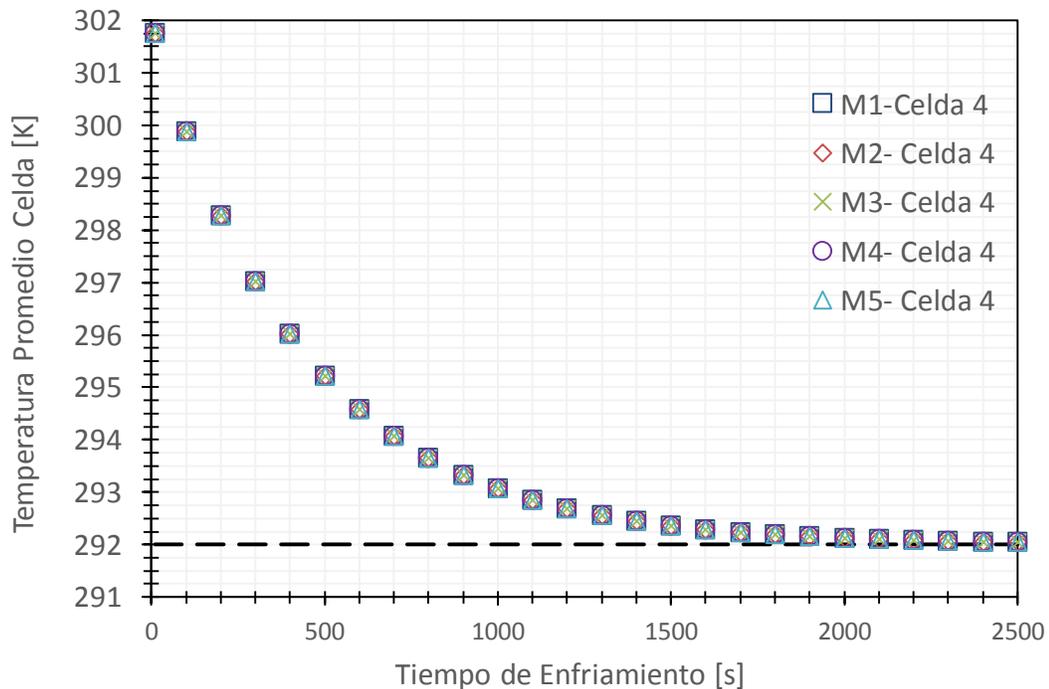


Figura 6-7 : Comparación decaimiento para Celda 4 con cinco materiales

Solo se muestra el decaimiento para la celda 1 y 4, debido a que no entrega información adicional presentar las demás celdas, dado los resultados obtenidos.

Se tiene entonces que la materialidad de la carcasa para estas condiciones de temperatura, no genera efecto alguno sobre el enfriamiento de las celdas. Por ello es necesario realizar un estudio térmico en donde se varíe la temperatura de la carcasa de manera de estudiar los efectos cuando el pack tiene una temperatura considerablemente distinta al aire,

Algunos de los materiales de carcasa utilizados en el estudio, son poliméricos por lo que sería posible inducir un sistema de refrigeración interno que mantenga la carcasa a una temperatura más baja, por lo que una opción es simular dicha situación y en particular se estudia una condición de refrigeración de la carcasa a 275 [K].

Capítulo 7

7 Estudio de Temperaturas para la carcasa

Como se pudo ver anteriormente, no existen efectos de la materialidad de la carcasa cuando ésta se encuentra en condiciones de temperatura ambiente. Por ello en este capítulo se presenta un estudio de temperaturas para la carcasa, en donde se supone que ésta es sometida a refrigeración. Con ello se pretende estudiar el efecto de la materialidad de la carcasa cuando su temperatura difiera de la temperatura ambiente.

La primera condición es estudiar el modelo, cuando la temperatura de la carcasa se mantiene constante a 275 [K] y en segundo lugar se estudia cuando la carcasa parte a una temperatura inicial de 275 [K] y llega al equilibrio de temperatura en el tiempo con los demás componentes del sistema. Se seleccionan 3 materiales de los descritos en este informe, procurando comparar el material más aislante (Polímero) con el material más conductor (Nitruro de Aluminio), además de incluir a la madera, por ser el material de la carcasa inicial estudiada.

7.1 Análisis por temperatura constante a 275 [K]

En la Figura 7-1 se aprecia el decaimiento térmico la celda 1, con los tres materiales indicados previamente, para una carcasa a una temperatura constante de 275 [K]. Asimismo la Figura 7-2 y la Figura 7-3 muestran el mismo resultado para la celda 2 y la celda 4.

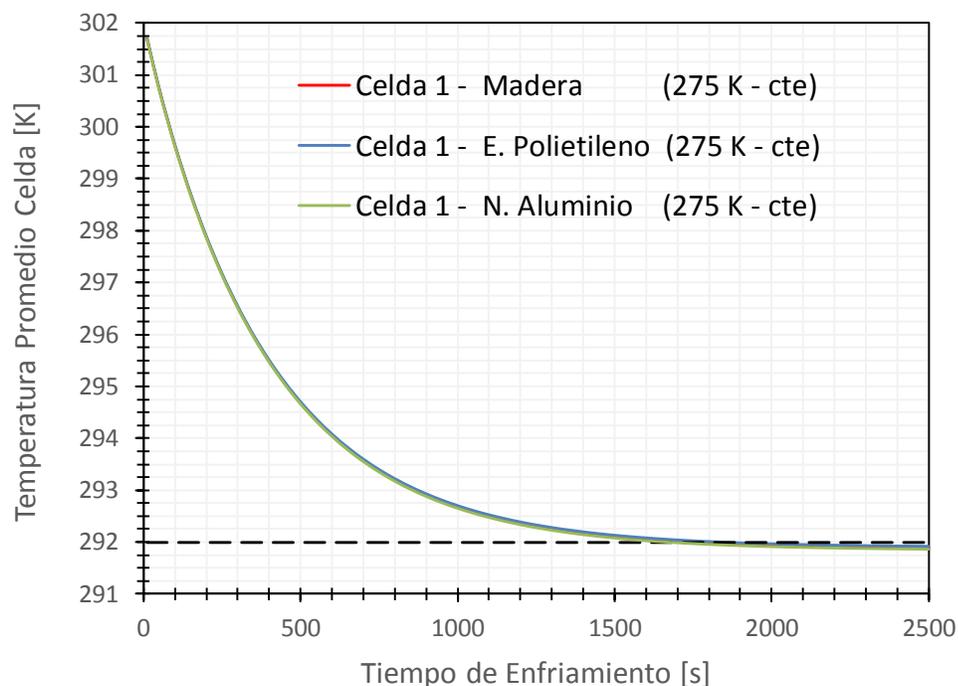


Figura 7-1 : Decaimiento térmico de celda 1 usando carcasas de distinto material

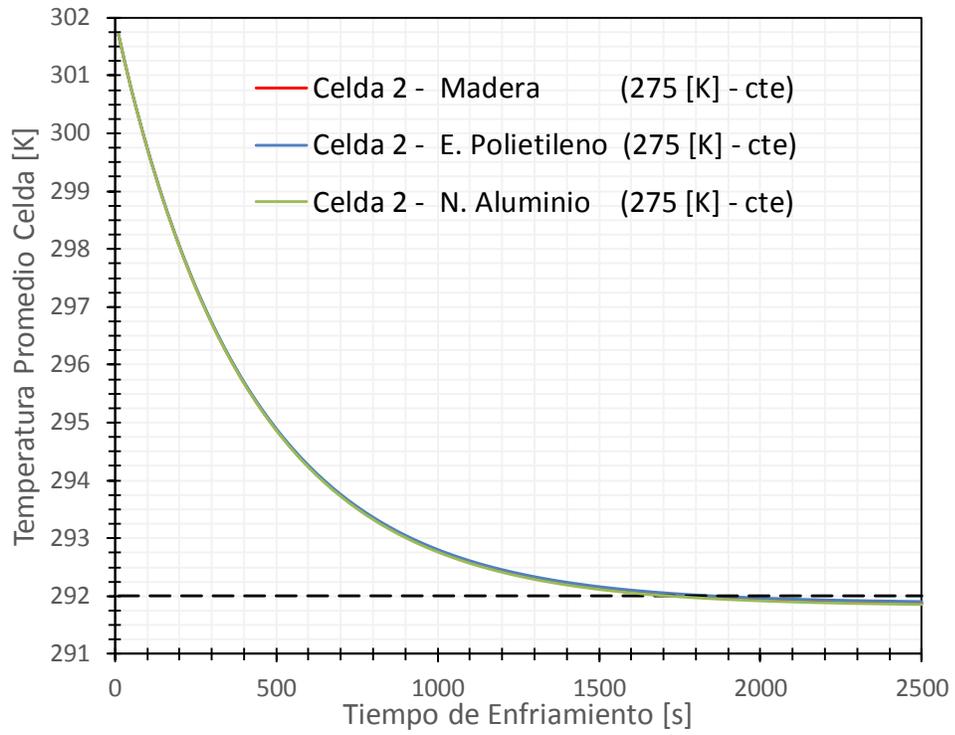


Figura 7-2 : Decaimiento térmico de celda 2 usando carcasas de distinto material

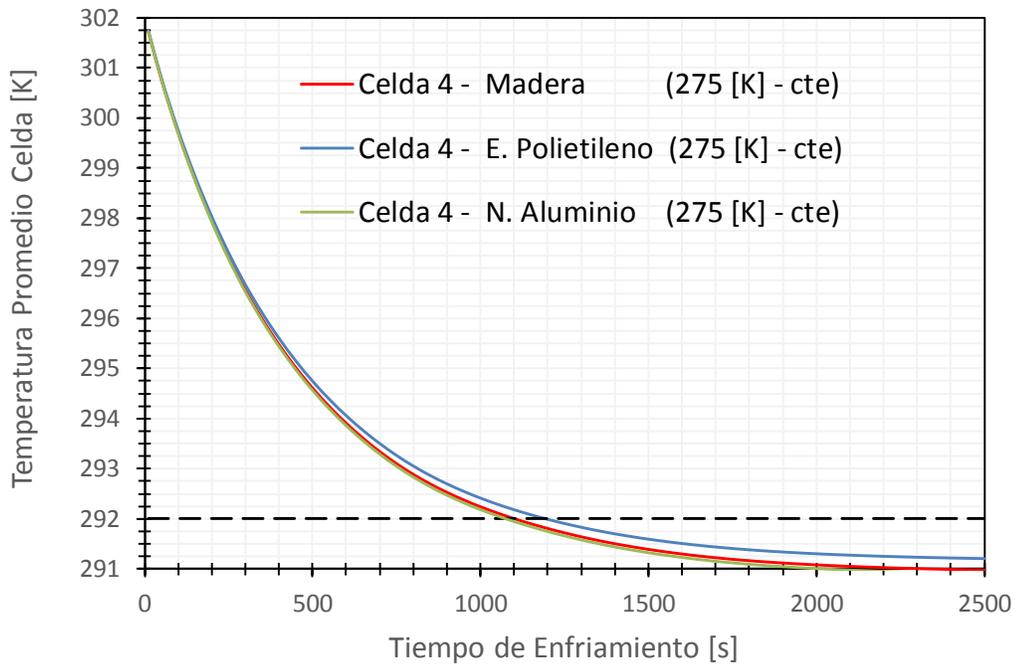


Figura 7-3 : Decaimiento térmico de celda 4 usando carcasas de distinto material

Se aprecia para cualquier celda que si la carcasa es sometida a una condición de temperatura de 275 [K] constante (invariante en el tiempo), el aire rápidamente es refrigerado logrando los 292 [K] a los 1500 [s] en las celdas 1 y 2, y a los 1100 [s] en la celda 4.

Por otro lado, a los 1900 [s] el módulo en su totalidad ha llegado a un equilibrio térmico de 291 [K], es decir que las celdas fueron refrigeradas con mayor rapidez, en este caso particular 10 minutos antes que el caso base (carcasa a 292 [K]), lo que representa un 40% de reducción de tiempo.

Para las celdas 1 y 2, la materialidad sigue siendo un factor no predominante en el enfriamiento. Sin embargo esto no es así en la celda 4, ya que si bien el efecto es bajo, se aprecia claramente una tendencia en la celda a enfriar más rápido cuanto más alta sea la conductividad térmica del material de la carcasa. Ahora bien, aunque es deducible que el mayor efecto es provocado por el cambio de temperatura y no por los materiales, se debe tener en cuenta en la práctica será más fácil refrigerar un material conductor térmico que uno aislante.

Complementariamente se analiza el coeficiente convectivo de las celdas 1 2 y 3, la Figura 7-4 y la Figura 7-7 indican que entre los 1500 [s] y 2000 [s] existe una inestabilidad de cálculo del coeficiente debido a que es el momento exacto en que las celdas 1 y 2 toman un valor de temperatura igual a la temperatura del ambiente.

Ocurre el mismo efecto en la celda 4, pero a los 1000 [s] en la Figura 7-6, como se debiese esperar. Además la celda 4 es la única que presenta también un coeficiente convectivo distinto según material, lo que es consecuente con el resultado del decaimiento térmico mostrado previamente.

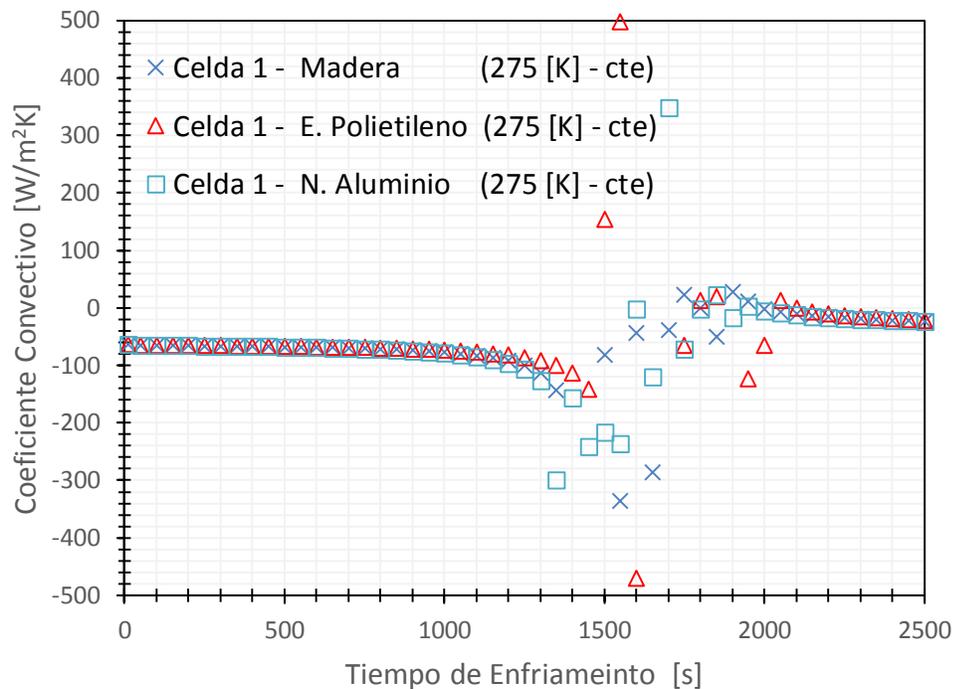


Figura 7-4 : Coeficiente convectivo promedio en interfase celda 1-aire

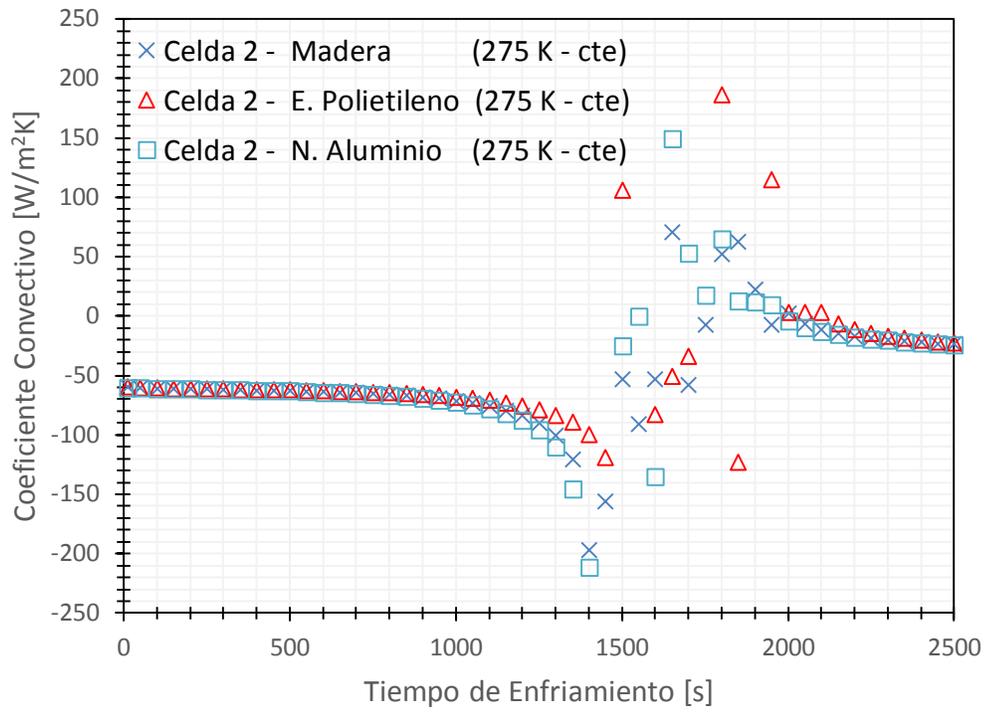


Figura 7-5 : Coeficiente convectivo promedio en interface celda 2-aire

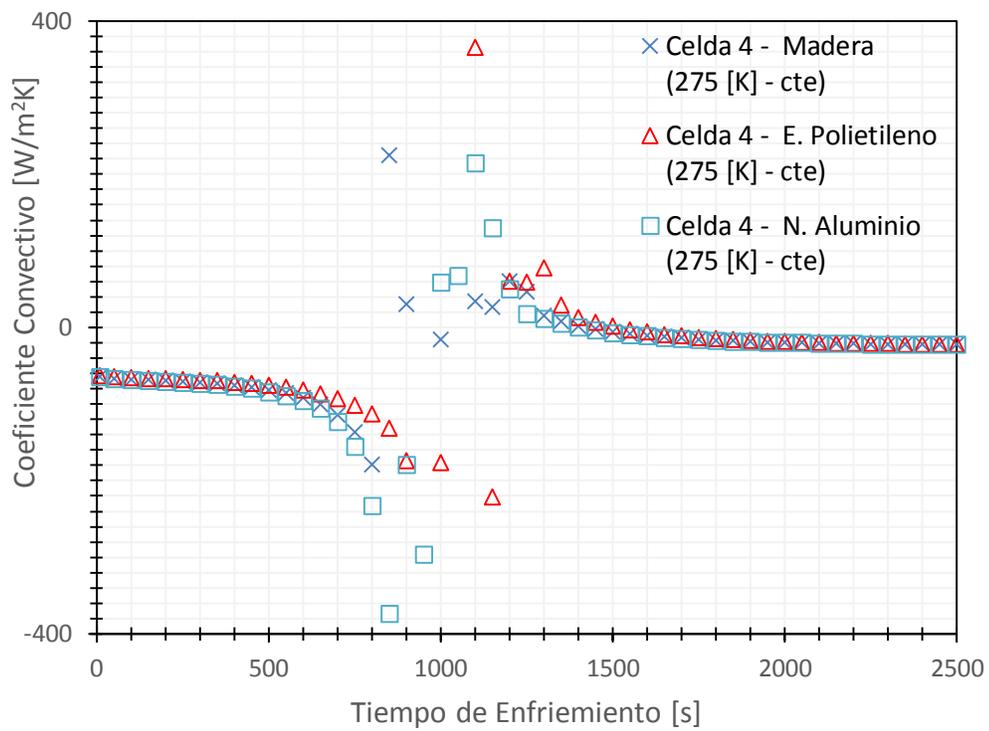


Figura 7-6 : Coeficiente convectivo promedio en interface celda 4-aire

Se puede ver entonces que el efecto térmico de refrigerar la pared a temperatura constante se potencia solo en la celda que 4 (Por lo tanto también en la 5). Esto puede explicarse por el efecto de las recirculaciones de aire producidas por las celdas delanteras 1, 2 y 3. Esas mismas recirculaciones que llevaban aire caliente desde las celdas delanteras hacia las celdas posteriores en el módulo del caso base de madera a 292 [K], ahora logran el efecto contrario y provocan una mejora la refrigeración de las celdas posteriores 4 y 5.

Para complementar el estudio térmico de la carcasa a 275 [K] se muestra una secuencia del campo de temperatura del módulo, para 4 tiempos del enfriamiento.

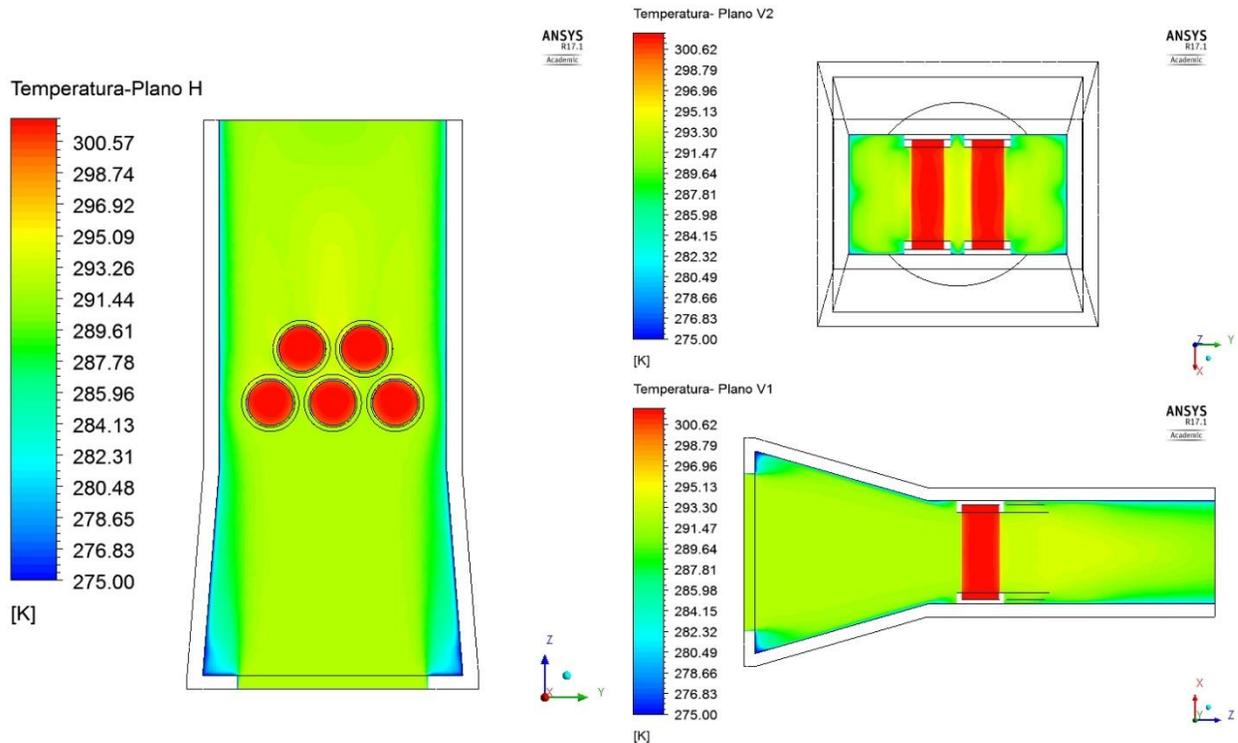


Figura 7-7 : Campo temperaturas - 275 [k] etc. – Tiempos en [s]: 80

La Figura 7-9 muestra el instante de los 80 [s] de enfriamiento, en donde el aire tiene una temperatura menor a la ambiente producto del intercambio de calor con la carcasa refrigerada. Las celdas por su parte se han enfriado hasta aproximadamente 300 [K].

Adicionalmente se aprecia en forma visual que la refrigeración de la carcasa mejora la transferencia de calor haciéndose más visible una capa límite térmica y también se puede ver el aire calentado a través de una estela de calor en la zona posterior de las celdas. Esta estela se hace más estratificada y visible los 300 [s], como se puede apreciar en la Figura 7-8, en la que además se aprecia un aire más caliente en el seno del módulo y más frío en la interface con la carcasa refrigerada.

Una revisión del campo de temperatura a los 800 [s] y a los 1900 [s], ratifica que a los 1000 [s] o 1500 [s], las celdas ya han llegado a la temperatura ambiente deseada. Esto se aprecia en la Figura 7-9 y en la Figura 7-10.

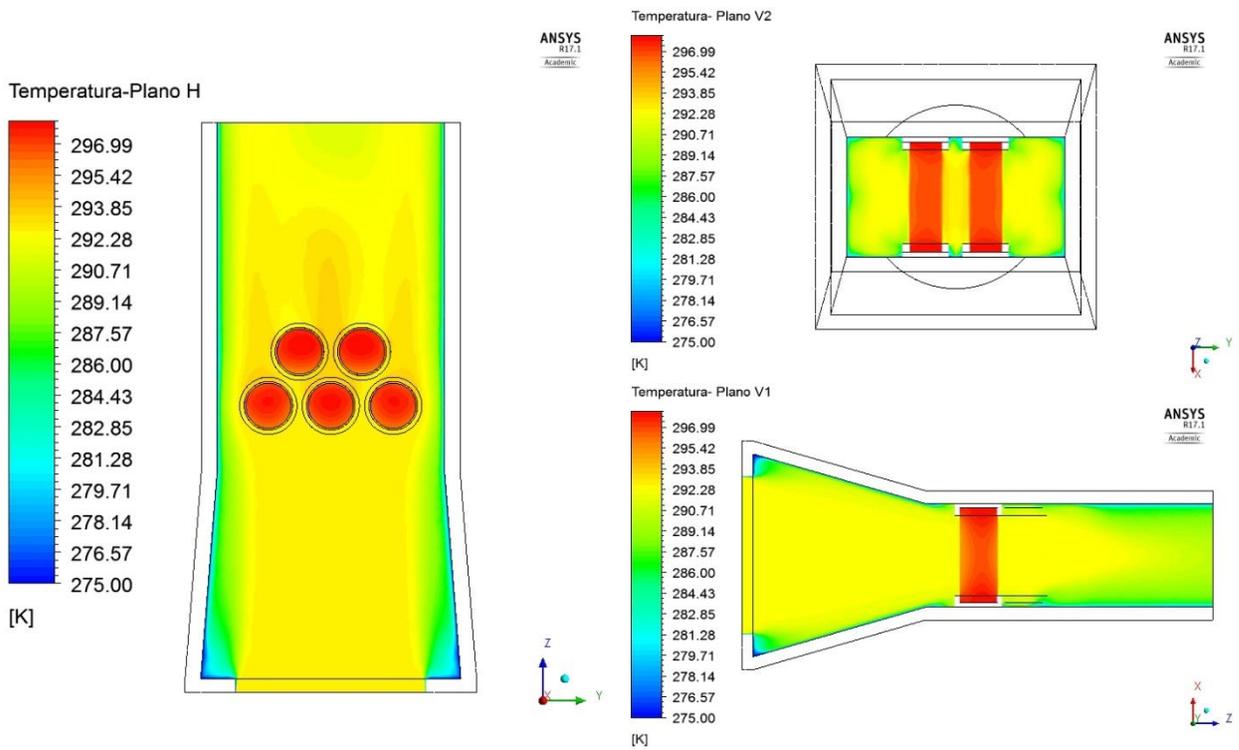


Figura 7-8 : Campo temperaturas - 275 [k] cte. – Tiempos en [s]: 300

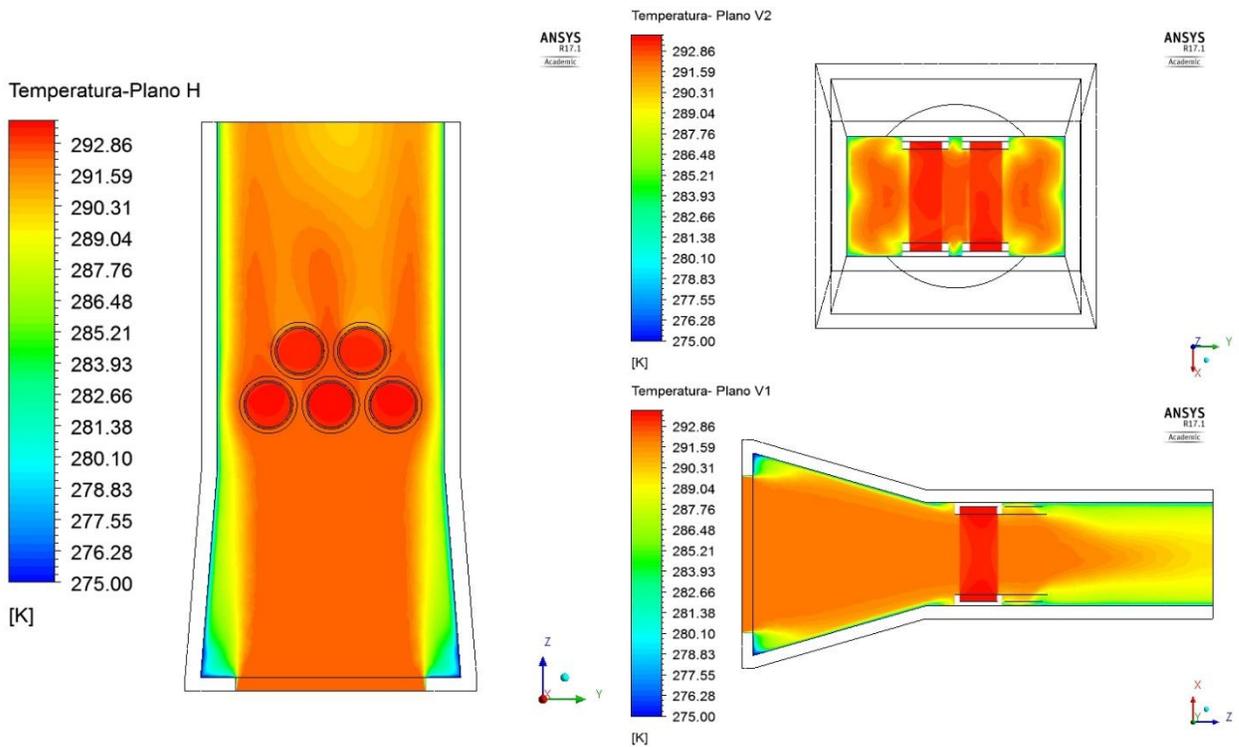


Figura 7-9 : Campo temperaturas - 275 [k] cte. – Tiempos en [s]: 800

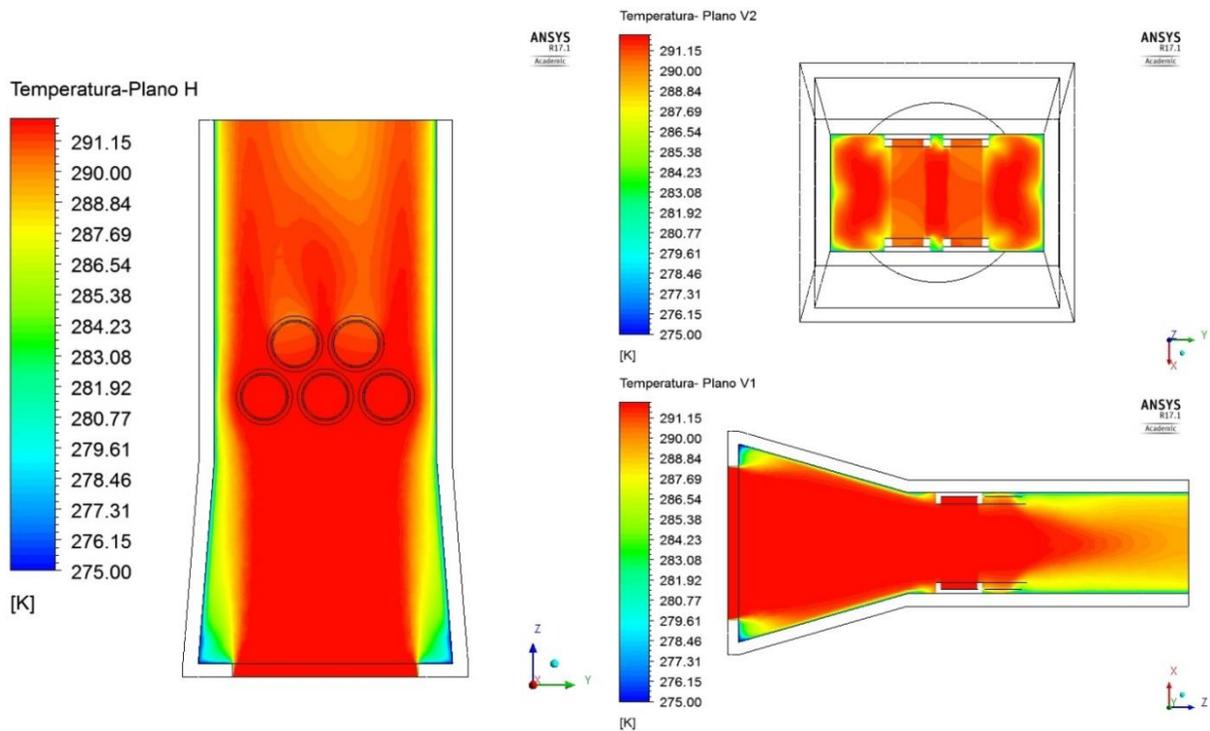


Figura 7-10 : Campo temperaturas - 275 [k] cte. – Tiempos en [s]: 1900

7.2 Análisis por temperatura inicial a 275 [K]

El segundo caso es hacer un análisis similar al que se acaba de describir, pero sin mantener la temperatura de la carcasa constante a 275 [K], sino más bien refrigerándola solo como condición inicial, dejándola llegar al equilibrio con el sistema. En la Figura 7-11 se presenta el decaimiento térmico la celda 1, con los tres materiales indicados previamente, para el estudio térmico de carcasa a una temperatura inicial de 275 [K]. Asimismo la Figura 7-13 y Figura 7-12 muestran el mismo resultado para la celda 2 y la celda 4.

Se aprecia para cualquier celda que si la carcasa es sometida a una condición de temperatura de 275 [K] inicial las celda nuevamente alcanzan los 292 [K], antes que el tiempo de enfriamiento para el caso base de madera a temperatura ambiente.

En particular la celda 1 y celda 4 alcanzan los 292 [K] antes de los 2000 [s], lo que se traduce en una reducción del tiempo de enfriamiento del 20 %. La celda 2 al tener menor superficie de contacto con el aire y encontrarse en la zona central del módulo, no se ve favorecida por la refrigeración de la carcasa.

En cuando a la materialidad, las celda 1 y 4 que se enfrían más rápido presentan una diferencia, ya que solo la celda 4 denota una relación directamente proporcional entre la conductividad térmica del material de la carcasa y la reducción del tiempo de enfriamiento. Tal como en el caso anterior, el Nitrato de Aluminio es el que provoca el enfriamiento más eficaz sobre la celda.

Si bien el efecto de materialidad no es predominante, el hecho de que exista, puede significar un mejoramiento en el ciclo de vida después de varios ciclos de carga y descarga.

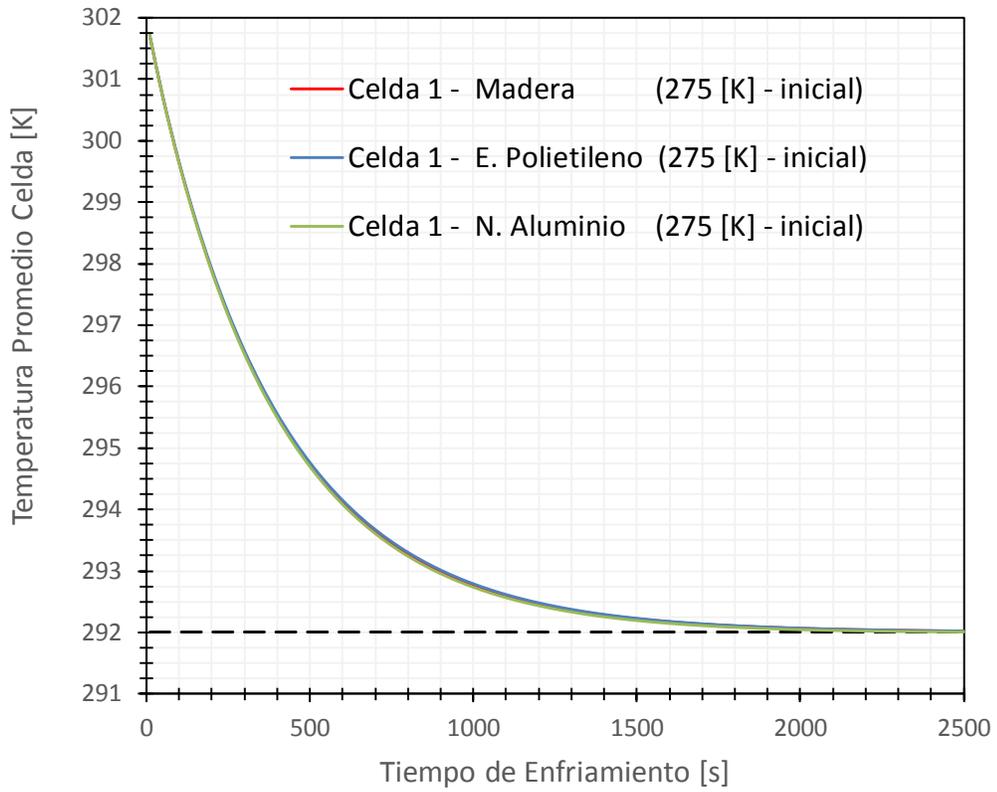


Figura 7-11 : Decaimiento térmico de celda 1 usando carcasas de distinto material

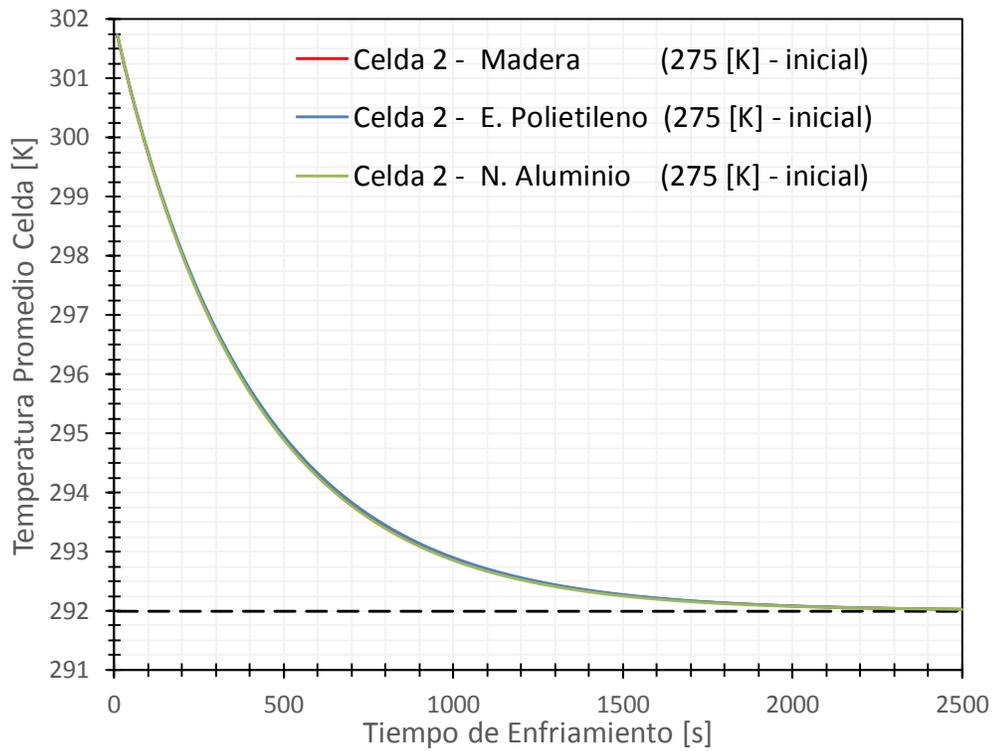


Figura 7-12 : Decaimiento térmico de celda 2 usando carcasas de distinto material

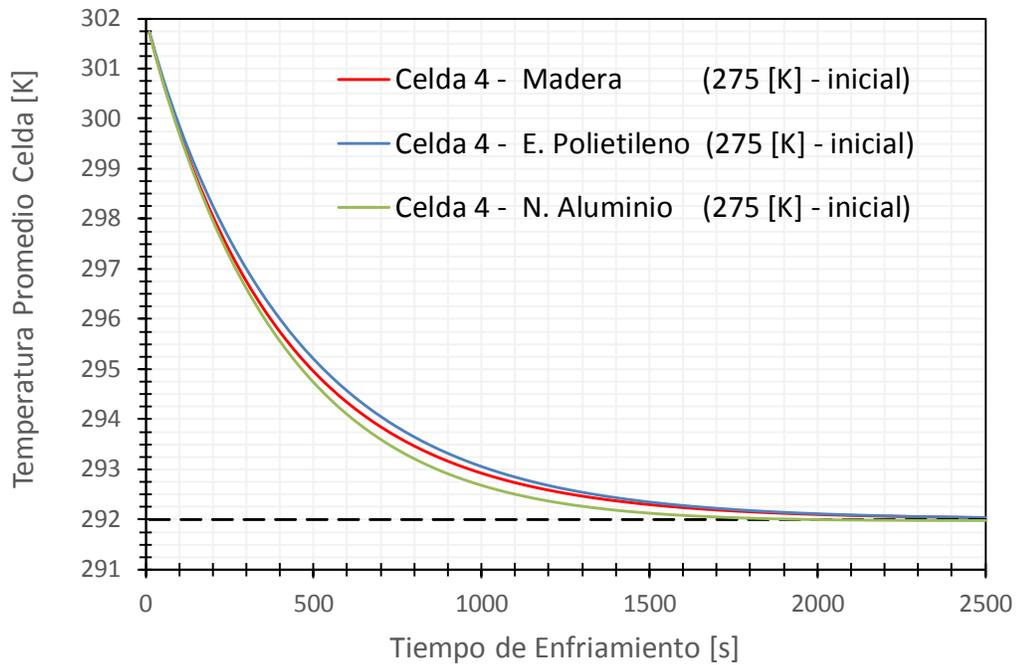


Figura 7-13 : Decaimiento térmico de celda 4 usando carcasas de distinto material

Complementariamente se analiza el coeficiente convectivo de las celdas 1 2 y 3, la Figura 7-14 y la Figura 7-15 muestran que el coeficiente de la celda para una carcasa de Nitruro de Aluminio, crece repentinamente en la celda 1 y 2. Esto se puede explicar por la temperatura de referencia ocupada en ANSYS para calcular el coeficiente convectivo.

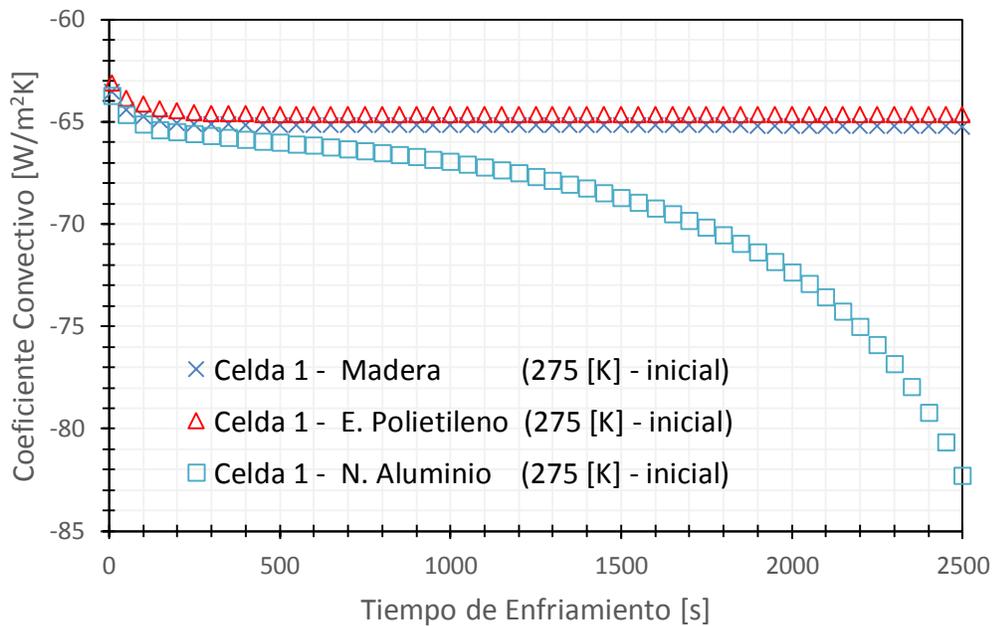


Figura 7-14 : Coeficiente convectivo promedio en interface celda 1-aire

La temperatura de referencia es de 292 [K], pero la temperatura de la carcasa es menor a 292 [K], por tanto ocurre que al usar Nitruro de Aluminio en la carcasa, la temperatura de equilibrio final de la celda no es asintótica sino más bien pasa por sobre los 292 [K] provocando el aumento repentino por la naturaleza de la fórmula de Newton, utilizada por ANSYS. Ahora bien este aumento repentino se produce en la celda 4 antes que en las celdas 1 y 2, como se ve en la Figura 7-16, lo que es consistente con los gráficos de temperatura de decaimiento, mostrados previamente.

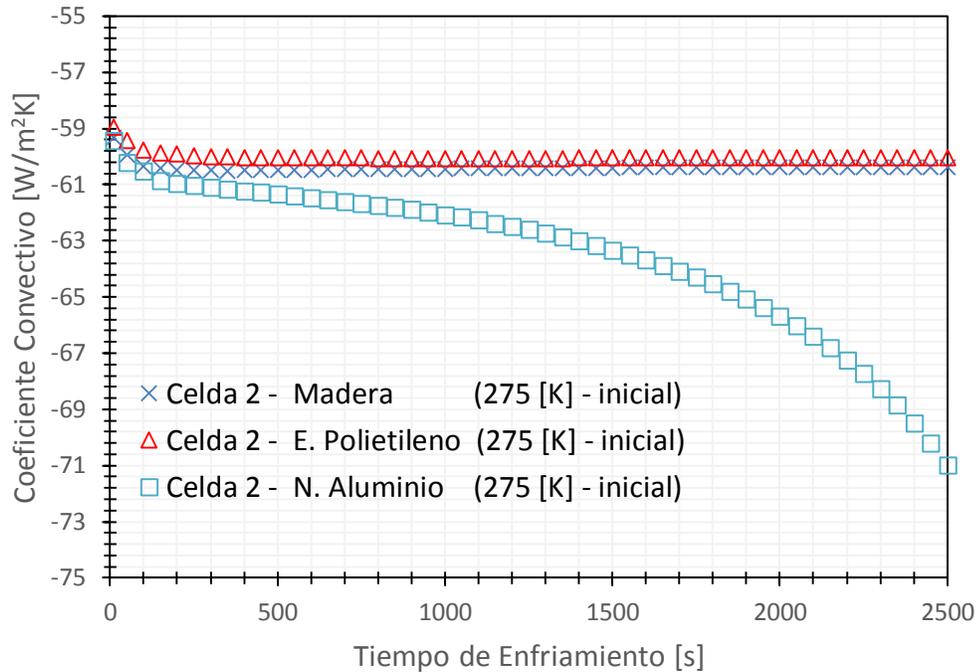


Figura 7-15 : Coeficiente convectivo promedio en interfase celda 2-aire

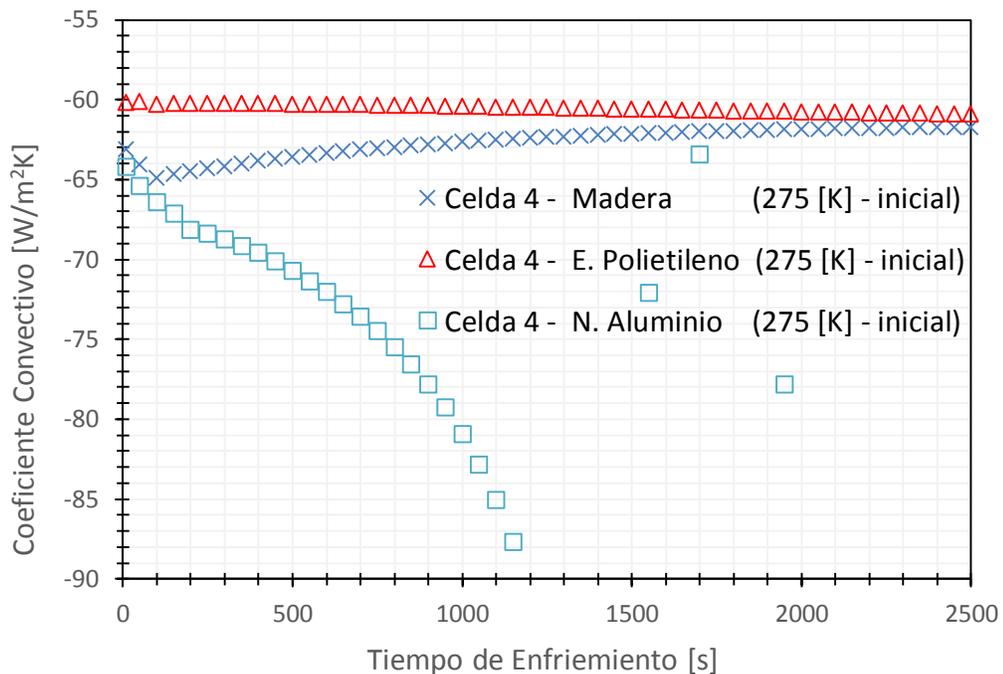


Figura 7-16 : Coeficiente convectivo promedio en interfase celda 4-aire

Nuevamente se muestra una secuencia del campo de temperatura del módulo, para 4 tiempos del enfriamiento.

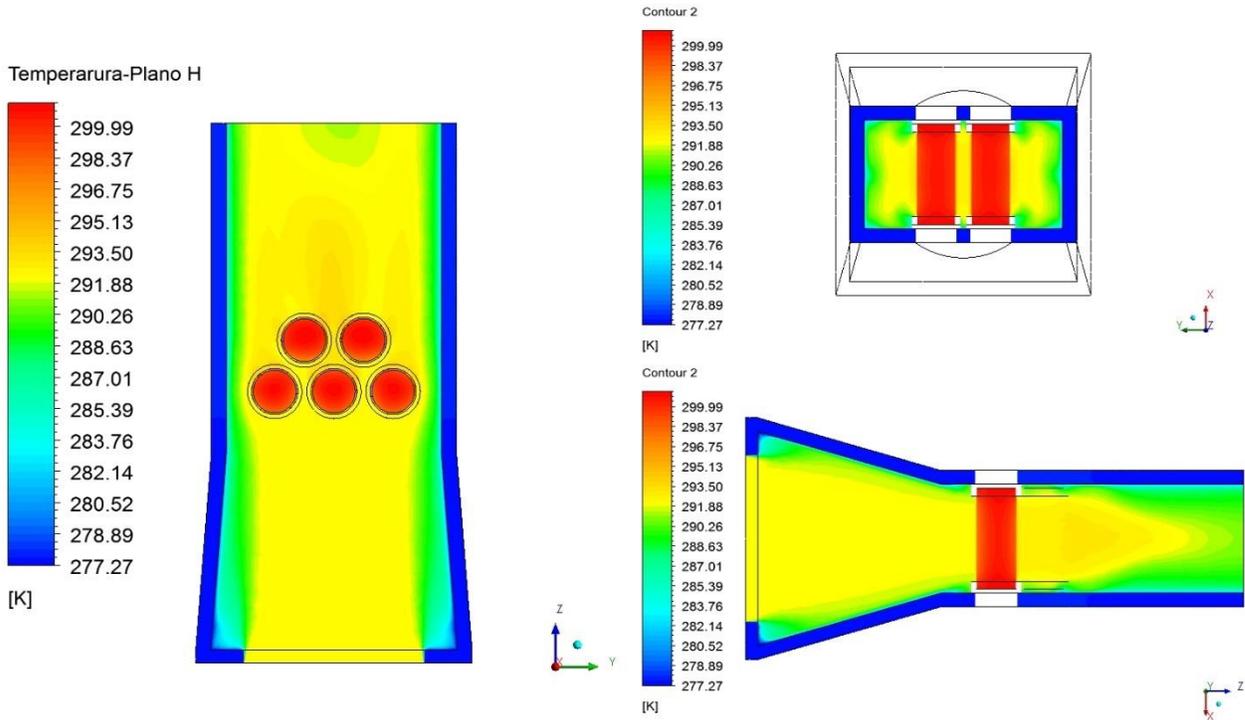


Figura 7-17 : Campo temperaturas - 275 [k] etc. – Tiempos en [s]: 100

La Figura 7-17 muestra el instante de los 100 [s] de enfriamiento, en donde el aire tiene una temperatura menor a la ambiente producto del intercambio de calor con la carcasa refrigerada. Las celdas por su parte se han enfriado hasta aproximadamente 299 [K].

Tal como el caso anterior, nuevamente se aprecia en forma visual que la refrigeración de la carcasa mejora la transferencia de calor haciéndose más visible una capa límite térmica y también se puede ver el aire calentado a través de una estela de calor en la zona posterior de las celdas, de tal manera que se puede ver aire más caliente en el seno del módulo y más frío en la interface con la carcasa refrigerada.

Una revisión del campo de temperatura a los 600 [s] en la Figura 7-18 muestra como la temperatura de las celdas ha bajado a 292 [K] y si se mira en detalle la carcasa se aprecia levemente una disminución gradual de la temperatura desde la parte posterior de la carcasa hacia la parte frontal por donde entra el aire, debido al traspaso de calor proveniente del aire caliente que acaba de refrigerar las baterías al final del módulo.

Esta variación gradual se puede apreciar de mejor forma en la Figura 7-9 y en la Figura 7-10 , correspondientes a los 800 [s] y 1900 [s] de enfriamiento, donde además se ratifica que a los 1500 [s], las celdas ya han llegado aproximadamente a la temperatura ambiente deseada.

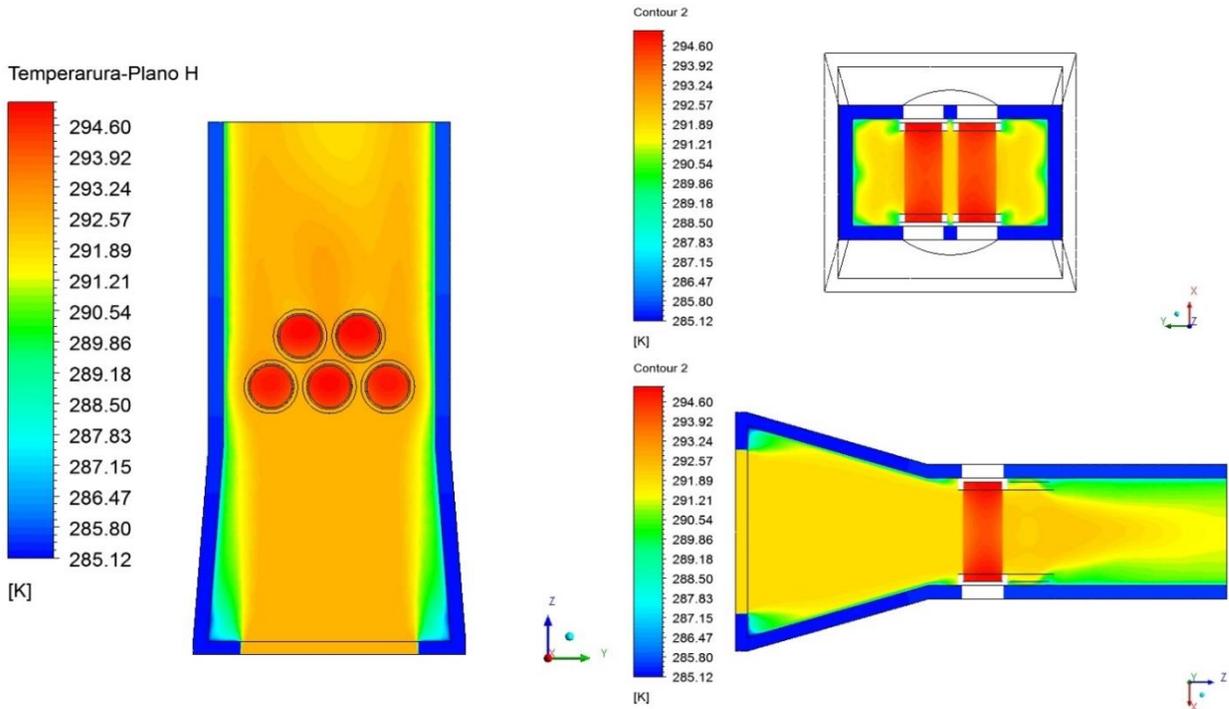


Figura 7-18 : Campo temperaturas - 275 [k] cte. – Tiempos en [s]: 600

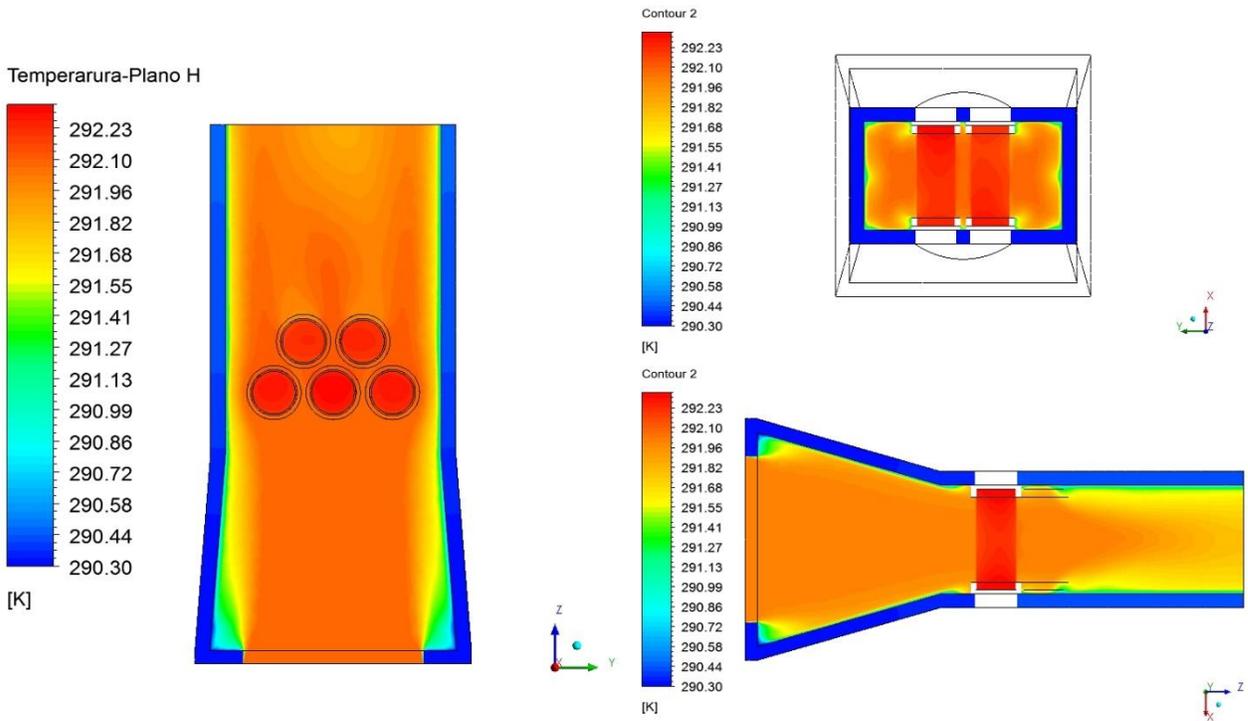


Figura 7-19 : Campo temperaturas - 275 [k] cte. – Tiempos en [s]: 1500

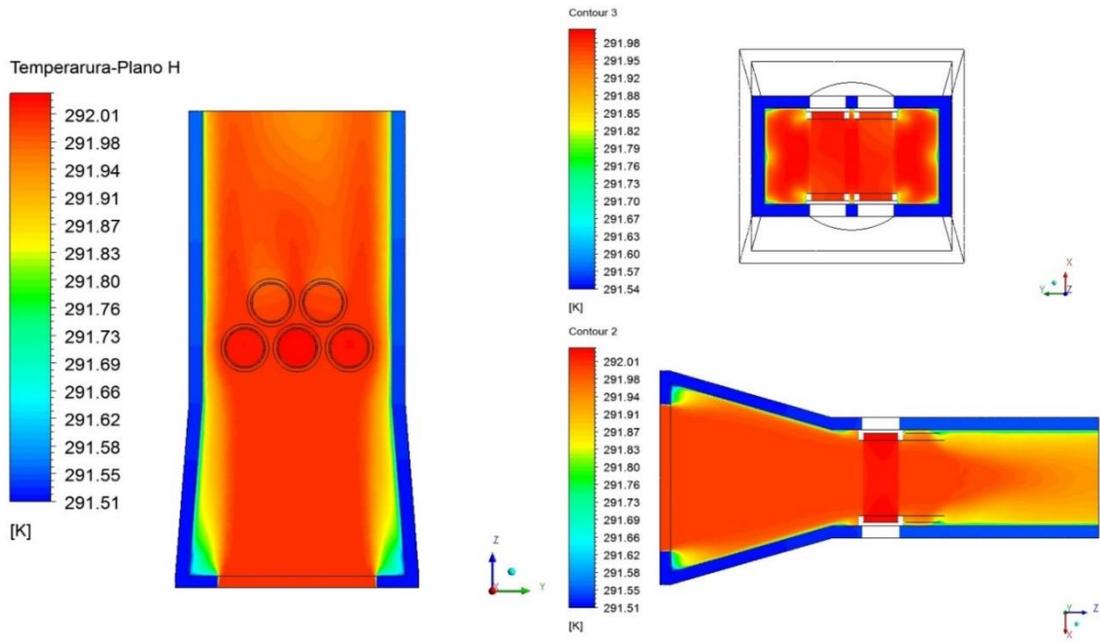


Figura 7-20 : Campo temperaturas - 275 [k] cte. – Tiempos en [s]: 2300

7.3 Comparación 3 casos de temperatura

La Figura 7-21 resume el estudio térmico mostrando el enfriamiento de la celda 4 usando Nitrato de Aluminio como material de carcasa, para los tres casos térmicos considerados, donde se aprecia la reducción de tiempo de un 40 % en el caso de $T = 275$ [K] cte y un 20 % con $T = 275$ [K] inicial.

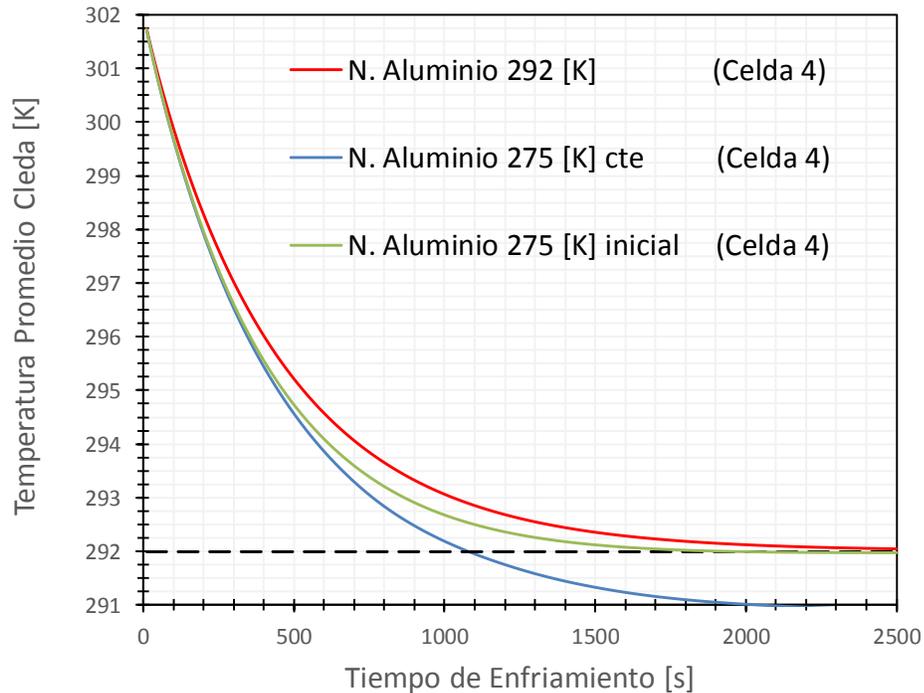


Figura 7-21 : Decaimiento térmico celda 4 usando carcasa a distinta condición de borde

7.4 Cambio longitud en geometría

Para complementar el estudio térmico, se generaron también dos geometrías nuevas que contienen un cambio longitud en la dirección del eje Z (dirección de avance del aire). Estas nuevas geometrías serán comparadas con la geometría de base, para las dos condiciones de temperatura de carcasa descritas anteriormente. Tomando en cuenta el estudio térmico de materialidad de la carcasa, el parámetro a comparar entre las geometrías será el decaimiento de las celdas para el material más conductor (Nitrato de Aluminio).

Adicionalmente en el Anexo E se incluye un estudio de geometrías que muestra la temperatura a lo largo del eje Z para distintos tiempos de enfriamiento. No todos los gráficos de dicho estudio aportan cosas nuevas por lo que solo se selecciona, en este capítulo, la comparación de las tres geometrías para el instante de los 700 [s] de enfriamiento, para las dos condiciones de temperatura de carcasa descritas.

7.4.1 Geometría 1- Sin modificación

Se le denominará geometría 1 a la geometría base empleada en todos los análisis previos.

7.4.2 Geometría 2- Alargamiento Aguas Abajo

La geometría 2 presenta un alargamiento de longitud en el eje Z aguas debajo de las baterías. El resultado fluidodinámico y de presión para esta geometría, no es objeto de estudio pero de igual manera se presenta el campo de presión y velocidad en el Anexo E. Para esto se mantuvo constante la posición relativa de cada batería y solo se alargó la longitud de la carcasa. La Figura 7-22 muestra un isométrico de esta geometría:

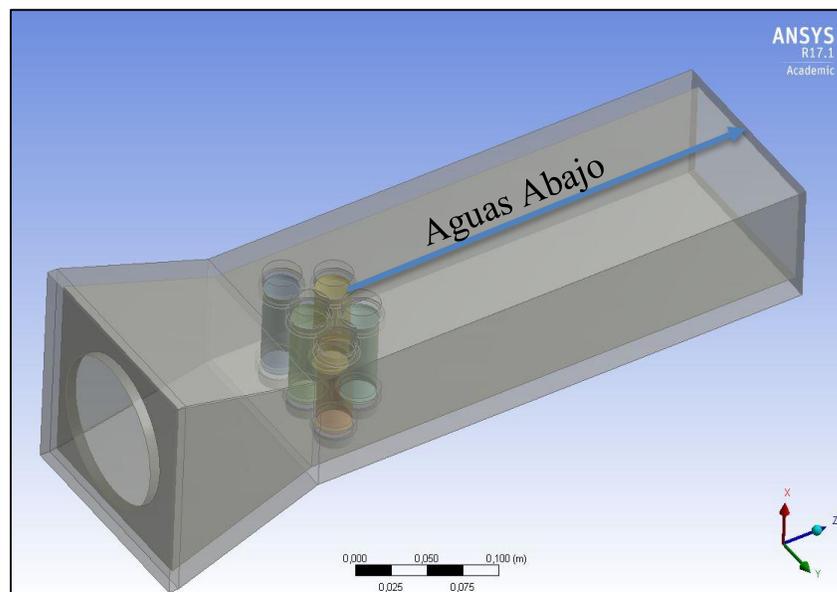


Figura 7-22 : Isométrico del CAD de la Geometría 2

7.4.3 Geometría 3- Alargamiento Aguas Arriba

La geometría 3 presenta un alargamiento de longitud en el eje Z aguas arriba de las baterías. Para ello se trasladaron las 5 baterías una distancia de 200 mm, en la dirección positiva del eje Z y además se mantuvo la distancia entre el arreglo de baterías. La Figura 7-23 muestra un isométrico de la geometría:

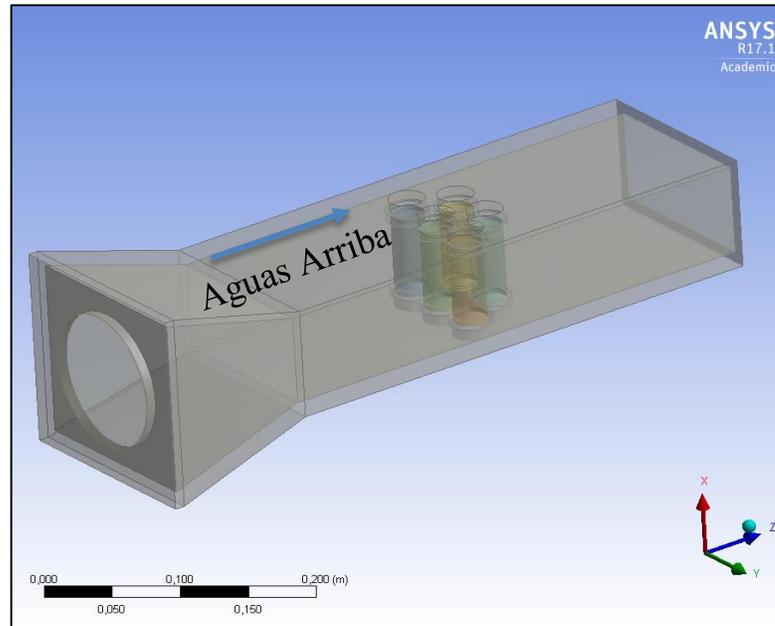


Figura 7-23 : Isométrico del CAD de la Geometría 3

7.4.4 Estudio térmico Geometrías

➤ **Carcasa a T constante= 275 [K]**

En este ítem se presenta la comparación entre geometrías utilizando una carcasa de aluminio a temperatura constante de 275 [K]. La Figura 7-24 muestra el decaimiento de la celda 1 para carcasas con los tres tipos de geometrías definidas, mientras que la Figura 7-25 y la Figura 7-26 muestran lo mismo para las celdas 2 y 4 respectivamente.

Nuevamente se aprecia que es la celda 4 la que presenta el enfriamiento más rápido pero aun así, en todos los casos se aprecia que la geometría 3 provoca una reducción del tiempo de enfriamiento en unos 200 [s] adicionales a lo que ya se había logrado reducir sólo por la refrigeración de la carcasa.

Esto se explica porque la geometría 3 permite más superficie de intercambio al aire con la carcasa refrigerada antes de que llegue interactuar con las celdas, lo que se traduce en una refrigeración con aire más frío para todas las celdas. La geometría 1 y 2 no presentan diferencias pues básicamente el aire llega con la misma temperatura a interactuar con las baterías.

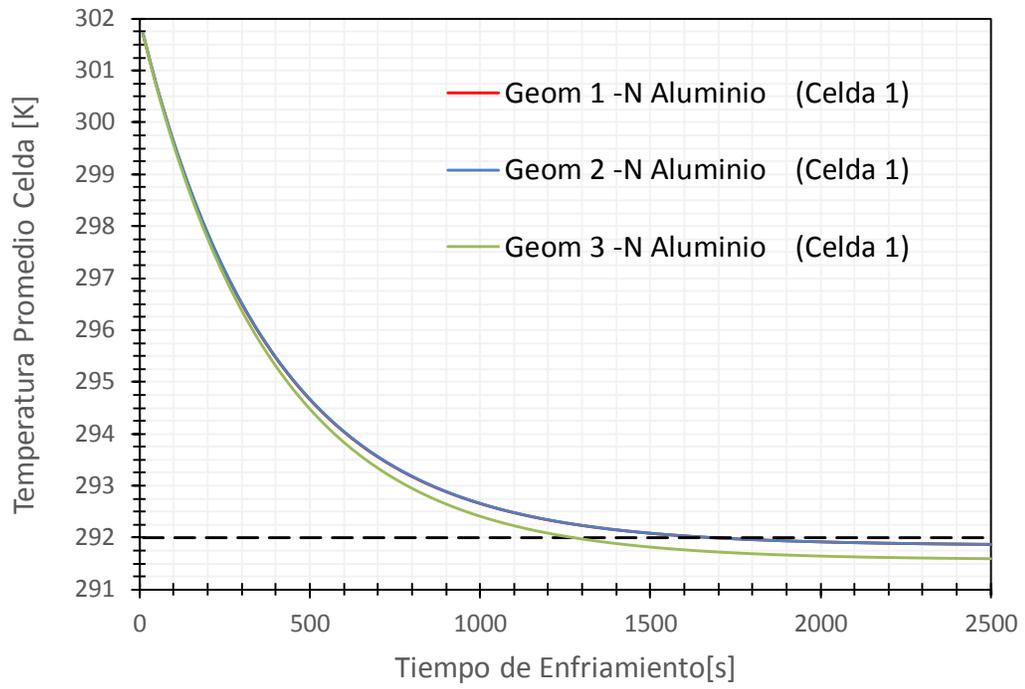


Figura 7-24 : Decaimiento según geometrías para celda 1

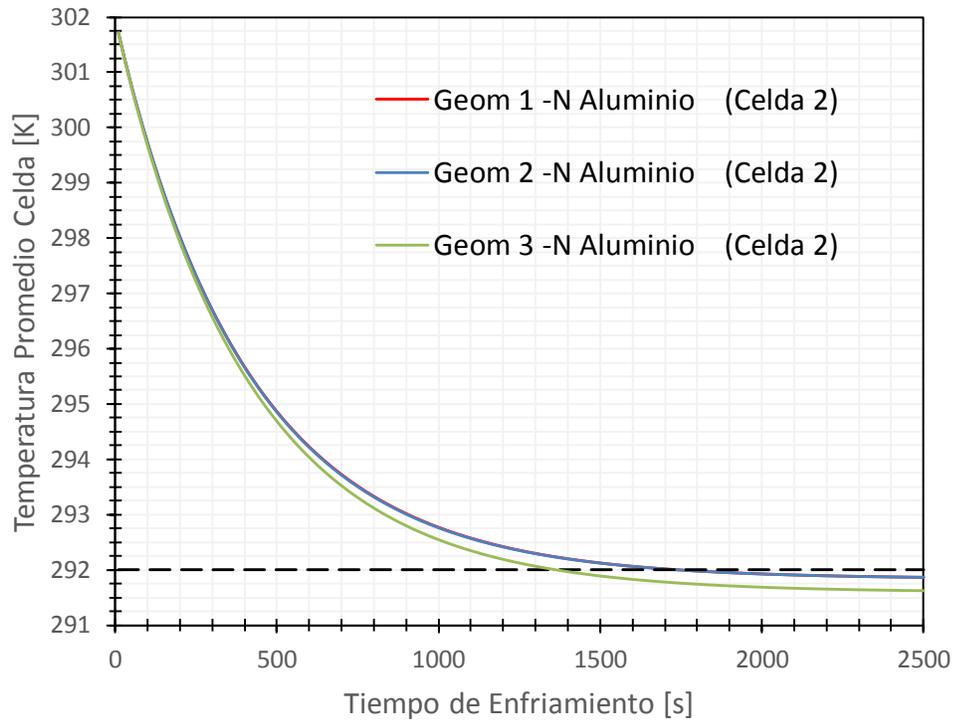


Figura 7-25 : Decaimiento según geometrías para celda 2

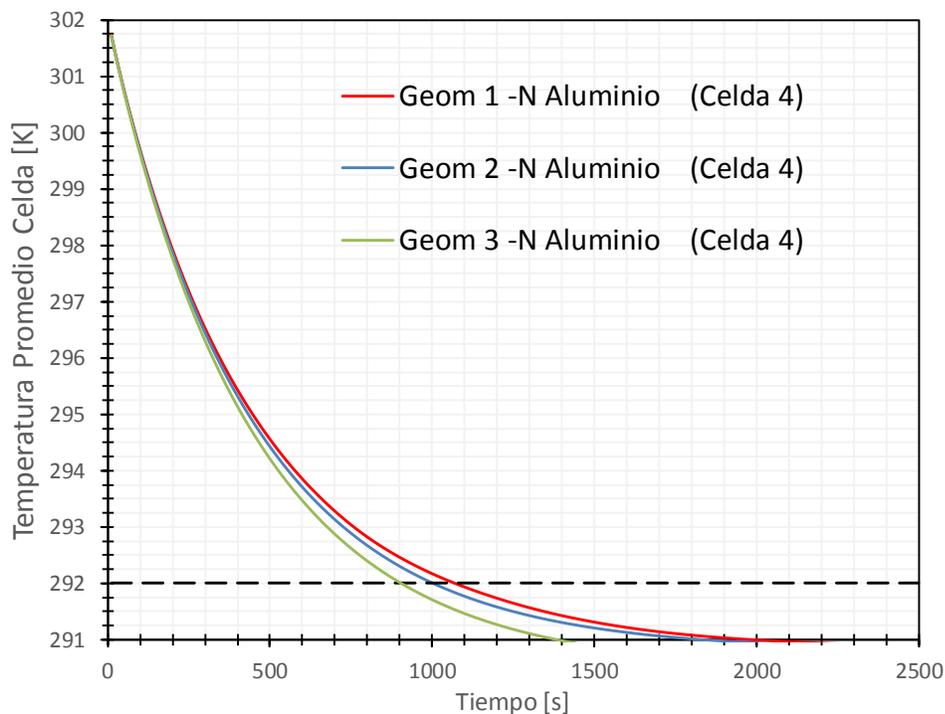


Figura 7-26 : Decaimiento según geometrías para celda 4

Se incluye una comparación entre geometrías para la temperatura del aire a lo largo del eje Z a los 700 [s] de enfriamiento, seleccionada del Anexo E, y representada en la Figura 7-27. En ella se aprecia un punto de temperatura máxima, correspondiente al sector donde la línea de del eje Z cruza la celda 2. Se compara el caso base no refrigerado de la geometría 1 con el caso refrigerado de las geometrías 2 y 3, comprobando que con una carcasa refrigerada el aire baja su temperatura y provoca una menor temperatura en la celda, como se ha concluido previamente.

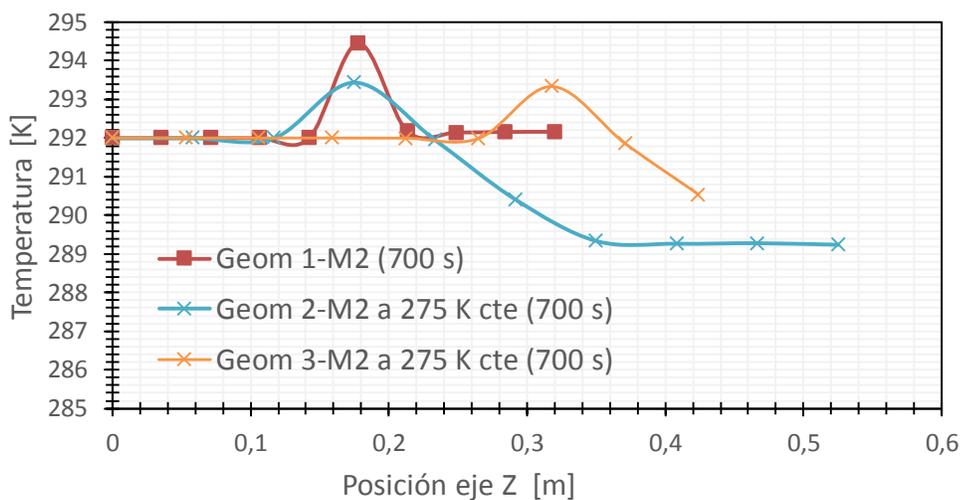


Figura 7-27 : Temperatura del aire en el eje Z (Ver Anexo E)

➤ **Carcasa T inicial = 275 [K]**

En este ítem se presenta la comparación entre geometrías utilizando una carcasa de aluminio a temperatura constante de 275 [K]. Los gráficos de la Figura 7-28, Figura 7-29 y Figura 7-30, muestran que nuevamente la geometría 3 provoca un enfriamiento más rápido de la celda, debido a la superficie de intercambio disponible descrita anteriormente

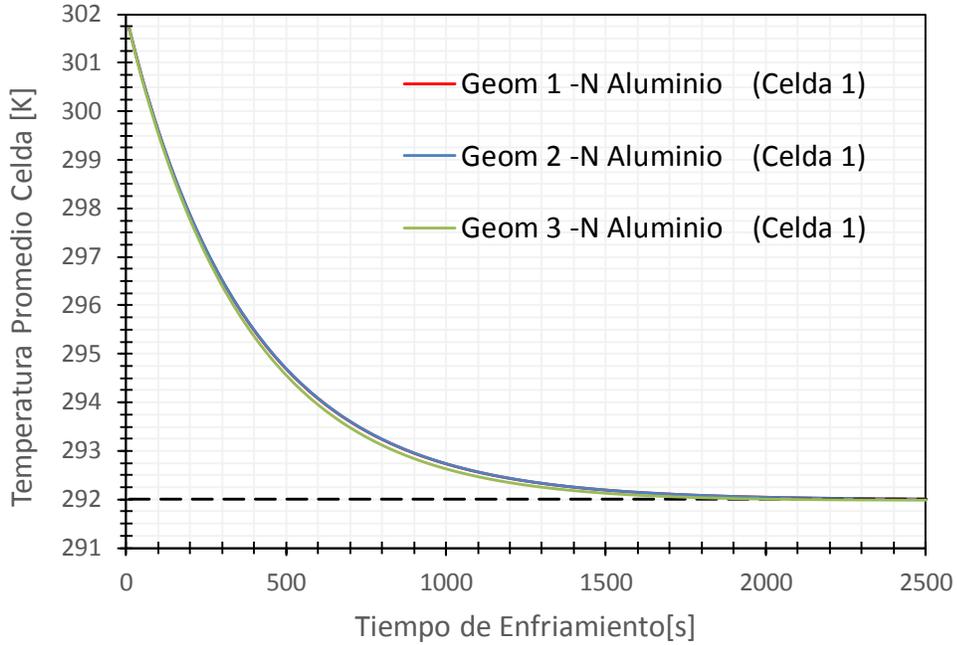


Figura 7-28 : Decaimiento según geometrías para celda 1

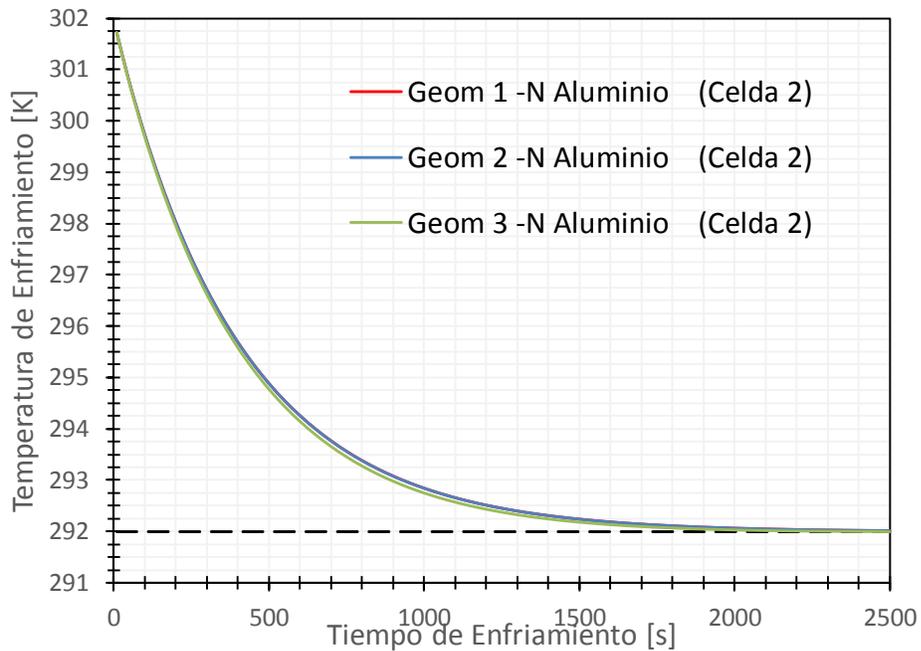


Figura 7-29 : Decaimiento según geometrías para celda 2

Nuevamente se aprecia que es la celda 4 la que presenta el enfriamiento más rápido y en particular la geometría 3 provoca también una reducción del tiempo de enfriamiento en unos 200 [s] adicionales a lo que ya se había logrado reducir sólo por la refrigeración de la carcasa.

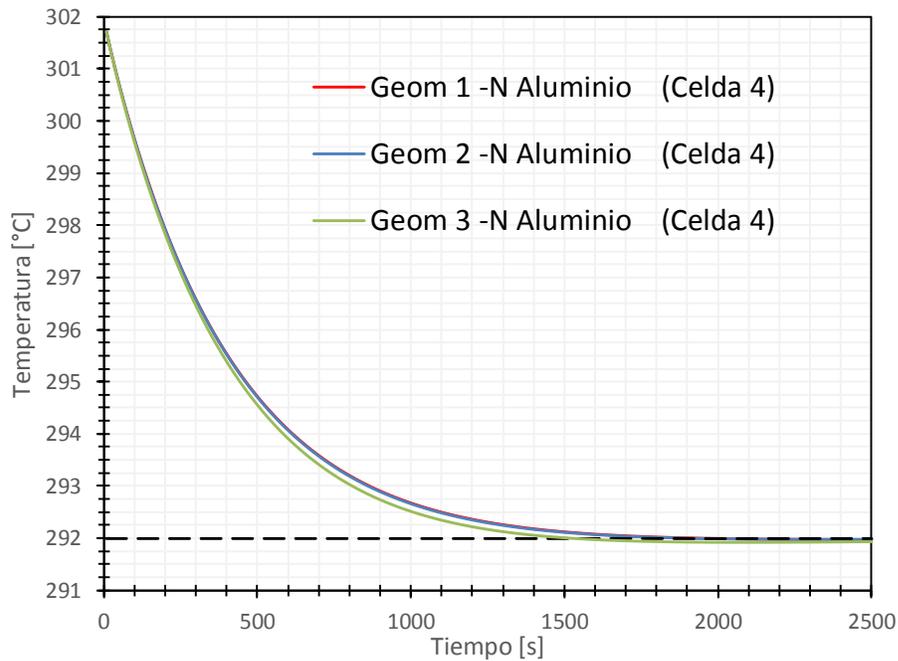


Figura 7-30 : Decaimiento según geometrías para celda 4

Para una línea en el eje Z, se comprueba nuevamente que el aire se enfría con la refrigeración de la carcasa, favoreciendo el enfriamiento de la celda. Aún así el aire se enfría menos respecto al caso de temperatura constante de carcasa.

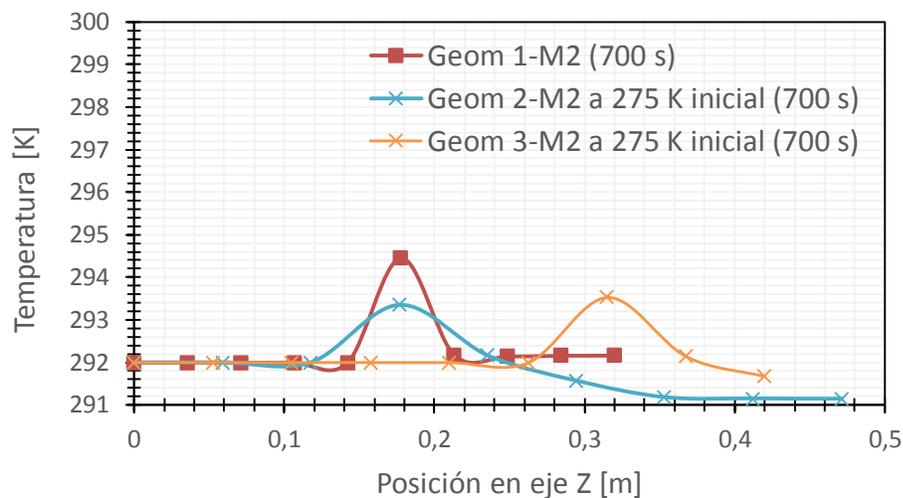


Figura 7-31 : Temperatura del aire en el eje Z (Ver Anexo E)

Capítulo 8

8 Conclusiones y Recomendaciones

8.1 Discusiones generales

8.1.1 Sobre el Desarrollo de Baterías eléctricas

Este trabajo de título ha permitido comprender el funcionamiento las baterías de Litio, aprender sobre el contexto en que estas son desarrolladas y en particular la forma en que estas se ven afectadas por las condiciones térmicas de operación,

Hasta ahora se han desarrollado numerosos modelos en la búsqueda del control de estos dispositivos y en general son las baterías cilíndricas las que cumplen con las mejores condiciones por su versatilidad en configuraciones.

Por otro lado, si bien el mercado de baterías ya está instalado y consolidado, la data reciente de las investigaciones sobre estudios térmicos recopilados en este trabajo, indican que el desarrollo de baterías eléctricas es aún un capítulo abierto para la ingeniería.

El desarrollo e investigación en las universidades es un primer puente que solidifica el futuro de estas tecnologías en el país. Se debe mantener una visión constante de innovación y optimización, ya que es indispensable para Chile avanzar en el desarrollo de estas tecnologías dado que tiene la fortuna de ser uno de los principales exportadores de Litio.

8.1.2 Sobre el Modelamiento Fluidodinámico

Desde el punto de vista mecánico, el estudio del problema térmico es un área interesante y con amplia gama de posibilidades para innovar. En particular el uso de softwares de modelación fluidodinámica como ANSYS permite sin duda acercarse a mejores resultados.

ANSYS es un software dinámico, con abundantes alternativas de modelamiento y manejo de resultados, sin embargo es indispensable que el usuario tenga conocimiento y base sólida del fenómeno que está estudiando, para poder sacar el mejor provecho al programa. Además, dado que esta herramienta es conocida y de uso masivo, el acceso de información es más expedito y fácil de obtener.

8.1.3 Sobre este Trabajo

En cuanto a lo general de este trabajo, se planteó replicar mediante fluidodinámica computacional un montaje experimental existente, lo cual se logró satisfactoriamente, e incluso se pudo acercarse bastante a los datos disponibles y los cálculos teóricos realizados

Fue un trabajo extenso, por lo que se puede agregar que antes de comenzar un trabajo de este tipo, es necesario asegurarse de tener disponibilidad completa de los recursos computacionales y herramientas de simulación. Se debe procurar definir lo mejor posible todos los parámetros que permitan reducir los recursos computacionales y el tiempo de simulación. Esto incluye realizar simplificaciones ingenieriles, definir correctamente objetivos y alcances, o bien ser estrictos con la configuración del modelo.

8.2 Conclusiones

8.2.1 Sobre la validación del modelo

El modelo que replica el montaje experimental fue calibrado con éxito y la respuesta fluidodinámica es consistente con los cálculos teóricos realizados. Se obtiene una pérdida de carga de 12 [Pa] y una velocidad máxima de 6 [m/s].

Además el modelo entrega una curva de decaimiento de las celdas bastante similar al montaje experimental, llegando a 292 [K] al cabo de 2500 [s], como se esperaba. Dicho efecto fue comprobado también mediante gráficos de temperatura y coeficientes convectivos de las celdas, que por lo demás estaban dentro del orden obtenido por cálculos teóricos (aproximadamente 60 a 70 [W/m²K]).

En cuanto al modelo de turbulencia, el que mejor se ajustó fue un modelo k-ε RNG con tratamiento de pared Enhanced Wall Treatment para el cálculo de capas límites, mientras que la malla seleccionada fue de 1600000 elementos con refinamiento en las interfaces de interés.

Dado que el modelo fluidodinámico está correctamente respaldado por la teoría y los datos experimentales disponibles, se concluye que es un modelo confiable y válido para las pruebas térmicas realizadas en este trabajo.

8.2.2 Sobre el estudio térmico

El estudio térmico permitió observar la relación entre el comportamiento fluidodinámico y el comportamiento térmico del sistema, como por ejemplo el aumento de transferencia de calor en lugares donde existe generación de vórtices debido a la apertura del flujo, al chocar con elementos sólidos o también el transporte de calor entre un sólido y otro a través de un fluido en movimiento que en presencia de verticidades, puede favorecer o desfavorecer el resultado deseado.

Para el caso base correspondiente a un módulo de cinco celdas a 302 [K] y carcasa de madera a T=292 [K], se concluye que las celdas más alejadas de la entrada de aire (celdas 4 y 5), demoran más en enfriar que las celdas cercanas a la entrada de aire (celdas 1, 2 y 3), debido a la separación de flujo provocada por las celdas frontales, traducido en recirculaciones o vórtices que transfieren rápidamente calor hacia las celdas posteriores, provocando que estas últimas demoren un poco más en enfriar.

Del estudio de materialidad para la carcasa se rescata el hecho de haber encontrado materiales de carcasa, con alta conductividad térmica y baja conductividad eléctrica, que por lo demás son materiales activos en el mercado de dispositivos electrónicos y/o con un alto potencial futuro.

Manteniendo la condición de temperatura a 292 [K] para la carcasa, se concluye que la materialidad de ésta no influye en absoluto sobre el enfriamiento de las celdas, debido a que el aire que entra al módulo tiene igual temperatura que el pack y una vez que entra en contacto con las baterías, no alcanza a calentarse lo suficiente como para hacer efectivo un efecto térmico de la carcasa.

Al simular la carcasa con una temperatura menor al aire, el estudio indica que si la carcasa comienza con una temperatura inicial de 275 [K] y se deja llegar al equilibrio con los demás elementos del sistema, se logra reducir el tiempo de enfriamiento de las celdas en un 20 %, mientras que si la temperatura de la carcasa mantiene constante en 275 [K], durante todo el tiempo, el enfriamiento es un 40% más rápido, respecto al caso base.

En ambos casos, dicho resultado se potencia en las celdas posteriores (celdas 4 y 5), gracias a los vórtices y recirculaciones que en este caso invierten el efecto ayudando a un mejor enfriamiento del aire mediante el contacto con la carcasa refrigerada.

Ahora bien, los efectos de refrigerar la carcasa nuevamente pueden considerarse independientes de la materialidad pues el efecto es nulo sobre las baterías delanteras (celdas 1,2 y3) y se hace presente pero de forma muy leve sobre las celdas posteriores (celdas 4 y 5), reduciendo el enfriamiento de las celdas en aproximadamente 1 [min] con un $\Delta T = 1[K]$, para el material de carcasa con mayor conductividad.

Otro efecto estudiado corresponde a un aumento de la superficie de intercambio entre el aire y la carcasa refrigerada, a partir de un alargamiento de la carcasa. De este análisis se concluye que si la carcasa refrigerada dispone de mayor superficie de intercambio con el aire, antes de que este tenga contacto con las celdas, el enfriamiento de cada celda es aún más rápido.

8.3 Recomendaciones

Se recomienda que para lograr un modelo fidedigno, es indispensable realizar un correcto estudio de mallado y de condiciones fluidodinámicas, pues como se puede ver en el estudio de sensibilidad de turbulencia realizado, el método de tratamiento de pared u otro elemento de configuración podría ser determinante en el comportamiento de la simulación.

Aunque es deducible que el mayor efecto sobre el enfriamiento de las celdas es provocado por el cambio de temperatura en la carcasa y no por el material, se debe tener en cuenta que en la práctica será más fácil refrigerar un material conductor térmico que uno aislante y por tanto la consideración del tipo de material para la carcasa no debe ser descartada. Es más, una pequeña reducción de tiempo de enfriamiento de las celdas de igual modo podría aportar en mitigar los efectos de envejecimiento después de varios ciclos de carga y descarga.

Lo concluido respecto al análisis de geometría sugiere que si se dispone de superficie suficiente para intercambio térmico entre un grupo de celdas y otro, es posible favorecer el enfriamiento de los aquellas más alejadas de la entrada de aire. Un estudio relacionado, para un módulo de 10 celdas, comprueba esta última afirmación (Ver Anexo F).

8.3.1 Trabajo Futuro

Diseñar geometrías enfocadas en la refrigeración y que permitan aumentar la superficie de intercambio entre el aire y la carcasa, en espacios reducidos. Asimismo hacer uso de carcasas con materiales conductores y aislantes térmicos para orientar el flujo de calor en forma estratégica.

Estudiar la factibilidad de diseñar carcasas que incluyan circuitos de refrigeración en su interior y establecer un trade-off sobre el gasto o ahorro en la energía consumida por ventiladores al incorporar la refrigeración interna de la carcasa.

Investigar en forma experimental los efectos de la carcasa obre el enfriamiento y/o idear otras formas de que la carcasa se transforme en un elemento activo en el enfriamiento de las celdas dentro de un empaquetamiento de baterías ion Litio.

Bibliografía

- [1] Y. Ye, A.A.O Tay L.H. Saw, “Electro-thermal analysis, and integration issues of lithium ion battery for electric vehicles,” *Journal of Power Sources*, vol 131, pp. 97—107, October 2014.
- [2] K.J Tseng, Jiyun Zhao, Zhongbao Wei Tao Wang, “Thermal investigation of lithium-ion battery module with different cell arrangement structures and forced air-cooling strategies.” *Applied Energy*, vol. 134, no. 1, pp 229—238, 2014
- [3] Regan Dixon Hongguang Sun, “Development of cooling strategy for an air cooled lithium-ion battery pack,” *Journal of Power Sources*, vol. 272, pp 404- 414, December 2014
- [4] Isidor Buchman, Battery University.”How do Lithium Batteries Work?” [En línea] Disponible en: http://batteryuniversity.com/learn/article/lihium_based_batteries.
- [5] Isidor Buchman, Battery University.”Types of Lithium-Ion” [En línea] Disponible en: http://batteryuniversity.com/learn/article/types_of_lithium_ion
- [6] Qingsong Wang, Ping Ping, Xuejuan Zhao, Guanquan Chu, Junhua Sun, Chunhua Chen, “Thermal runaway caused fire and explosion of lithium ion battery.” *Journal of Power Sourced*, vol. 208, pp 210—224, 2012
- [7] D. Linden, T. Reddy, *Handbook of Batteries*, third ed., McGraw-Hill, New York, 2001.
- [8] Francisco Moser, “Medición Experimental del Comportamiento Térmico de una Batería de Ión-Litio
- [9] Lip Huang Saw, Yonghuang Ye, Andrew A.O. Tay, Wen Tong Chong, Seng How Kuan, Ming Chien Yew, “Computational fluid dynamic and thermal analysis of Lithium-ion battery pack with air cooling,” *Applied Energy*, vol 177, pp. 783--792, 2016
- [10] Jorge Reyes, “Modelamiento Térmico de Empaques de Baterías de Litio,” Universidad de Chile, Santiago, Memoria 2012
- [11] F.P Incropera and D. P DeWitt, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, fifth edit ed., John Wiley & Sons, Ed. 2002
- [12] ANSYS Inc, *ANSYS Fluent Theory Guide*, U.S.A, Ed. 2013
- [13] Chengke Zhou, Member, IEEE, Kejun Qian, Malcom Allan, Wnjun Zhou, “Modeling of the Cost of EV Battery Wear Due to V2G Application in Power Systems” *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol 26, N0. 4, December 2001.
- [14] Feng Leng, Cher Ming Tan, Michael Pecht, “Effect of Temperature on the Aging rate of Li Ion Battery Operating above Room Temperature” *Scientific Reports*, August 2015
- [15] Jorge Reyes-Marambio, Francisco Moser, Felipe Gana, Bernardo Severino, Williams R. Calderón R. Calderón-Mañoz, Rodrigo Palma-Behnke, Pablo A. Estevez, Marcos Orchard, Marcelo Cortés. “A fractal time thermal model for predicting the Surface temperature of air-cooled cylindrical Li-ion cells based on experimental measurements,” *Journal of Power Sourced*, vol 306, pp 636—645, 2016.
- [16] —. Informe Interno Centro de Energía. “*Experimento 5 celdas*”. Santiago : s.n., 2014.
- [17] Yonghuang Ye, Yixiang Shi, Andrew A.O. Tay, “Electro-thermal cycle life model for lithium iron phosphate battery.” *Journal of Power Sources*, vol. 217, pp 509—518, 2012.

- [18] LIN Cheng, Chen Ke, Sun Fengchun, Tang Peng, Zhao Hongwei “Research on thermo-physical properties identification and thermal analysis of EV Li-ion battery.”
- [19] Dong Hyup, Jeon Seung, Man Baek, “Thermal modeling of cylindrical lithium ion battery during discharge cycle” *Journal of Power Sources*, vol. 52, pp’1273—1281, 2011.
- [20] Sheng Shen, Asegung Henry, Jonathan Tong, Ruiting Zheng, Gang Chen, “Polyethylene nanofibres with very high thermal conductivities” *Nature Nanotechnology*, March 2010
- [21] Ghasemi, Jadi, Nagarajan, Thoppey, Xiaopeng Huang, James Loomis, Xiaobo Li, Jonathan Tong, Jianjian Wang, Gang Chen, “High thermal conductivity ultra-high molecular weight polyethylene (UHMWPE) films” , *Institute of Electrical and Electronic Engineers*, May 2014.

ANEXOS

Anexo A. Mediciones montaje experimental Centro de Energía

A.1 – Extracto adaptado del “Capítulo 3” Memoria Francisco Moser

Se muestra un extracto del CAPITULO 3, de la Memoria del trabajo de título del Ingeniero Francisco Moser, en colaboración con el Centro de Energía, donde se describe el montaje experimental utilizado para la validación del modelo del presente trabajo de título: En este extracto se cita en forma textual, solo se modifica la numeración de títulos, imágenes y tablas:

➤ Prototipo de arreglo experimental:

Puesto que el diseño es una etapa compleja, cuyo éxito o fracaso tendría repercusiones a lo largo de todo el proyecto, se decidió ser especialmente cauteloso en esta etapa. Como medida para aminorar los posibles errores de diseño y generar una visión más cercana del proyecto se decidió generar en una primera instancia un prototipo conceptual del arreglo experimental. Este prototipo si bien no contaría ni con las medidas del arreglo experimental, ni con el mismo número de celdas, serviría para generar un primer acercamiento al fenómeno ocurrido, tomar medidas preliminares y entregar información para respaldar correctamente las decisiones que se tomarán sobre el diseño.

A continuación en la Figura A-1 se muestra el prototipo del montaje experimental. Se procedió a la construcción de un arreglo de 5 celdas el cual es enfriado por ventilación forzada mediante de un ventilador de 12 Volts.

Las celdas fueron dispuestas equidistantes entre ellas, con una distancia de 39 mm entre centro de cada celda. Se dispusieron de 2 configuraciones para este prototipo, la primera con 3 celdas en la primera fila y 2 en la segunda fila, en configuración escalonada como se muestra en la Figura A-1 y la segunda con 2 celdas en la primera y segunda fila y una en la tercera, en configuración tipo grilla (no escalonada), ver Figura A-2.

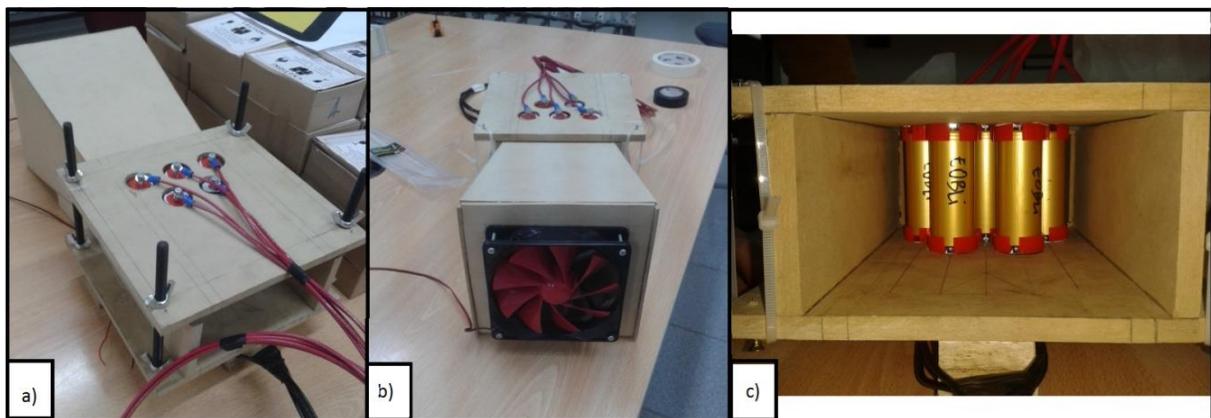


Figura A-1: Vistas Módulo Experimental, a) Principal, b) Frontal, c) Posterior

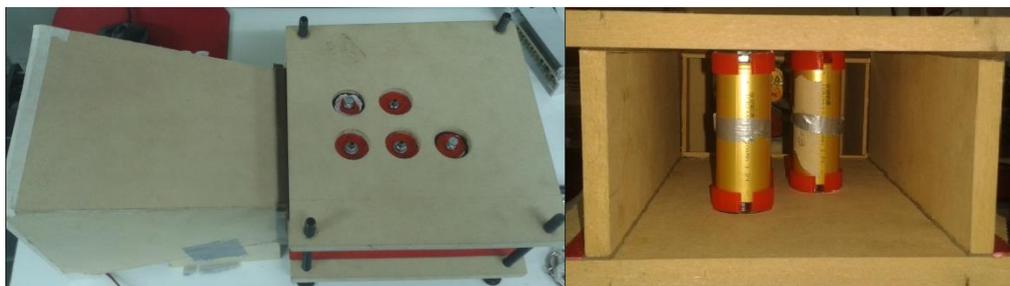


Figura A-2: Disposición no Escalonada

- **Montaje Experimental:**

El experimento consiste en la descarga de las 5 celdas a una tasa de 0,75 C, equivalente a 3 Amper por hora por celda, durante una hora. Esta descarga se logra por medio de la utilización del equipo de carga programable BK Precisión 8500, ver Figura A-3. Luego de que las celdas se descarguen totalmente, se procede inmediatamente a prender el ventilador del prototipo para poder capturar el fenómeno de enfriamiento de estas.

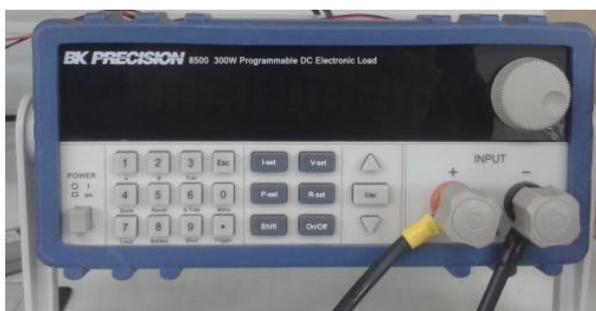


Figura A-3: Carga Programable BK Precisión 8500

Durante el experimento el caudal no es medido puesto que no se dispone aún de los instrumentos requeridos para esto, sin embargo es posible capturar la temperatura de cada una de las celdas y la temperatura ambiente por medio de termocuplas, ver Figura A-4, con lo cual posteriormente se procede a calcular los τ de enfriamiento de cada celda.¹



Figura A-4: Celdas con Termocuplas Acopladas

Los datos de las termocuplas son obtenidos por medio de una tarjeta de adquisición, ver Figura A-5 y los datos son guardados en el computador por medio de LabView y un software de descarga de celdas DK8500 en un archivo de texto.

¹ Para la determinación de τ se realizó un *fitting* con la función de decaimiento y posteriormente se despejó el τ de esta función.



Figura A-5: Tarjeta de Adquisición de Datos

Finalmente los datos son graficados y analizados por medio de Matlab.

- **Enumeración de Celdas:**

Como convención a lo largo de este informe las celdas serán enumeradas de izquierda a derecha y posteriormente de arriba hacia abajo, según lo que muestra la Figura A-6. Asimismo el eje X se definirá colineal al eje axial del ventilador y su origen se encontrará en el punto rojo mostrado en la Figura A-6.

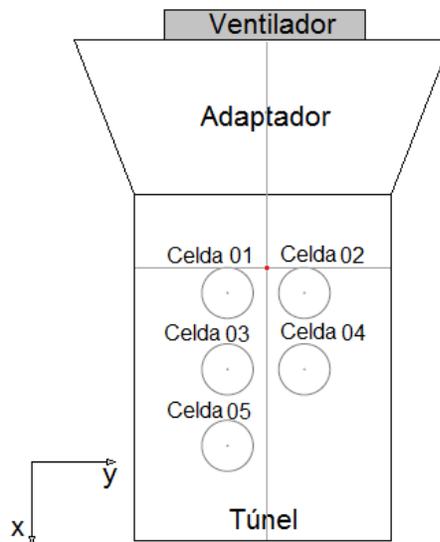


Figura A-6: Figura Explicativa Enumeración de Celdas

- **Resultados del prototipo:**

Como resultado del experimento se obtuvieron las siguientes curvas de comportamiento de las celdas, ver Figura A-7, Tabla A-1, Figura A-8 y Tabla A-2.

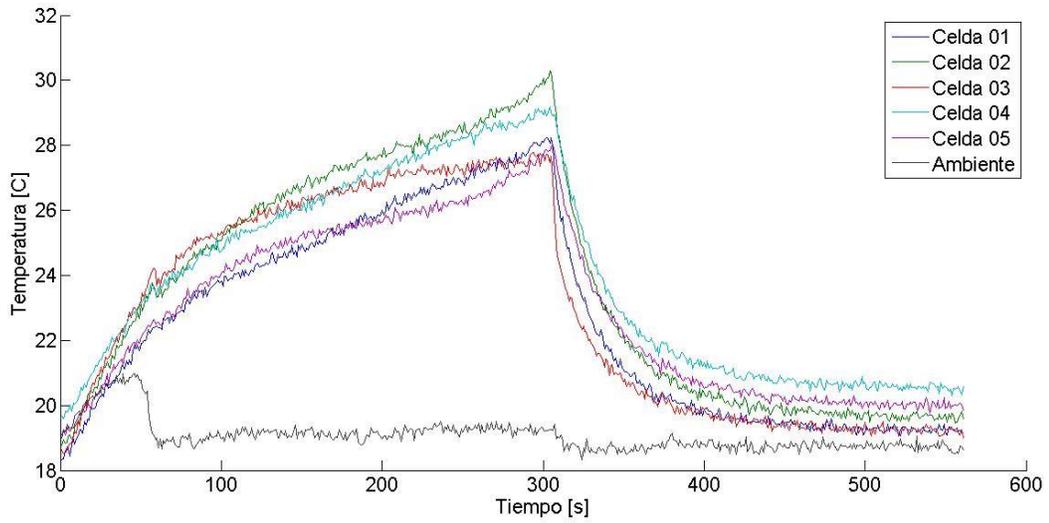


Figura A-7: Gráfico Temperatura Celdas, Disposición Escalonada

Tabla A-1: Taus Obtenidos, Disposición Escalonada

	Celda 01	Celda 02	Celda 03	Celda 04	Celda 05
Tau	454,8	481,8	540,3	576,5	574,9

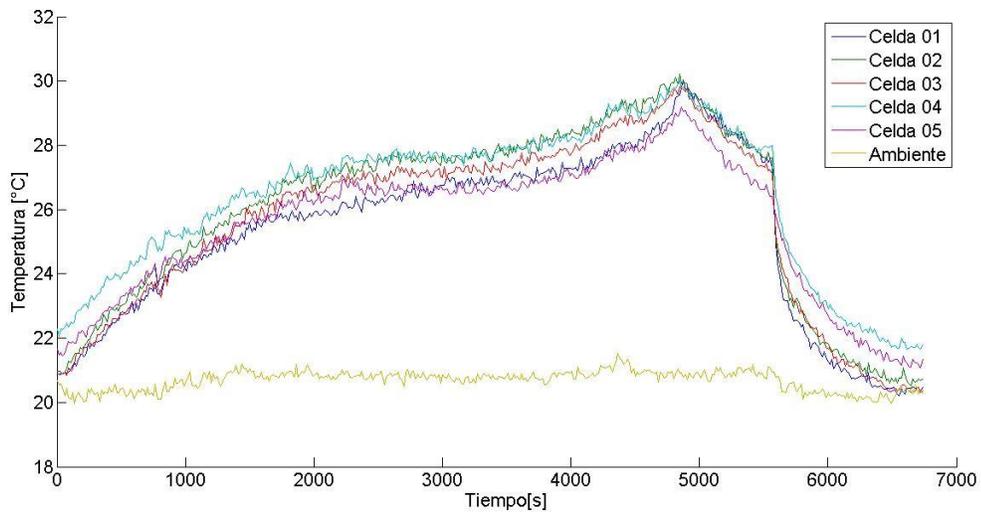


Figura A-8: Gráfico Temperatura Celdas, Disposición No Escalonada²

² Aparentemente entre el segundo 5000 y 6000 se produce un error en la desconexión de celdas y encendido del ventilador, dado lo anterior se repetirá el experimento a futuro.

Tabla A-2: Taus Obtenidos, Disposición No Escalonada

	Celda 01	Celda 02	Celda 03	Celda 04	Celda 05
Tau	856,1	866,2	729,9	762,2	828,4

- **Contraste con simulaciones en MVF:**

De manera paralela a estos experimentos, el funcionario del Centro de Energías, Jorge Reyes, realizó simulaciones en ANSYS para predecir el comportamiento de estas disposiciones y tener un contraste preliminar del comportamiento teórico *versus* el real.

A continuación se exponen los resultados de su trabajo:

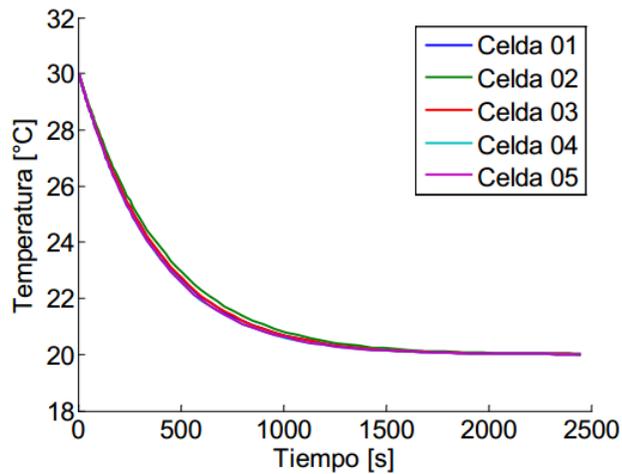


Figura A-9: Gráfico Decaimiento Temperatura Celdas, Disposición Escalonada

Tabla A-3: Taus Experimentales, Simulados y Error, Disposición Escalonada

	Celda 01	Celda 02	Celda 03	Celda 04	Celda 05
Experimental	454,8	481,8	540,3	576,5	574,9
Simulación	381,5	408,3	383,5	367,1	367,8
Error	16,1%	15,3%	29,0%	36,3%	36,0%

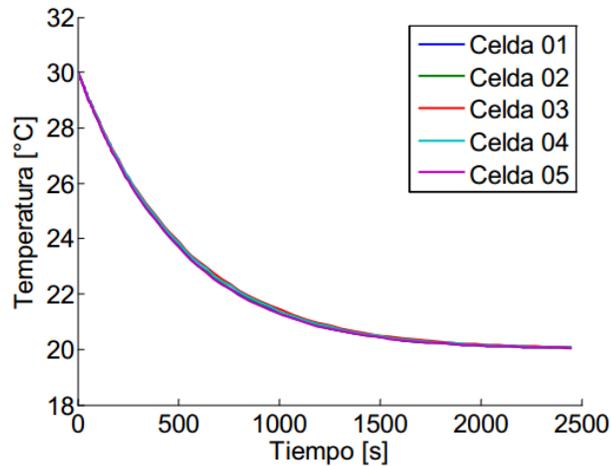


Figura A-10: Gráfico Decaimiento Temperatura Celdas, Disposición No Escalonada

Tabla A-4: Taus Experimentales, Simulados y Error, Disposición No Escalonada

	Celda 01	Celda 02	Celda 03	Celda 04	Celda 05
Experimental	810,2	846,4	859,8	897,8	887,3
Simulación	493,5	492,0	513,2	507,5	489,5
Error	39,1%	41,9%	40,3%	43,5%	44,8%

Como condiciones de borde se utilizó una disposición y estructura iguales a la del modelo real y para la generación de la condición de borde tipo ventilador se utilizó la herramienta de simulación de ventiladores de ANSYS, *Ice Pack*. Cabe destacar que dado que la velocidad del ventilador sólo pudo ser medida por medio de un anemómetro de rotor que no calzaba con las dimensiones del ventilador, existe mayor espacio a error en la velocidad utilizada en las simulaciones.

Análisis y Conclusiones de Resultados en Prototipo:

Como primera observación se puede observar un comportamiento más ordenado en los resultados teóricos que en los experimentales, asimismo un enfriamiento claramente más rápido en estos *i.e.* menor τ , lo último puede ser una consecuencia de utilizar una velocidad mayor a la real en las simulaciones. Sin embargo se hace notoria la gran diferencia en el error en el caso escalonado y no escalonado.

Asimismo se ve claramente una mejor ventilación en las celdas dispuestas en el lado izquierdo del prototipo lo cual podría ser explicado por una desalineación del flujo proveniente del ventilador hacia la izquierda.

Además como resultados relevantes de los prototipos se puede observar que el ventilador tiene un punto ciego, el cual no logra disociarse a lo largo del trayecto hasta la salida. Este fenómeno se produce tanto en ausencia de celdas, como en su presencia. Se presume que el vórtice que genera el ventilador dificulta aún más la disociación de esta zona de caudal nulo. Junto con esto el prototipo logró probar los soportes de las celdas, facilitando el proceso de diseño y mejoramiento de estos.

A.2 – Datos utilizados por Francisco Moser (Configuración. Escalonada)

La siguiente tabla contiene los datos experimentales obtenidos y utilizados por Moser para la configuración escalonada en la sección A.1. Se presentan solo datos correspondientes al enfriamiento con aire en fase de descarga, transformados a unidades de temperatura en grados Kelvin [K], con intervalos de 50 [s]:

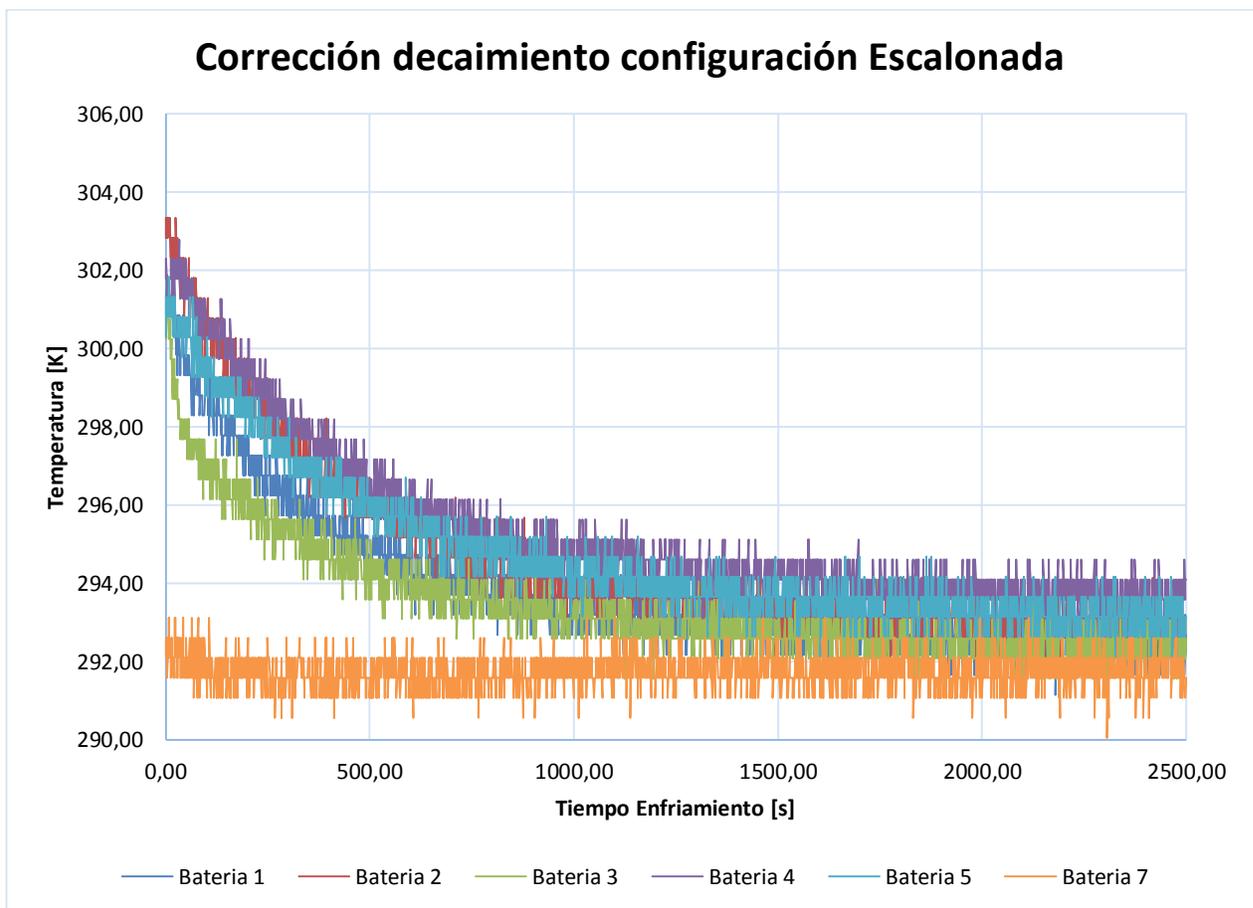
Tiempo [s]	T Celda 1 [K]	T Celda 2 [K]	T Celda 3 [K]	T Celda 4 [K]	T Celda 5 [K]	T Aire [K]	T promedio [K]
0,00	301,37	303,35	300,75	302,29	300,30	292,10	301,61
50,00	299,32	301,81	297,68	301,26	300,30	291,59	300,08
100,00	298,81	300,28	296,66	300,75	299,79	292,10	299,26
150,00	298,30	299,77	296,66	300,24	298,76	291,59	298,75
200,00	297,28	298,74	296,15	299,22	298,25	291,59	297,93
250,00	296,76	299,25	296,15	298,20	298,25	292,61	297,72
300,00	295,74	298,23	295,13	297,69	297,74	291,59	296,91
350,00	295,23	297,21	295,13	298,20	296,72	291,59	296,50
400,00	295,74	296,70	294,62	297,17	296,21	292,10	296,09
450,00	295,23	296,70	295,13	296,66	295,69	291,59	295,88
500,00	294,21	296,70	294,62	296,66	296,21	291,08	295,68
550,00	294,72	295,68	294,11	296,15	295,18	292,10	295,17
600,00	294,72	295,16	294,11	295,64	294,67	291,59	294,86
650,00	294,72	295,16	294,11	296,15	295,18	292,10	295,06
700,00	294,21	294,65	293,08	295,64	295,18	291,08	294,55
750,00	293,70	295,68	294,11	295,64	295,18	291,59	294,86
800,00	294,21	294,65	293,08	295,13	294,67	291,59	294,35
850,00	294,21	295,16	293,08	295,64	295,18	291,59	294,66
900,00	293,70	294,14	293,08	294,62	294,67	291,59	294,04
950,00	292,67	294,14	293,08	295,13	294,67	292,61	293,94
1000,00	293,18	293,63	293,59	295,13	293,65	291,08	293,84
1050,00	293,70	294,14	293,08	294,62	294,16	291,08	293,94

Tiempo [s]	T Celda 1 [K]	T Celda 2 [K]	T Celda 3 [K]	T Celda 4 [K]	T Celda 5 [K]	T Aire [K]	T promedio [K]
1100,00	292,67	293,12	293,59	294,62	294,67	293,12	293,73
1150,00	293,70	293,63	292,57	294,11	293,65	292,10	293,53
1200,00	293,18	293,12	293,59	294,62	294,16	291,08	293,73
1250,00	293,18	293,63	292,57	294,11	294,16	291,08	293,53
1300,00	292,67	293,12	292,57	294,62	293,65	291,59	293,33
1350,00	292,67	293,12	292,57	294,11	293,65	292,10	293,22
1400,00	292,67	293,63	292,57	294,11	293,65	292,10	293,33
1450,00	292,67	294,14	293,08	294,62	293,14	292,10	293,53
1500,00	292,16	293,12	292,57	294,62	294,16	292,61	293,33
1550,00	293,70	293,63	292,57	294,11	294,16	292,10	293,63
1600,00	293,18	293,12	292,06	294,62	293,14	291,59	293,22
1650,00	292,67	293,12	292,57	293,59	293,65	292,10	293,12
1700,00	292,67	294,14	292,57	294,62	293,65	291,59	293,53
1750,00	293,18	293,63	292,06	294,62	293,65	292,10	293,43
1800,00	293,18	293,12	293,08	293,08	294,16	291,59	293,33
1850,00	292,16	292,61	292,57	293,59	293,65	292,10	292,92
1900,00	292,67	293,12	292,57	293,59	293,14	292,61	293,02
1950,00	292,67	292,61	292,57	293,59	293,14	291,59	292,92
2000,00	292,67	292,61	292,06	293,08	293,14	291,08	292,71
2050,00	292,67	293,12	292,06	293,59	293,14	291,59	292,92
2100,00	292,67	293,12	291,55	294,11	292,63	291,59	292,81
2150,00	292,67	293,12	291,55	294,62	293,65	292,10	293,12
2200,00	292,67	293,12	291,55	294,11	292,63	291,59	292,81
2250,00	292,16	293,12	292,06	293,08	293,65	291,59	292,81
2300,00	292,16	293,12	292,57	293,59	293,65	292,10	293,02

Tiempo [s]	T Celda 1 [K]	T Celda 2 [K]	T Celda 3 [K]	T Celda 4 [K]	T Celda 5 [K]	T Aire [K]	T promedio [K]
2350,00	292,16	293,12	292,57	294,11	293,65	292,10	293,12
2400,00	292,67	293,12	292,06	293,59	292,63	291,59	292,81
2450,00	292,16	293,12	293,08	293,59	292,63	291,59	292,92
2500,00	292,67	292,61	292,57	294,11	293,14	291,59	293,02

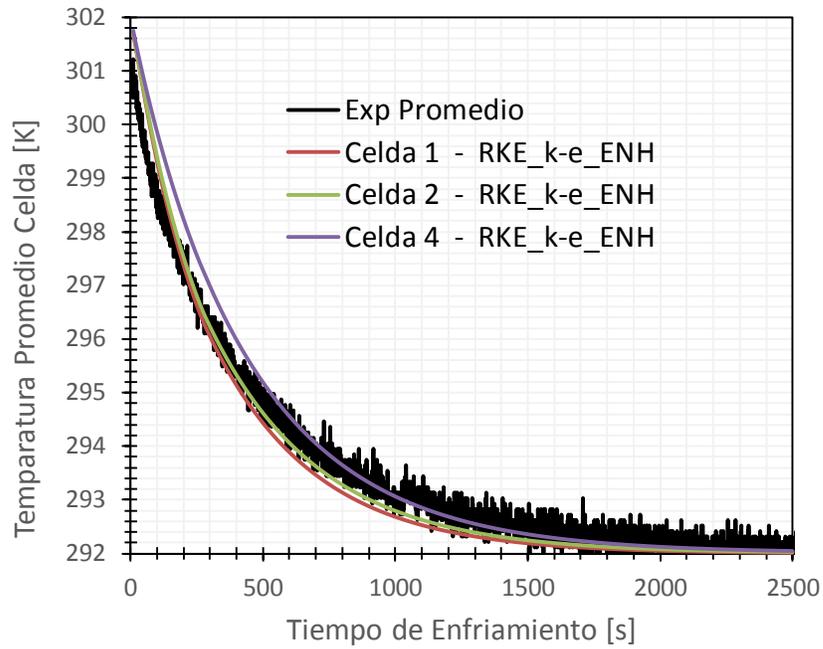
A.3 – Corrección Gráfico para Configuración Escalonada

El gráfico de decaimiento para la configuración escalonada, presentado por Moser, presenta un error en la escala de tiempo, respecto a los datos que el obtuvo. A continuación se presenta una corrección de dicho gráfico, utilizando los datos de la sección A.2:

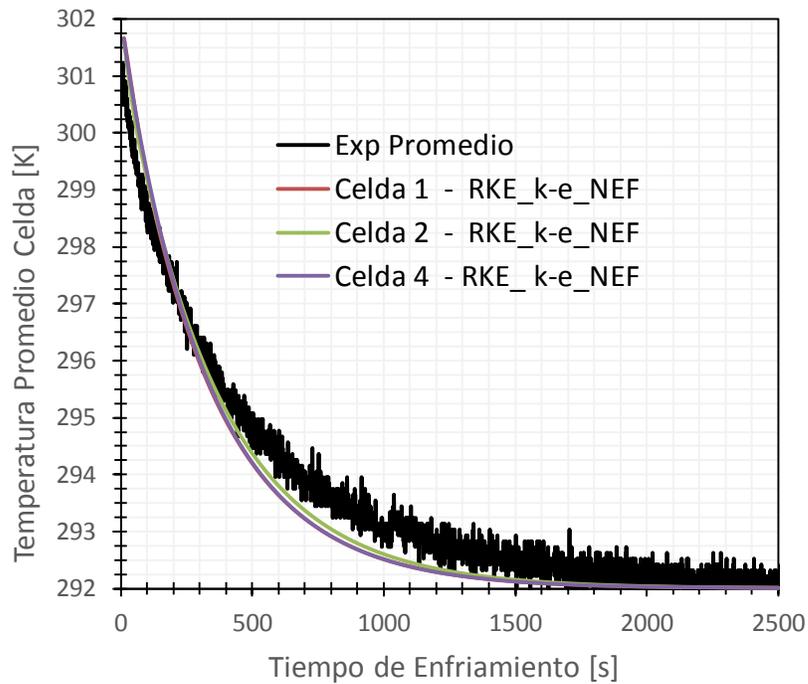


Anexo B. Estudio Sensibilidad Turbulencia

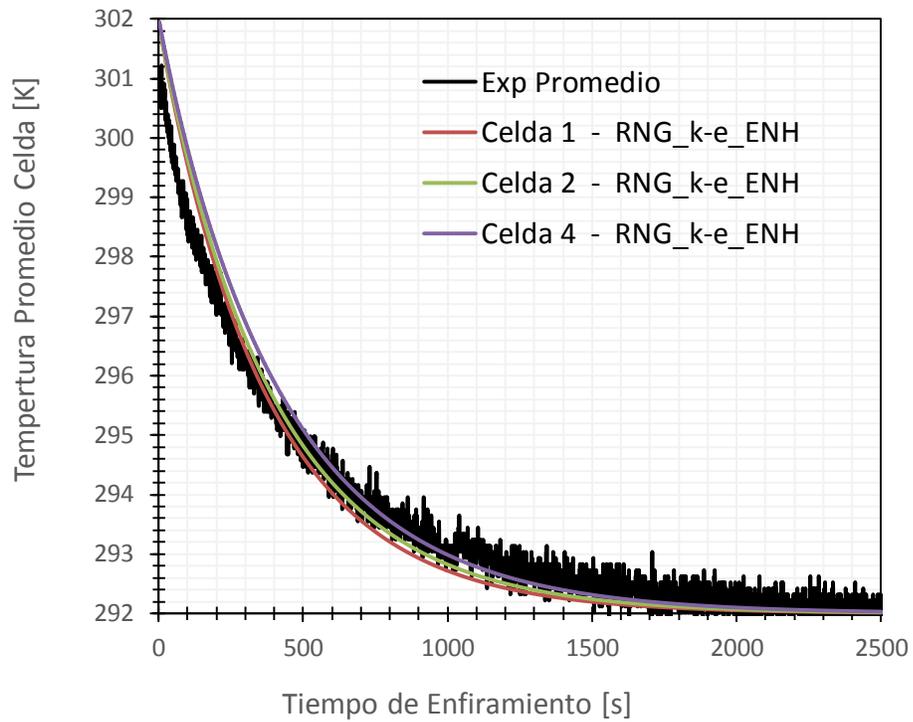
B.1 – Modelo k-e Realizable con tratamiento Enhanced Wall Treatment



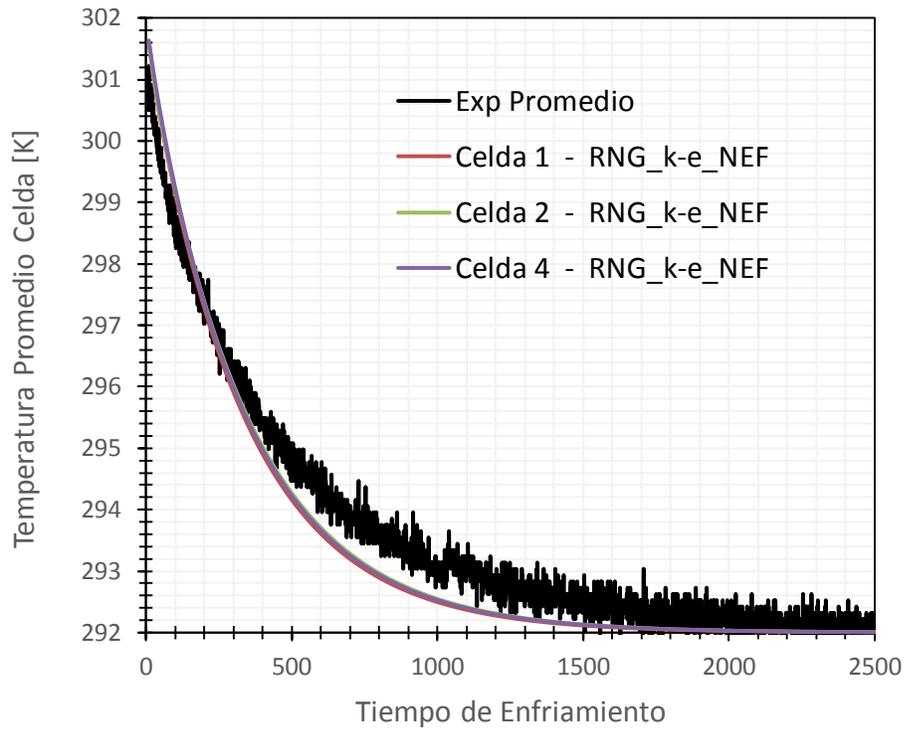
B.2 – Modelo k-e Realizable con tratamiento Non Equilibrium Wall Function



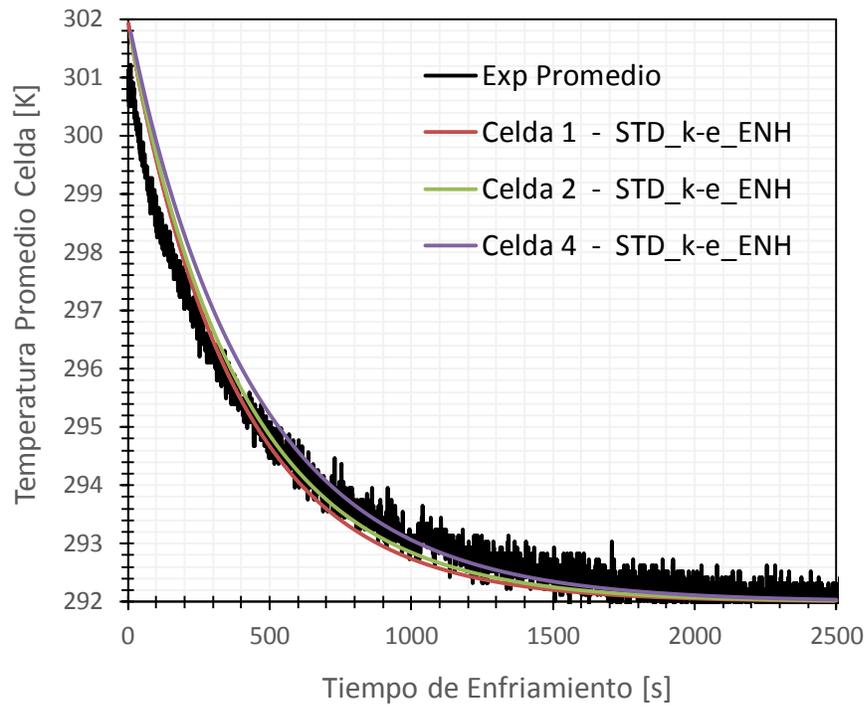
B.3 – Modelo k-e RNG con tratamiento Enhanced Wall Treatment



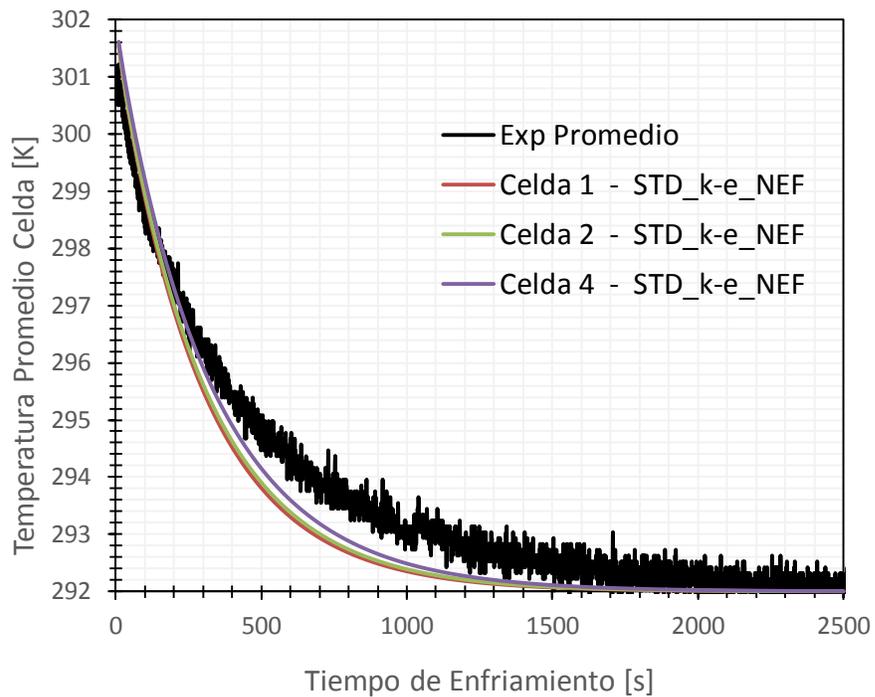
B.4 – Modelo k-e RNG con tratamiento Non Equilibrium Wall Function



B.5 – Modelo k-e Estándar con tratamiento Enhanced Wall Treatment



B.6 – Modelo k-e Estándar con tratamiento Non Equilibrium Wall Function



Anexo C. Tablas de Datos

C.1 –Datos resultado térmico baterías módulo de madera

Tabla C-1: Temperatura decaimiento 5 celdas para simulación del módulo de madera

Tiempo [s]	T [K] Celda 1	T [K] Celda 2	T [K] Celda 3	T [K] Celda 4	T [K] Celda 5
0,00	302,00	302,00	302,00	302,00	302,00
100,00	299,65	299,76	299,65	299,87	299,87
200,00	297,91	298,08	297,92	298,27	298,28
300,00	296,58	296,78	296,59	297,01	297,02
400,00	295,56	295,76	295,56	296,01	296,03
500,00	294,76	294,96	294,77	295,21	295,23
600,00	294,15	294,33	294,16	294,57	294,59
700,00	293,67	293,84	293,68	294,06	294,08
800,00	293,30	293,45	293,31	293,65	293,67
900,00	293,01	293,14	293,02	293,32	293,34
1000,00	292,79	292,90	292,79	293,06	293,08
1100,00	292,61	292,71	292,62	292,85	292,86
1200,00	292,48	292,56	292,48	292,68	292,69
1300,00	292,37	292,44	292,37	292,55	292,56
1400,00	292,29	292,35	292,29	292,44	292,45
1500,00	292,23	292,28	292,23	292,35	292,36
1600,00	292,18	292,22	292,18	292,28	292,29
1700,00	292,14	292,17	292,14	292,22	292,23
1800,00	292,11	292,14	292,11	292,18	292,18
1900,00	292,08	292,11	292,08	292,14	292,15
2000,00	292,06	292,08	292,07	292,12	292,12
2100,00	292,05	292,07	292,05	292,09	292,10
2200,00	292,04	292,05	292,04	292,07	292,08
2300,00	292,03	292,04	292,03	292,06	292,06
2400,00	292,02	292,03	292,02	292,05	292,05
2500,00	292,02	292,03	292,02	292,04	292,04

Tabla C-2: Coeficiente convectivo h 5 celdas para simulación del módulo de madera

Tiempo [s]	h [W/mK] Celda 1	h [W/mK] Celda 2	h [W/mK] Celda 3	h [W/mK] Celda 4	h [W/mK] Celda 5
100	-64,1693	-59,6494	-63,9707	-59,7187	-59,5345
200	-64,4316	-59,9303	-64,2985	-60,2146	-60,0663
300	-64,5615	-60,0014	-64,3836	-60,2340	-60,0749
400	-64,6208	-60,0274	-64,4083	-60,2482	-60,0488
500	-64,6333	-60,0399	-64,4305	-60,2667	-60,0531
600	-64,6300	-60,0472	-64,4485	-60,2854	-60,0877
700	-64,6308	-60,0511	-64,4546	-60,3044	-60,1279
800	-64,6361	-60,0524	-64,4530	-60,3303	-60,1595
900	-64,6404	-60,0526	-64,4512	-60,3611	-60,1868
1000	-64,6407	-60,0525	-64,4522	-60,3935	-60,2181
1100	-64,6394	-60,0525	-64,4541	-60,4259	-60,2545
1200	-64,6389	-60,0523	-64,4549	-60,4582	-60,2917
1300	-64,6394	-60,0518	-64,4545	-60,4909	-60,3271
1400	-64,6400	-60,0512	-64,4540	-60,5238	-60,3611
1500	-64,6400	-60,0505	-64,4540	-60,5566	-60,3950
1600	-64,6397	-60,0499	-64,4542	-60,5888	-60,4290
1700	-64,6395	-60,0492	-64,4543	-60,6206	-60,4627
1800	-64,6395	-60,0485	-64,4542	-60,6519	-60,4956
1900	-64,6396	-60,0478	-64,4541	-60,6828	-60,5277
2000	-64,6395	-60,0470	-64,4540	-60,7132	-60,5592
2100	-64,6394	-60,0463	-64,4540	-60,7431	-60,5903
2200	-64,6394	-60,0456	-64,4540	-60,7724	-60,6207
2300	-64,6393	-60,0448	-64,4539	-60,8012	-60,6505
2400	-64,6393	-60,0441	-64,4538	-60,8295	-60,6797
2500	-64,6392	-60,0433	-64,4538	-60,8572	-60,7083

Tabla C-3: Flujo de calor en superficie 5 celdas para simulación del módulo de madera

Tiempo [s]	Q [W/m ²] Celda 1	Q [W/m ²] Celda 2	Q [W/m ²] Celda 3	Q [W/m ²] Celda 4	Q [W/m ²] Celda 5
100	-395,28	-379,23	-394,41	-358,61	-357,05
200	-301,14	-293,54	-300,97	-281,22	-280,36
300	-231,62	-228,77	-231,44	-222,73	-222,08
400	-178,87	-179,03	-178,77	-177,49	-176,94
500	-138,47	-140,49	-138,51	-141,82	-141,50
600	-107,40	-110,45	-107,53	-113,46	-113,41
700	-83,42	-86,93	-83,57	-90,84	-90,98
800	-64,85	-68,48	-65,00	-72,77	-73,00
900	-50,45	-53,98	-50,59	-58,32	-58,59
1000	-39,25	-42,56	-39,39	-46,74	-47,03
1100	-30,55	-33,57	-30,67	-37,47	-37,76
1200	-23,79	-26,48	-23,89	-30,03	-30,32
1300	-18,52	-20,89	-18,61	-24,07	-24,34
1400	-14,42	-16,48	-14,50	-19,29	-19,54
1500	-11,23	-13,00	-11,30	-15,46	-15,68
1600	-8,74	-10,26	-8,80	-12,39	-12,59
1700	-6,81	-8,10	-6,86	-9,93	-10,10
1800	-5,30	-6,39	-5,35	-7,95	-8,11
1900	-4,13	-5,04	-4,17	-6,37	-6,51
2000	-3,22	-3,98	-3,25	-5,10	-5,22
2100	-2,50	-3,14	-2,53	-4,09	-4,19
2200	-1,95	-2,48	-1,97	-3,27	-3,36
2300	-1,52	-1,96	-1,54	-2,62	-2,69
2400	-1,18	-1,54	-1,20	-2,10	-2,16
2500	-0,92	-1,22	-0,93	-1,68	-1,73

C.2 – Tablas Decaimiento usando distintos materiales de carcasa

M1: Madera / M2: Nitruro de Al. / M3: Espuma de Polímero / M4: / Alúmina / M5: UHMWDPE

Se mantienen 5 decimales para que se pueda verificar que error es solo numérico y por tanto se considera que no hay diferencias de temperatura usando un material carcasa u otra para la condición de carcasa de madera a 292 [K].

Tabla C-4: Decaimiento Celda 4, usando distintos materiales de carcasa

Tiempo [s]	T [K] - M1	T [K] - M2	T [K] - M3	T [K] - M4	T [K] - M5
10	301,71379	301,71365	301,71379	301,71365	301,71365
100	299,64963	299,64982	299,64918	299,64982	299,64983
200	297,91207	297,91204	297,91195	297,91206	297,91199
300	296,58148	296,58147	296,58104	296,58149	296,58136
400	295,55589	295,55593	295,55560	295,55594	295,55587
500	294,76286	294,76292	294,76276	294,76292	294,76290
600	294,14836	294,14841	294,14831	294,14841	294,14839
700	293,67140	293,67146	293,67134	293,67145	293,67142
800	293,30077	293,30084	293,30071	293,30082	293,30079
900	293,01255	293,01262	293,01250	293,01260	293,01256
1000	292,78830	292,78838	292,78827	292,78836	292,78832
1100	292,61379	292,61387	292,61377	292,61385	292,61381
1200	292,47795	292,47802	292,47793	292,47800	292,47796
1300	292,37219	292,37226	292,37217	292,37224	292,37220
1400	292,28984	292,28991	292,28982	292,28988	292,28985
1500	292,22571	292,22578	292,22570	292,22576	292,22572
1600	292,17578	292,17584	292,17577	292,17582	292,17579
1700	292,13689	292,13695	292,13689	292,13693	292,13690
1800	292,10661	292,10667	292,10660	292,10664	292,10662
1900	292,08303	292,08308	292,08302	292,08305	292,08303
2000	292,06466	292,06471	292,06466	292,06469	292,06466
2100	292,05036	292,05040	292,05035	292,05038	292,05036
2200	292,03922	292,03926	292,03922	292,03924	292,03922
2300	292,03054	292,03058	292,03054	292,03056	292,03054
2400	292,02379	292,02382	292,02379	292,02380	292,02379
2500	292,01852	292,01855	292,01852	292,01854	292,01853

Tabla C-5: Decaimiento Celda 1, usando distintos materiales de carcasa

Tiempo [s]	T [K] - M1	T [K] - M2	T [K] - M3	T [K] - M4	T [K] - M5
10	301,74299	301,74304	301,74320	301,74304	301,74306
100	299,87060	299,86940	299,87032	299,86947	299,86989
300	297,01171	297,01009	297,00962	297,01034	297,01120
400	296,01052	296,00847	296,00874	296,00879	296,00956
500	295,21152	295,20925	295,21013	295,20960	295,21026
600	294,57267	294,57032	294,57160	294,57066	294,57119
700	294,06138	294,05904	294,06047	294,05936	294,05974
800	293,65188	293,64965	293,65107	293,64994	293,65017
900	293,32376	293,32170	293,32302	293,32195	293,32206
1000	293,06079	293,05893	293,06012	293,05913	293,05915
1100	292,85002	292,84836	292,84941	292,84852	292,84847
1200	292,68108	292,67964	292,68053	292,67975	292,67965
1300	292,54568	292,54444	292,54518	292,54451	292,54437
1400	292,43716	292,43610	292,43670	292,43614	292,43598
1500	292,35019	292,34930	292,34978	292,34931	292,34914
1600	292,28049	292,27976	292,28013	292,27974	292,27956
1700	292,22464	292,22405	292,22432	292,22401	292,22383
1800	292,17990	292,17942	292,17962	292,17936	292,17920
1900	292,14405	292,14367	292,14381	292,14360	292,14345
2000	292,11534	292,11504	292,11512	292,11496	292,11482
2100	292,09234	292,09211	292,09215	292,09203	292,09189
2200	292,07392	292,07374	292,07376	292,07366	292,07354
2300	292,05917	292,05904	292,05903	292,05895	292,05885
2400	292,04736	292,04726	292,04724	292,04718	292,04709
2500	292,03790	292,03784	292,03780	292,03776	292,03767

Anexo D. Hojas de datos de materiales

Aluminum nitride



Description

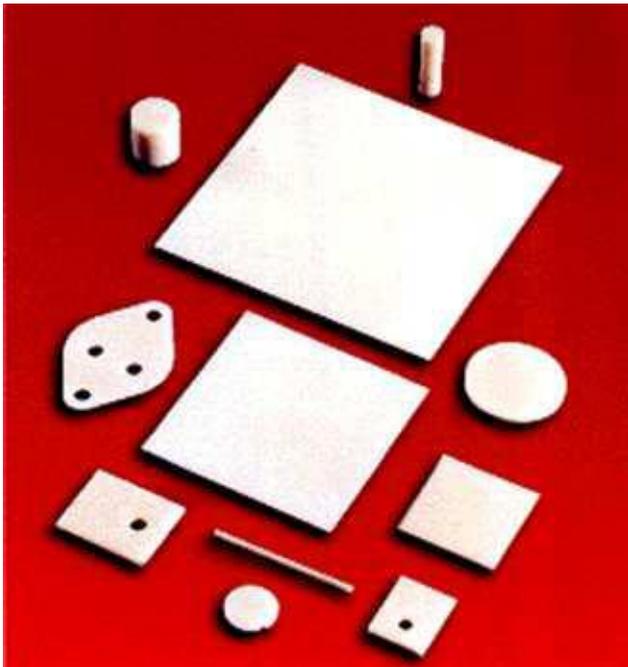
The material

Aluminum nitride, (AlN) has an unusual combination of properties: it is an electrical insulator, but an excellent conductor of heat. This is just what is wanted for substrates for high-powered electronics; the substrate must insulate yet conduct the heat out of the microchips. This, and its high strength, chemical stability and low expansion give it a special role as a heat sinks for power electronics. It is transparent to microwaves and RF frequencies, and thus makes good microwave windows.

Composition (summary)

AlN

Image



Caption

Aluminum nitride components (Ceram Research Ltd).

General properties

Density	3.26e3	- 3.33e3	kg/m ³
Price	* 5e4	- 8e4	CLP/kg

Mechanical properties

Young's modulus	302	- 348	GPa
Yield strength (elastic limit)	* 300	- 350	MPa

Tensile strength	* 300	- 350	MPa
Elongation	0		% strain
Hardness - Vickers	990	- 1.26e3	HV
Fatigue strength at 10 ⁷ cycles	* 168	- 248	MPa
Fracture toughness	2.5	- 3.4	MPa.m ^{0.5}

Thermal properties

Melting point	2.67e3	- 2.78e3	K
Maximum service temperature	* 1.3e3	- 2e3	K
Thermal conductor or insulator?	Good conductor		
Thermal conductivity	140	- 200	W/m.°C
Specific heat capacity	780	- 820	J/kg.°C
Thermal expansion coefficient	4.9	- 5.5	µstrain/°C

Electrical properties

Electrical conductor or insulator?	Good insulator		
------------------------------------	----------------	--	--

Optical properties

Transparency	Opaque		
--------------	--------	--	--

Eco properties

Embodied energy, primary production	* 221	- 244	MJ/kg
CO2 footprint, primary production	* 11.9	- 13.2	kg/kg
Recycle	✘		

Supporting information

Typical uses

Microwave windows; insulators for specialty spark plugs and igniters; substrates and packaging for microcircuits; chip carriers; heat sinks; electronic and semiconductor components; windows; heaters; clamp rings; gas distribution plates.

Alumina

Description

The material

Alumina (Al_2O_3) is to technical ceramics what mild steel is to metals - cheap, easy to process, the workhorse of the industry. It is the material of spark plugs, electrical insulators and ceramic substrates for microcircuits. In single crystal form it is sapphire, used for watch faces and cockpit windows of high-speed aircraft. More usually it is made by pressing and sintering powder, giving grades ranging from 80 to 99.9% alumina - the rest is porosity, glassy impurities or deliberately added components. Pure aluminas are white; impurities make them pink or green. The maximum operating temperature increases with increasing alumina content. Alumina has a low cost and a useful and broad set of properties: electrical insulation, high mechanical strength, good abrasion and temperature resistance up to 1650 C, excellent chemical stability and moderately high thermal conductivity, but it has limited thermal shock and impact resistance. Chromium oxide is added to improve abrasion resistance; sodium silicate, to improve processability but with some loss of electrical resistance.

Competing materials are magnesia, silica and borosilicate glass.

Composition (summary)

Al_2O_3 , often with some porosity and some glassy phase.

Image



Caption

On the left: alumina components for wear resistance and for high temperature use (Kyocera Industrial Ceramics Corp.). On the right: an alumina spark plug insulator.

General properties

Density	3.8e3	- 3.98e3	kg/m ³
Price	* 8.81e3	- 1.32e4	CLP/kg

Mechanical properties

Young's modulus	343	- 390	GPa
Yield strength (elastic limit)	350	- 588	MPa
Tensile strength	350	- 588	MPa
Elongation	0		% strain
Hardness - Vickers	1.2e3	- 2.06e3	HV
Fatigue strength at 10 ⁷ cycles	* 200	- 488	MPa
Fracture toughness	3.3	- 4.8	MPa.m ^{0.5}

Thermal properties

Melting point	2.28e3	- 2.37e3	K
Maximum service temperature	1.35e3	- 1.57e3	K
Thermal conductor or insulator?	Good conductor		
Thermal conductivity	26	- 38.5	W/m.°C
Specific heat capacity	790	- 820	J/kg.°C
Thermal expansion coefficient	7	- 7.9	µstrain/°C

Electrical properties

Electrical conductor or insulator?	Good insulator
------------------------------------	----------------

Optical properties

Transparency	Translucent
--------------	-------------

Eco properties

Embodied energy, primary production	49.5	- 54.7	MJ/kg
CO2 footprint, primary production	2.67	- 2.95	kg/kg
Recycle	✘		

Supporting information

Typical uses

Electrical insulators and connector bodies; substrates; high temperature components; water faucet valves; mechanical seals; vacuum chambers and vessels; centrifuge linings; spur gears; fuse bodies; heating elements; plain bearings and other wear resistant components; cutting tools; substrates for microcircuits; spark plug insulators; tubes for sodium vapor lamps, thermal barrier coatings.

Rigid Polymer Foam (LD)

Description

The material

Polymer foams are made by the controlled expansion and solidification of a liquid or melt through a blowing agent; physical, chemical or mechanical blowing agents are possible. The resulting cellular material has a lower density, stiffness and strength than the parent material, by an amount that depends on its relative density - the volume-fraction of solid in the foam. Rigid foams are made from polystyrene, phenolic, polyethylene, polypropylene or derivatives of polymethylmethacrylate. They are light and stiff, and have mechanical properties that make them attractive for energy management and packaging, and for lightweight structural use. Open-cell foams can be used as filters, closed cell foams as flotation. Self-skinning foams, called 'structural' or 'syntactic', have a dense surface skin made by foaming in a cold mold. Rigid polymer foams are widely used as cores of sandwich panels.

Composition (summary)

Hydrocarbon

Image



Caption

Rigid polystyrene foam is used for wall insulation to reduce heat loss.

General properties

Density	36	- 70	kg/m ³
Price	* 6e3	- 1.2e4	CLP/kg

Mechanical properties

Young's modulus	0.023	- 0.08	GPa
Yield strength (elastic limit)	0.3	- 1.7	MPa
Tensile strength	0.45	- 2.25	MPa
Elongation	2	- 5	% strain

Hardness - Vickers	0.037	- 0.17	HV
Fatigue strength at 10 ⁷ cycles	* 0.296	- 1.36	MPa
Fracture toughness	0.0021	- 0.02	MPa.m ^{0.5}

Thermal properties

Maximum service temperature	340	- 420	K
Thermal conductor or insulator?	Good insulator		
Thermal conductivity	0.023	- 0.04	W/m.°C
Specific heat capacity	1.12e3	- 1.91e3	J/kg.°C
Thermal expansion coefficient	20	- 80	μstrain/°C

Electrical properties

Electrical conductor or insulator?	Good insulator		
------------------------------------	----------------	--	--

Optical properties

Transparency	Opaque		
--------------	--------	--	--

Eco properties

Embodied energy, primary production	* 96.6	- 107	MJ/kg
CO2 footprint, primary production	* 3.68	- 4.07	kg/kg
Recycle	✘		

Supporting information

Typical uses

Thermal insulation, Cores for sandwich structures, Panels, Partitions, Refrigeration, Energy Absorption, Packaging, Buoyancy, Floatation.

Wood

Description

The material

Wood has been used to make products since the earliest recorded time. The ancient Egyptians used it for furniture, sculpture and coffins before 2500 BC. The Greeks and the peak of their empire (700 BC) and the Romans at the peak of theirs (around 0 AD) made elaborate boats, chariots and weapons of wood, and established the craft of furniture making that is still with us today. More diversity of use appeared in Mediaeval times, with the use of wood for large-scale building, and mechanisms such as pumps, windmills, even clocks, so that, right up to end of the 17th century, wood was the principal material of engineering. Since then cast iron, steel and concrete have displaced it in some of its uses, but timber continues to be used on a massive scale, particularly in buildings.

Composition (summary)

Cellulose/Hemicellulose/Lignin/12%H₂O

Image



Caption

Wood remains one of the world's major structural materials, as well finding application in more delicate objects like furniture and musical instruments. The bridge is oak; the body of a violin is spruce, the fingerboard is ebony, the bridge is rosewood and the bow is pernambuco.

General properties

Density	660	- 800	kg/m ³
Price	* 328	- 367	CLP/kg

Mechanical properties

Young's modulus	0.5	- 3	GPa
Yield strength (elastic limit)	* 2	- 6	MPa
Tensile strength	4	- 9	MPa
Elongation	1	- 1.5	% strain
Hardness - Vickers	4	- 8	HV

Fatigue strength at 10 ⁷ cycles	* 1.5	- 2.5	MPa
Fracture toughness	* 0.5	- 0.8	MPa.m ^{0.5}

Thermal properties

Maximum service temperature	390	- 410	K
Thermal conductor or insulator?	Good insulator		
Thermal conductivity	0.15	- 0.19	W/m.°C
Specific heat capacity	1.66e3	- 1.71e3	J/kg.°C
Thermal expansion coefficient	* 31.8	- 42.5	μstrain/°C

Electrical properties

Electrical conductor or insulator?	Poor insulator
------------------------------------	----------------

Optical properties

Transparency	Opaque
--------------	--------

Eco properties

Embodied energy, primary production	* 9.82	- 10.9	MJ/kg
CO2 footprint, primary production	* 0.841	- 0.93	kg/kg
Recycle	✘		

Supporting information

Typical uses

Flooring; furniture; handles; veneer; sculpture, wooden ware; containers; cooperage; laundry appliances; sleepers (when treated); building construction; boxes; crates; planing-mill products; sash; doors; general millwork; framing; sub-flooring; sheathing; boxes; crates, palettes - but these are just a few. Almost every load-bearing and decorative object has, at one time or another, been made from wood.

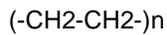
Polyethylene (PE)

Description

The material

POLYETHYLENE, $(-CH_2-)_n$, first synthesized in 1933, looks like the simplest of molecules, but the number of ways in which the $-CH_2-$ units can be linked is large. It is the first of the polyolefins, the bulk thermoplastic polymers that account for a dominant fraction of all polymer consumption. Polyethylene is inert, and extremely resistant to fresh and salt water, food, and most water-based solutions. Because of this it is widely used in household products, food containers like Tupperware and chopping boards. Polyethylene is cheap, and particularly easy to mold and fabricate. It accepts a wide range of colors, can be transparent, translucent or opaque, has a pleasant, slightly waxy feel, can be textured or metal coated, but is difficult to print on.

Composition (summary)



Image



Caption

Low-density PE bottle and medium-density PE pipe.

General properties

Density	939	-	960	kg/m ³
Price	* 849	-	936	CLP/kg

Mechanical properties

Young's modulus	0.621	-	0.896	GPa
Yield strength (elastic limit)	17.9	-	29	MPa
Tensile strength	20.7	-	44.8	MPa
Elongation	200	-	800	% strain
Hardness - Vickers	5.4	-	8.7	HV
Fatigue strength at 10 ⁷ cycles	21	-	23	MPa

Fracture toughness	* 1.44	- 1.72	MPa.m ^{0.5}
--------------------	--------	--------	----------------------

Thermal properties

Melting point	398	- 405	K
---------------	-----	-------	---

Maximum service temperature	* 363	- 383	K
-----------------------------	-------	-------	---

Thermal conductor or insulator?	Good insulator		
---------------------------------	----------------	--	--

Thermal conductivity	0.403	- 0.435	W/m.°C
----------------------	-------	---------	--------

Specific heat capacity	* 1.81e3	- 1.88e3	J/kg.°C
------------------------	----------	----------	---------

Thermal expansion coefficient	126	- 198	μstrain/°C
-------------------------------	-----	-------	------------

Electrical properties

Electrical conductor or insulator?	Good insulator		
------------------------------------	----------------	--	--

Optical properties

Transparency	Translucent		
--------------	-------------	--	--

Eco properties

Embodied energy, primary production	* 77	- 85.1	MJ/kg
-------------------------------------	------	--------	-------

CO2 footprint, primary production	* 2.64	- 2.92	kg/kg
-----------------------------------	--------	--------	-------

Recycle

Recycle mark

Supporting information

Typical uses

Oil container, street bollards, milk bottles, toys, beer crate, food packaging, shrink wrap, squeeze tubes, disposable clothing, plastic bags, paper coatings, cable insulation, artificial joints, and as fibers - low cost ropes and packing tape reinforcement.

Anexo E. Resultados Complementarios Geometrías 2 y 3

E.1 – Resultados Fluidodinámicos

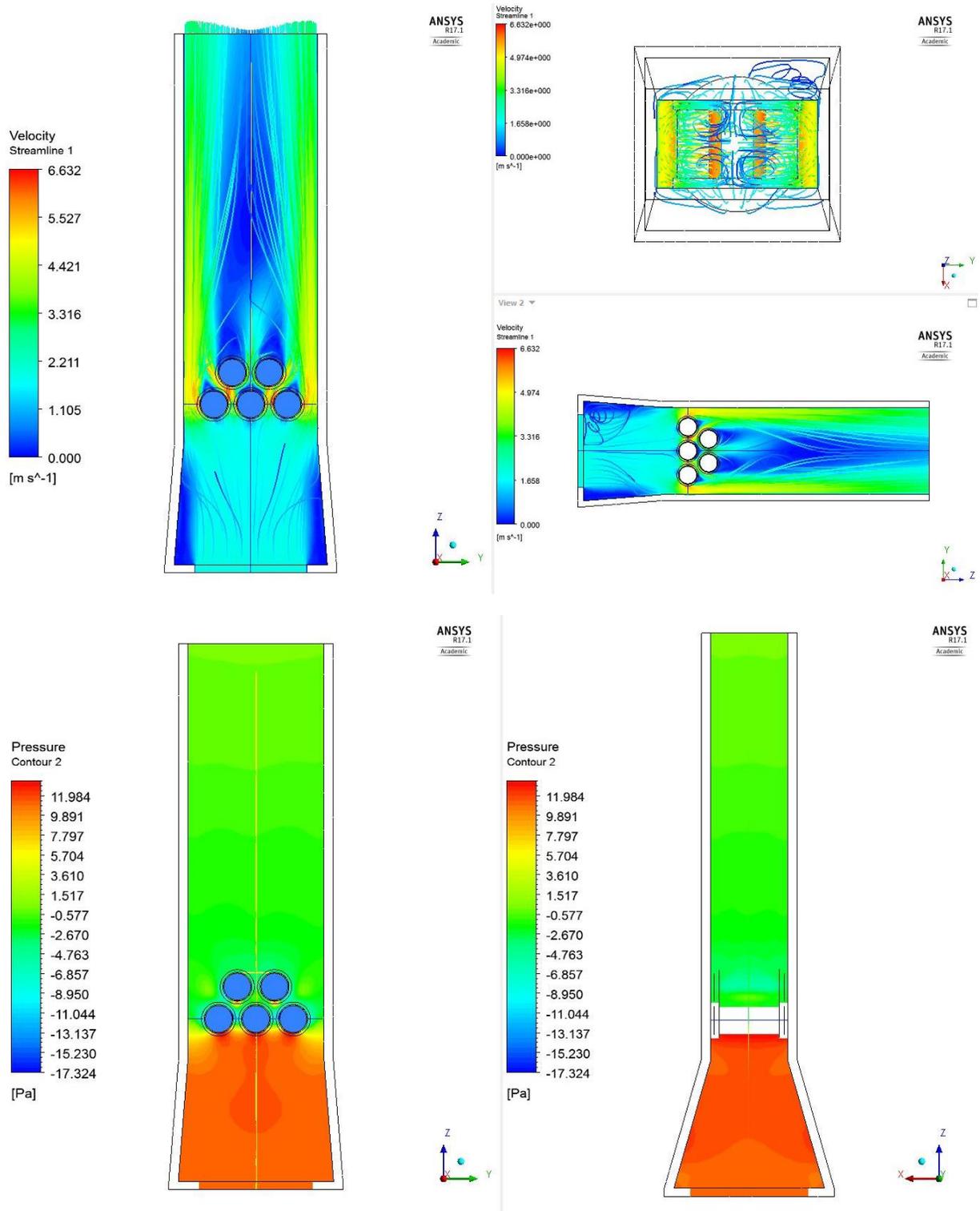


Figura E-1: Velocidad y Presión Geometría 2

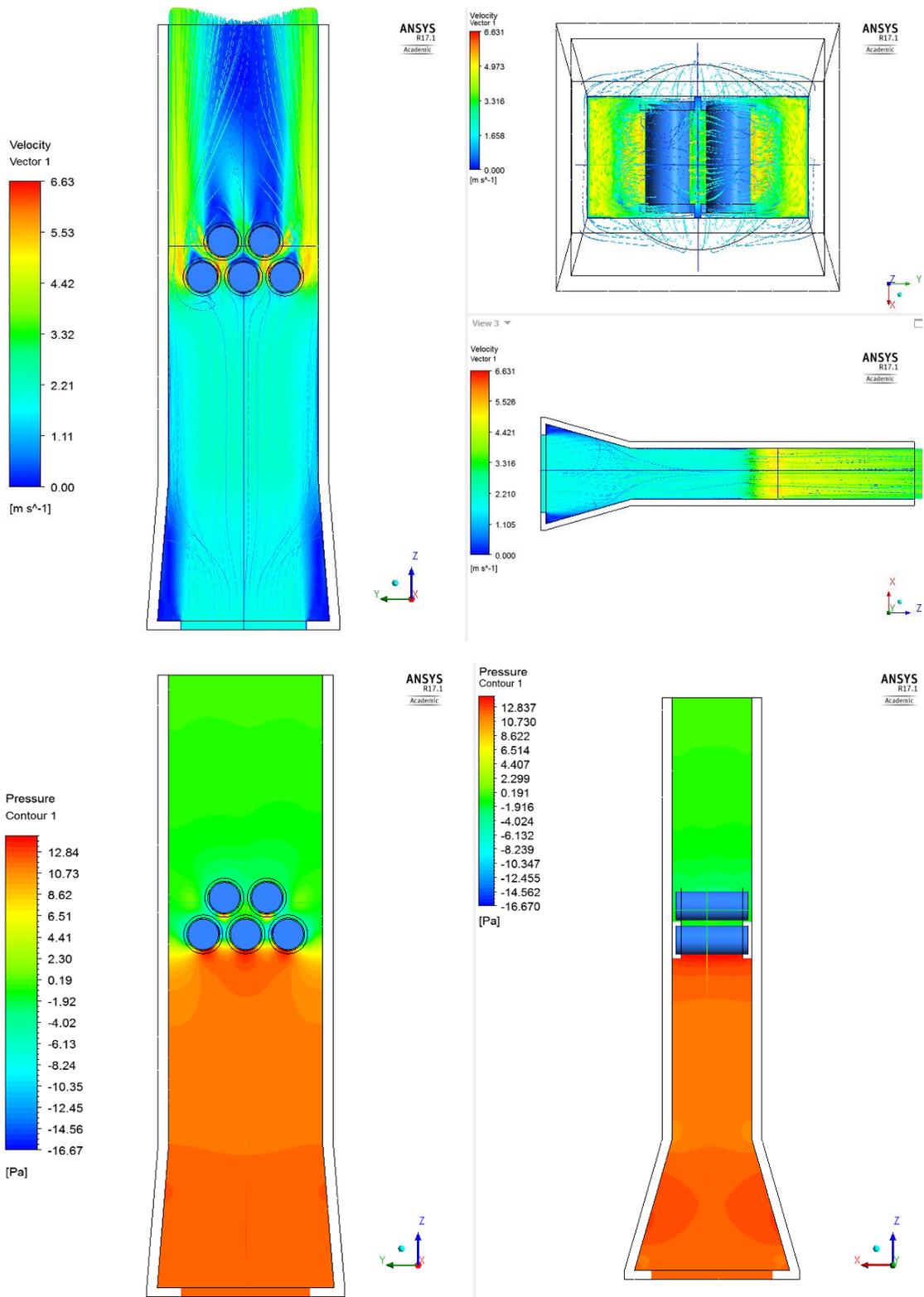


Figura E-2: Velocidad y Presión Geometría 3

E.2 – Comparación térmica según eje Z

Se toma temperatura a lo largo del eje Z del módulo, para distintos tiempos, en línea central de la geometría. Esta línea central se indica en la Figura E-3.

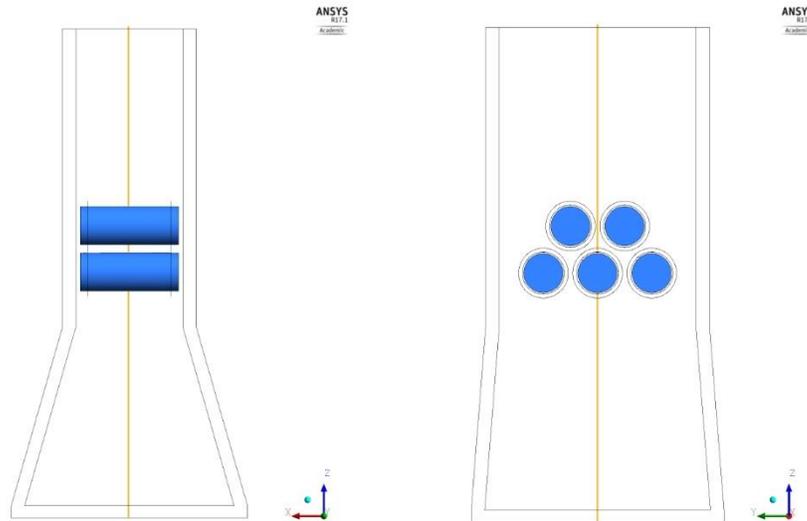


Figura E-3: Línea Central utilizada

E.2.1 - Comparación geometría para refrigeración a 275 [K] constante

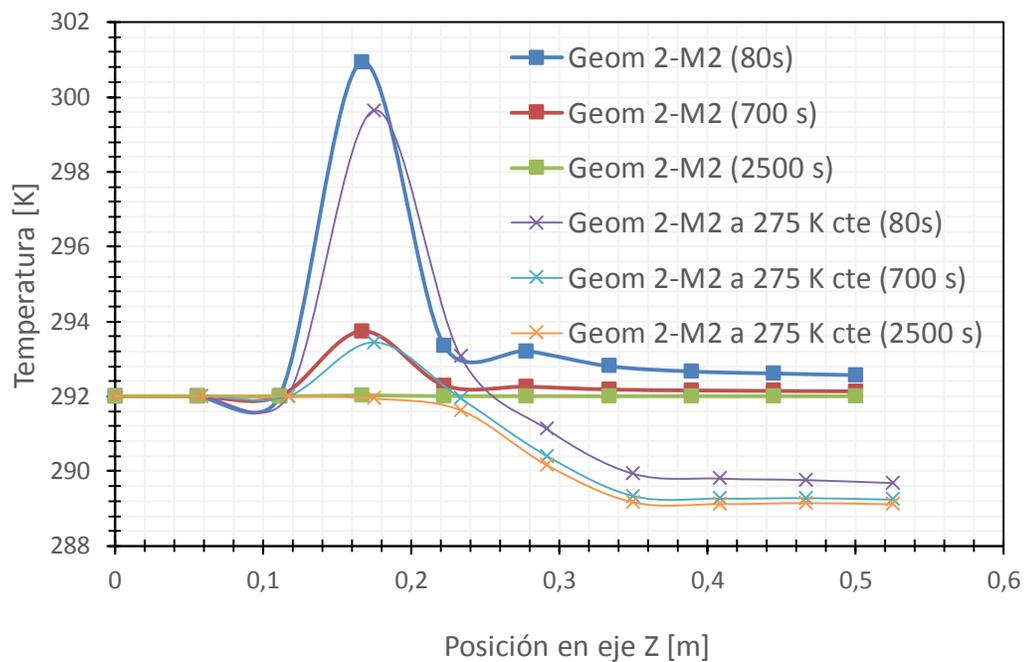


Figura E-4: Comparación Geometría 2 con carcasa M2 (Nitrato de Aluminio) para caso base y caso a 275 [K] cte.

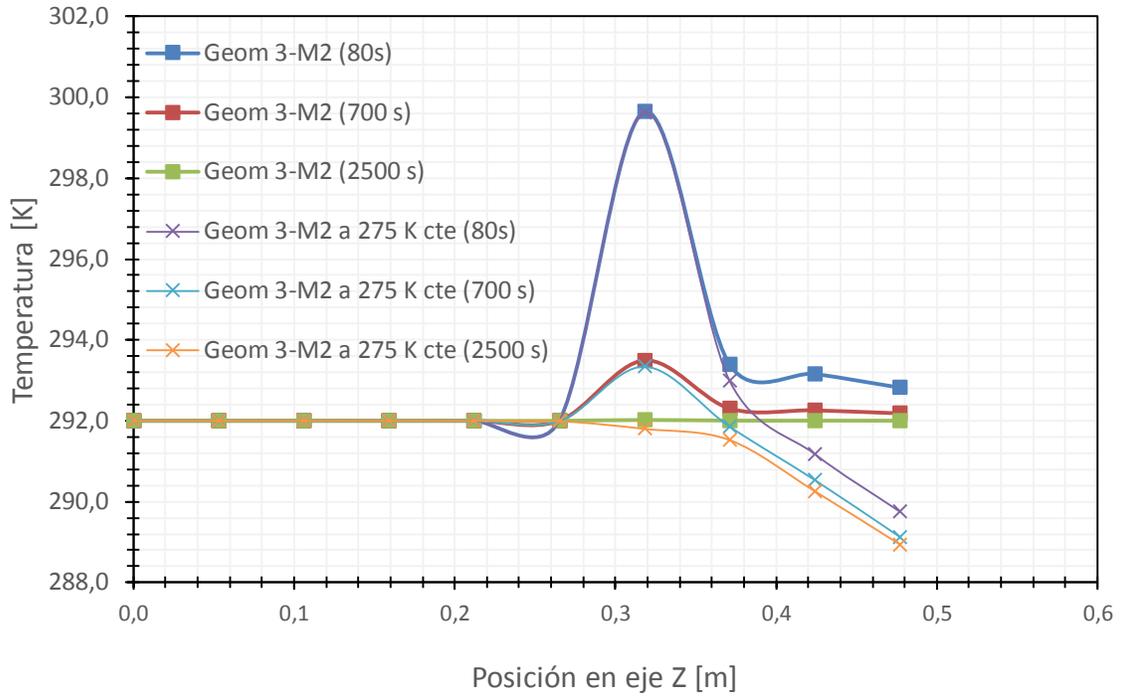


Figura E-5: Comparación Geometría 3 con carcasa M2 (Nitrato de Aluminio) para caso base y caso a 275 [K] cte.

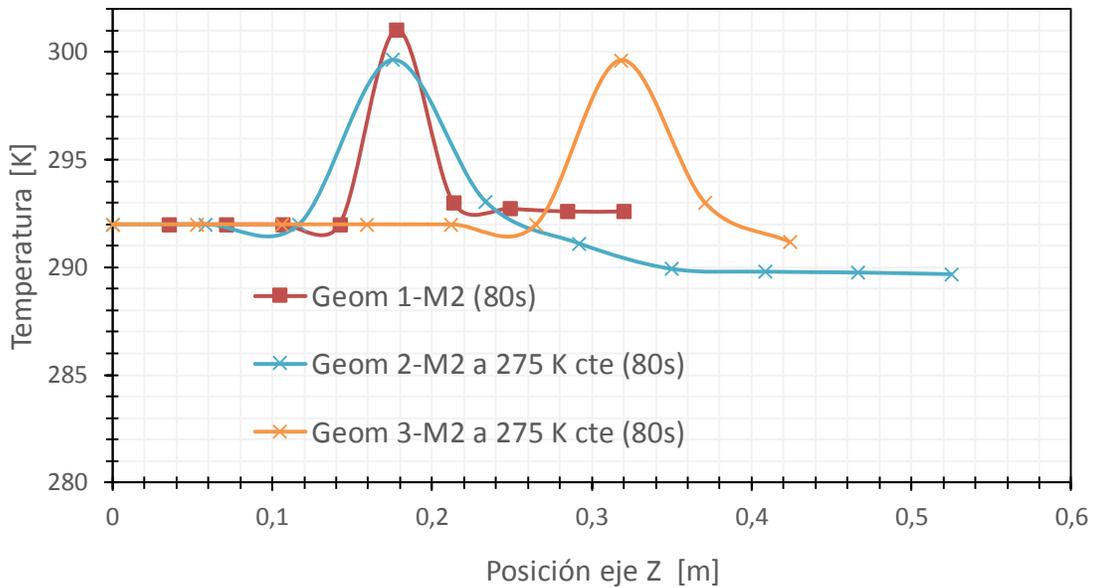


Figura E-6: Comparación Geometría 1-2-3 con carcasa M2 (Nitrato de Aluminio) para tiempo 80s, a 275 [K] cte.

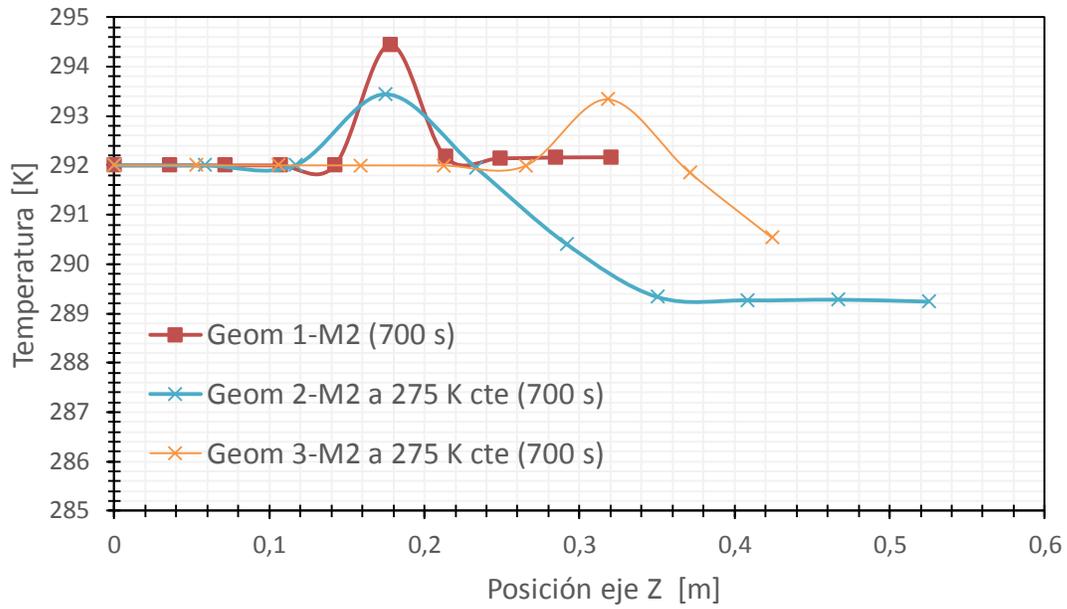


Figura E-7: Comparación Geometría 1-2-3 con carcasa M2 (Nitrato de Aluminio) para tiempo 700s, a 275 [K] cte.

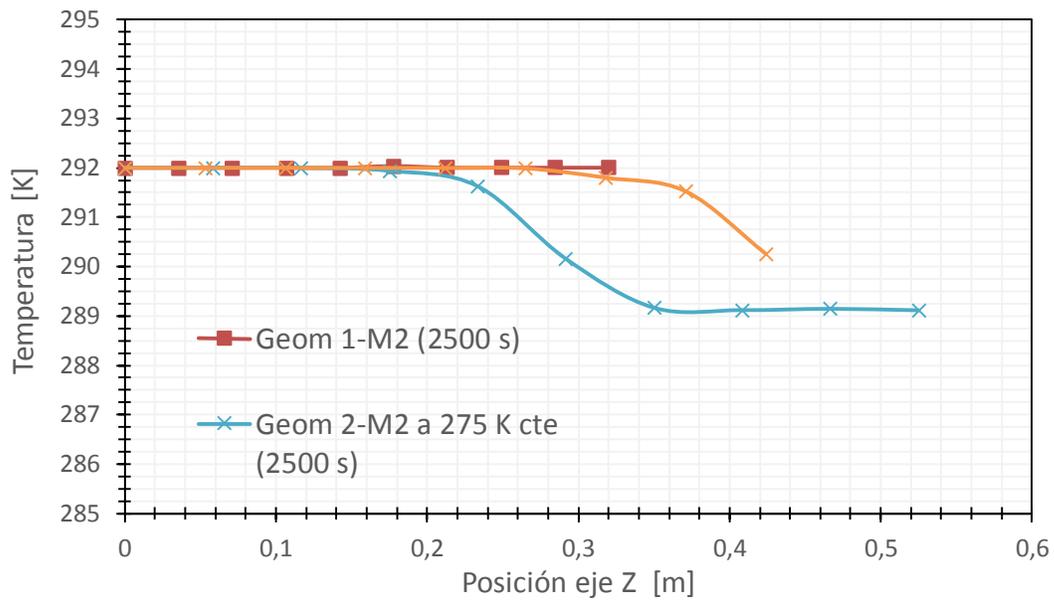


Figura E-8: Comparación Geometría 1-2-3 con carcasa M2 (Nitrato de Aluminio) para tiempo 2500s, a 275 [K] cte.

E.2.2 - Comparación geometría para refrigeración a 275 [K] inicial

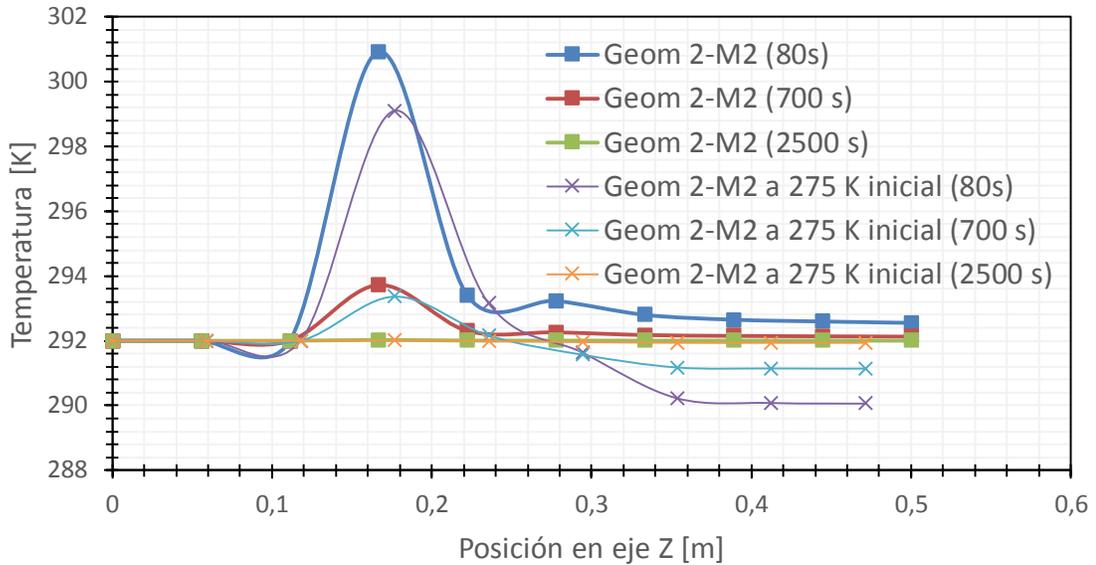


Figura E-9: Comparación Geometría 2 con carcasa M2 (Nitrato de Aluminio) para caso base y caso a 275 [K] inicial

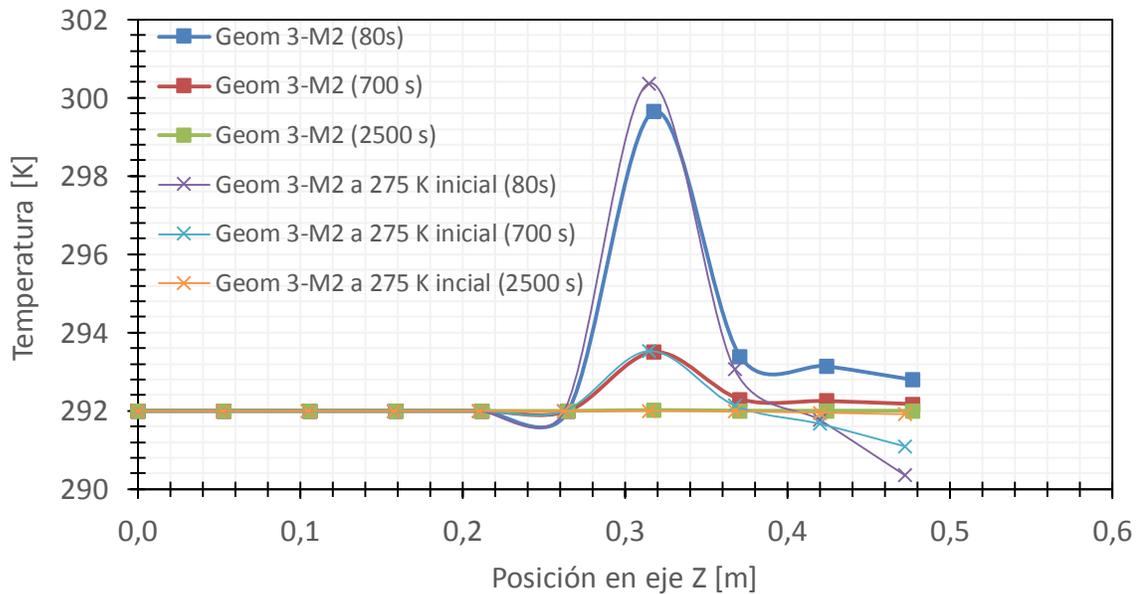


Figura E-10: Comparación Geometría 3 con carcasa M2 (Nitrato de Aluminio) para caso base y caso a 275 [K] inicial

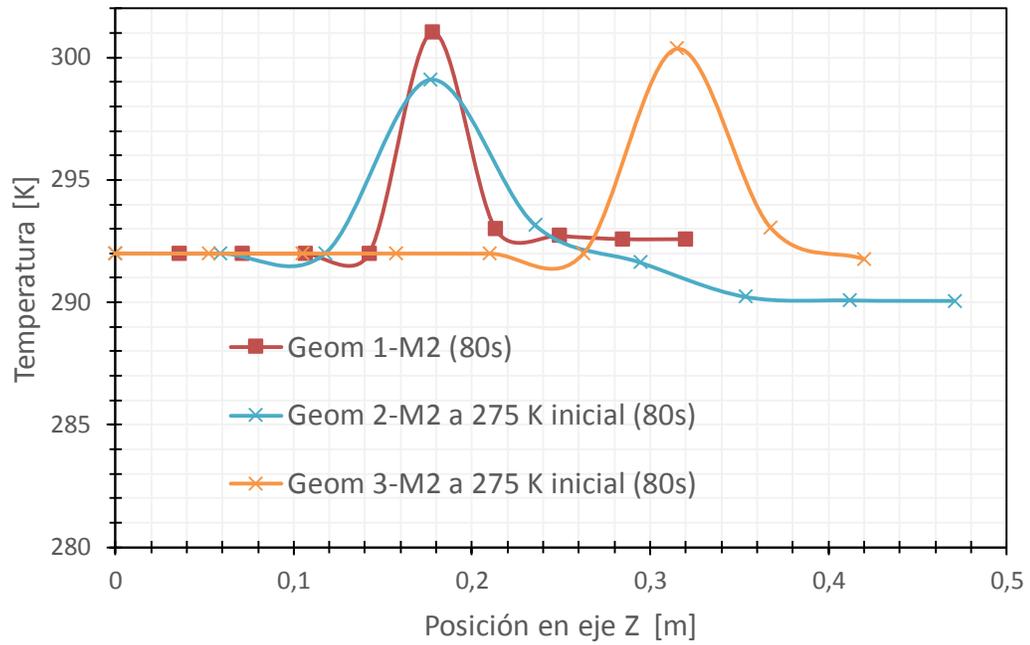


Figura E-11: Comparación Geometría 1-2-3 con carcasa M2 (Nitrato de Aluminio) para tiempo 80s, a 275 [K] inicial

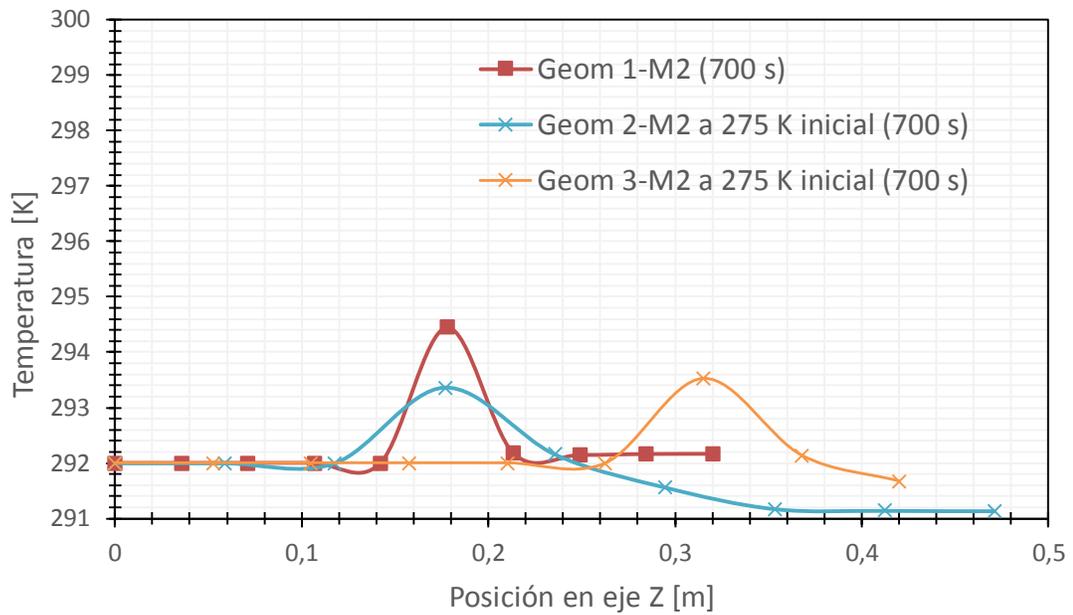


Figura E-12: Comparación Geometría 1-2-3 con carcasa M2 (Nitrato de Aluminio) para tiempo 700s, a 275 [K] inicial

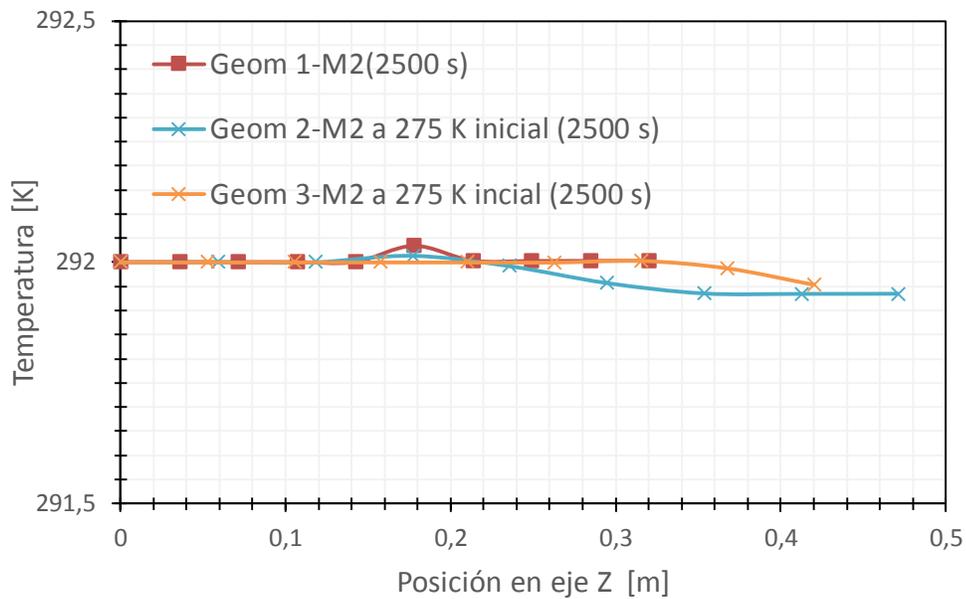


Figura E-13: Comparación Geometría 1-2-3 con carcasa M2 (Nitrato de Aluminio) para tiempo 2500s, a 275 [K] inicial

NOTA

Los gráficos presentados en este anexo se incluyen solo para el interés del lector, pero no son presentados en el cuerpo principal del trabajo ya que de todos ellos la conclusión es una sola:

- Se demuestra que para una misma geometría y un mismo material, el cambio de temperatura de la carcasa como condición de borde, provoca un enfriamiento del aire que a su vez es el causante del tiempo de enfriamiento de las celdas.

Anexo F. Estudio Relacionado - Geometría 4 (10 celdas)

Se ha diseñado una geometría con un empaquetamiento compuesto con dos módulos escalonados. La idea es verificar la interacción entre dos módulos dentro de un empaquetamiento y dar motivación a futuros estudios con geometrías en las la carcasa funcione como elemento activo en la refrigeración de las celdas ion Litio.

F.1 - Fluidodinámica

El resultado fluidodinámico, es consistente con los modelos para otras geometrías. Se aprecia una segunda caída abrupta de presión en el segundo módulo de celdas.

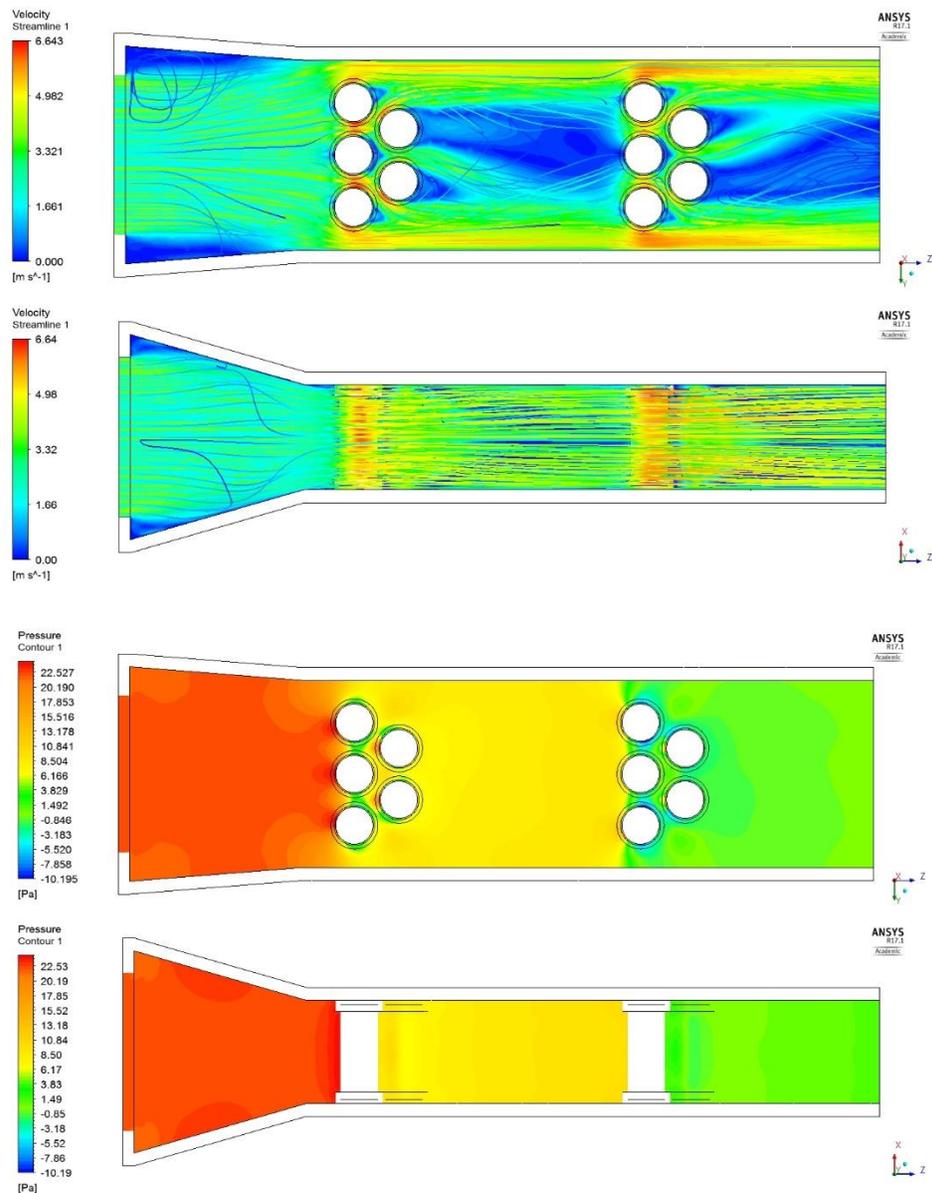


Figura F-1: Presión y Velocidad Geometría 4

F.2 – Caso base – Carcasa Nitrato Aluminio a 292 [K]

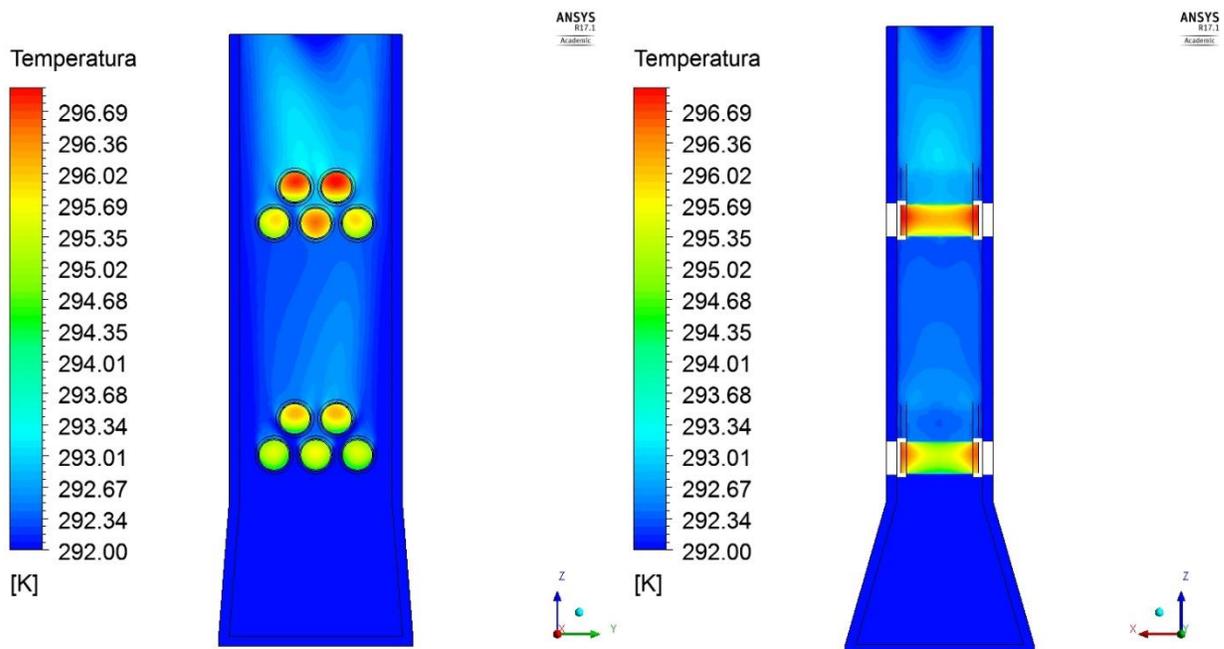


Figura F-2: Temperatura al cabo de 400 [s]

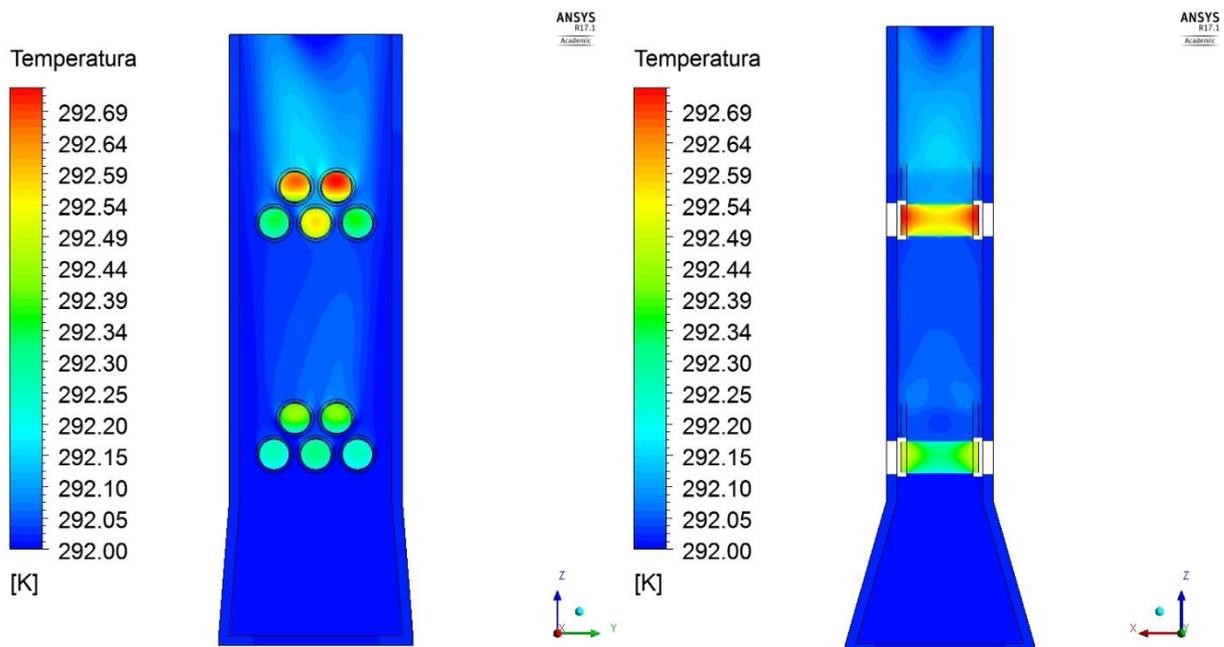


Figura F-3: Temperatura al cabo de 1400 [s]

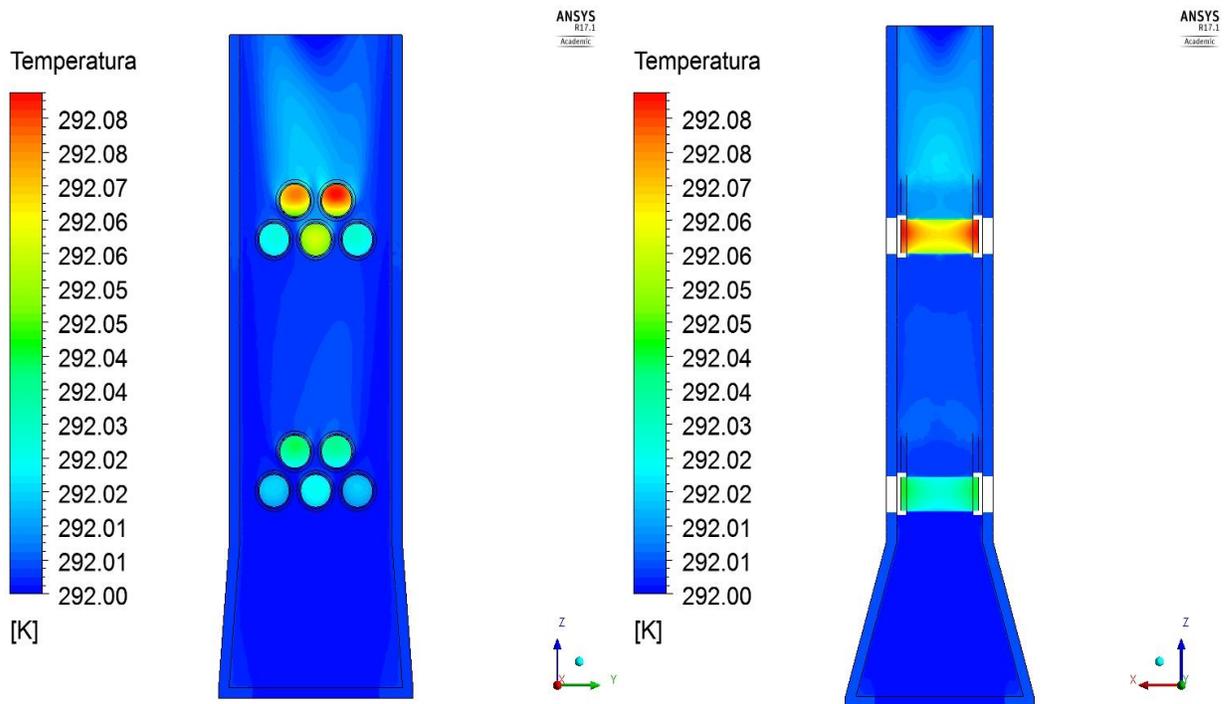


Figura F-4: Temperatura al cabo de 2500 [s]

Se aprecia nuevamente que para el caso base de 292 [K], la geometría no provoca cambios en el tiempo de enfriamiento promedio respecto al montaje original, pero se puede ver que las celdas del módulo más cercano a la salida, están más calientes dado que reciben aire caliente de las celdas del módulo más cercano a la entrada, las cuales funcionan a su vez como generadoras de vórtices aumentando la transferencia de calor.

F.3 Carcasa Nitrato Aluminio a 275 [K]

Si repetimos el caso de refrigeración de la carcasa a 275 [K] se verá a continuación que los vórtices generados por las celdas del primer módulo, potenciarán el efecto refrigerante de la carcasa, manteniendo más frías las celdas del módulo cercano a la salida.

Esto reafirma la teoría planteada en este trabajo, ya que la refrigeración de la carcasa permite disminuir el tiempo de enfriamiento, pero a su vez aquellas celdas que reciben aire con mayor turbulencia se enfrían más rápido.

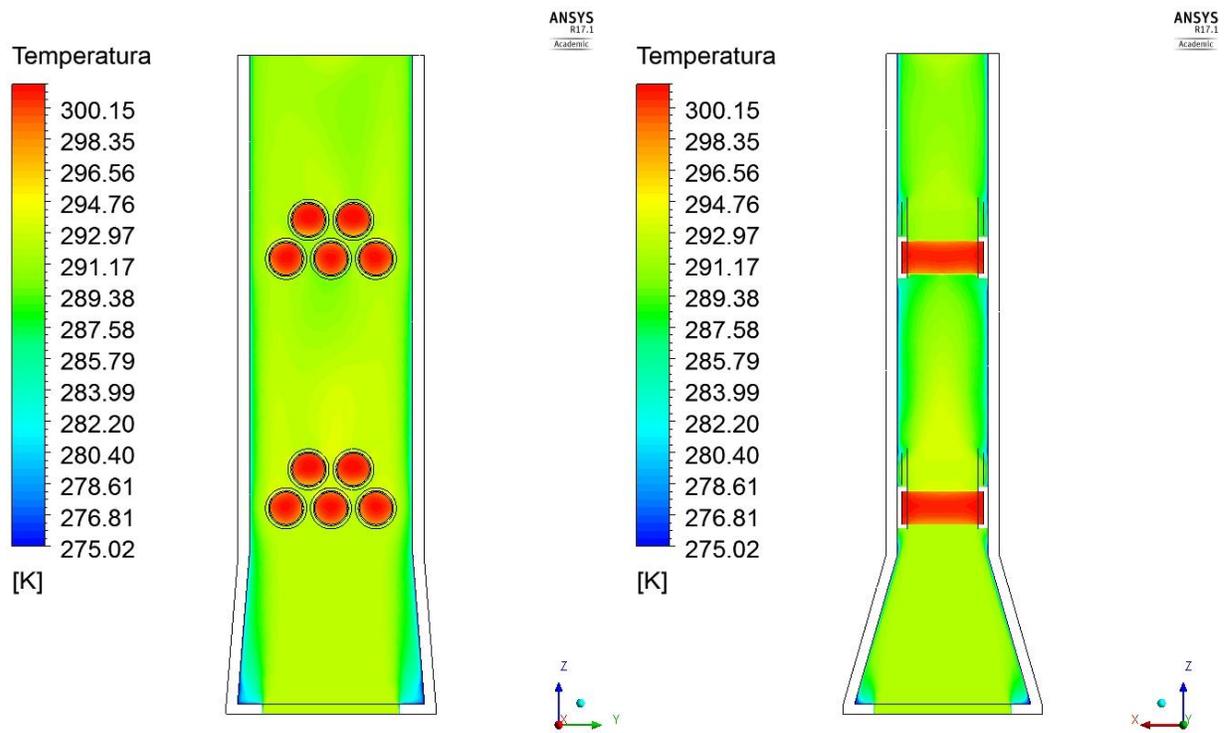


Figura F-5: Temperatura al cabo de 80 [s]

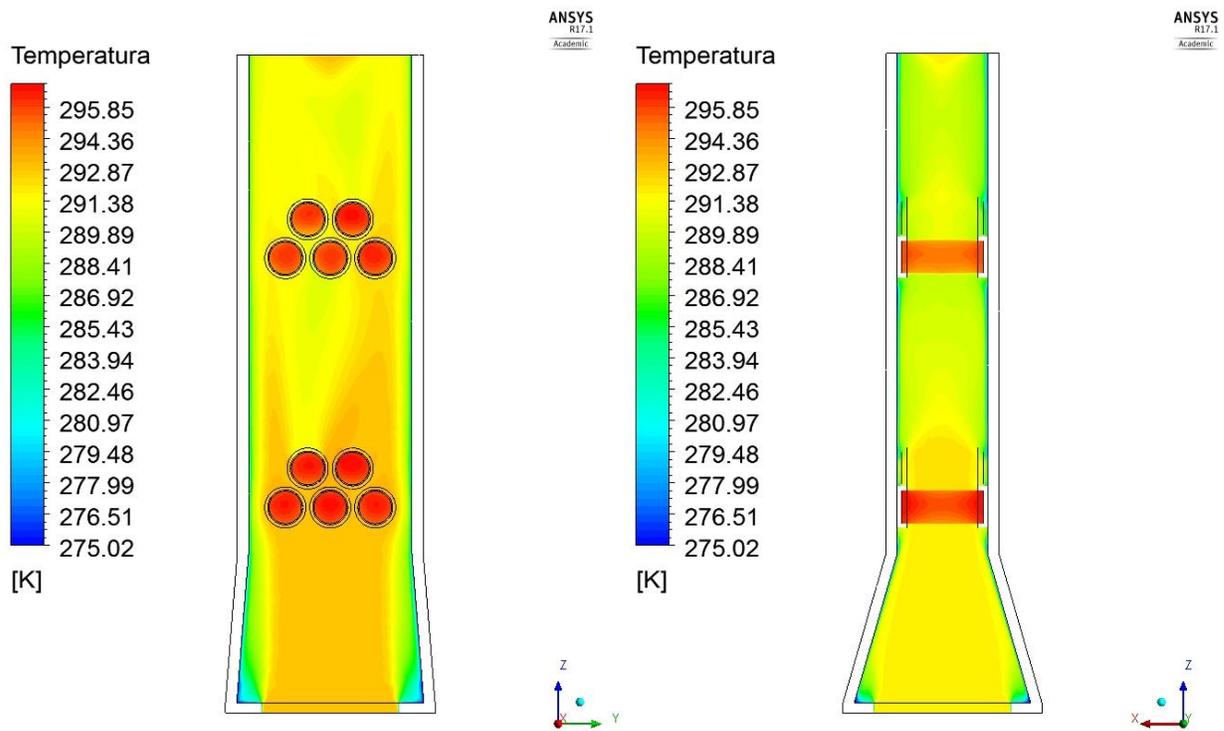


Figura F-6: Temperatura al cabo de 400 [s]

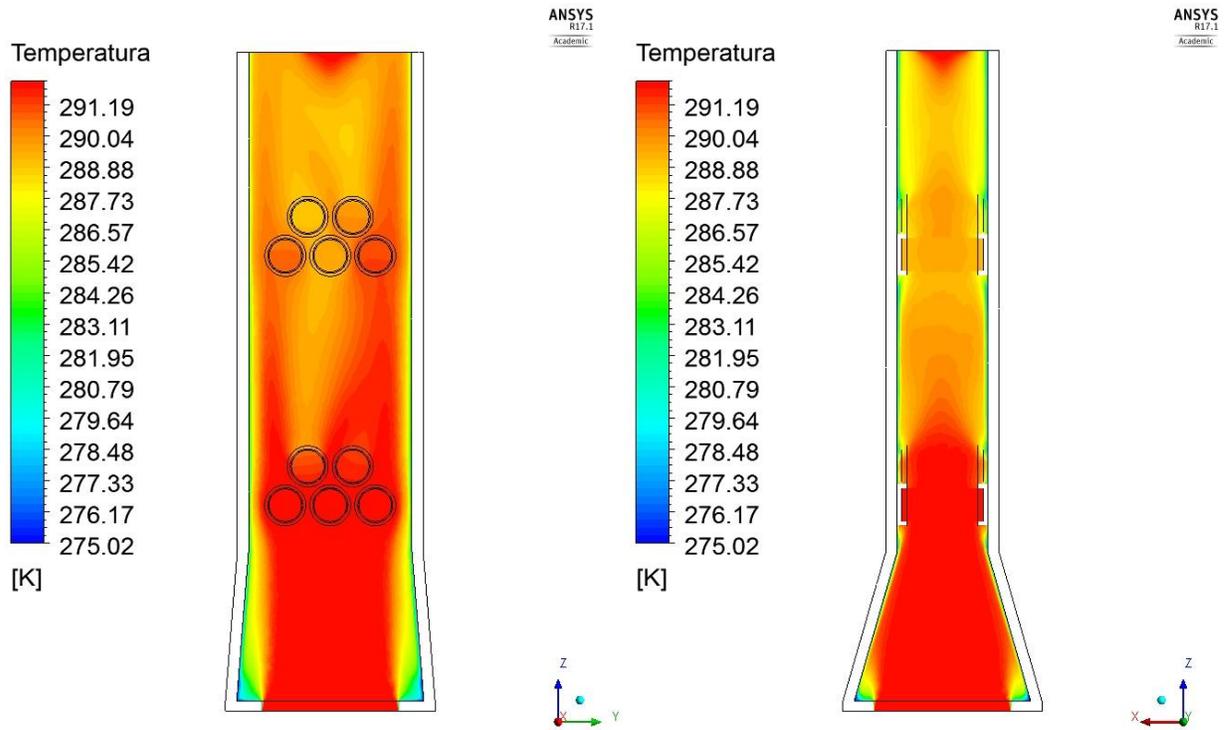


Figura F-7: Temperatura al cabo de 1800 [s]

Se puede apreciar cómo el aire frío se reparte por la carcasa gracias a la turbulencia generada, aumentando el efecto de refrigeración. Esto sugiere que los efectos combinados de refrigeración, turbulencia y superficie de intercambio, pueden ser claves en la interacción entre las celdas de los distintos módulos de un empaquetamiento.