

UNIVERSIDAD PANAMERICANA
FACULTAD DE INGENIERÍA
Con estudios incorporados a la
Secretaría de Educación Pública

**“Análisis de los parámetros de simulación CFD de los
mecanismos de transferencia de calor entre un escudo
térmico multicapa montado sobre el catalizador y el soporte
de la batería de un automóvil”**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
MAESTRÍA EN INGENIERÍA

P R E S E N T A

MARÍA DEL CARMEN SÁNCHEZ HERNÁNDEZ

DIRECTOR DE TESIS:

M.I. RODOLFO RAÚL COBOS TÉLLEZ

CDMX, México 2020

Resumen

El uso de herramientas de análisis computacional de fluidos tiene un papel fundamental en la industria automotriz, sin embargo, la toma de decisiones sigue estando basada en buena parte en las pruebas físicas. Debido a la necesidad de ciclos de desarrollo más cortos es crítico contar con métodos computacionales más certeros que permitan reducir el número de pruebas y tomar decisiones confiables a partir de las simulaciones.

El escape vehicular suele estar cubierto de escudos térmicos multicapa, para proteger a los componentes sensibles a la temperatura como la batería. En la presente tesis se estudia el efecto de la resistencia térmica de contacto en la temperatura superficial de estos escudos. A partir de la metodología propuesta en CFD y de los datos obtenidos de pruebas físicas se determina el valor de la resistencia térmica de contacto que debe ser usada para lograr una buena correlación.

También es propósito de estudio de esta tesis el cálculo de la convección por los métodos de coeficiente de transferencia de calor por convección y temperatura (h y T), así como por velocidad y temperatura (V y T). Se profundiza en el efecto de la asignación de una longitud característica, forzada arbitraria para el caso de V y T y su implicación en la correlación.

Dedicatoria y agradecimientos

A Andrea, porque no hay obstáculos que te impidan lograr lo que realmente deseas, tampoco hay circunstancias perfectas, tú las creas. Apunta alto, da un paso a la vez y cree en ti.

A Salvador, porque me has hecho mejor persona y siempre me has apoyado para lograr lo que quiero.

A mis padres, porque a través de su entrega siempre me han demostrado su amor. Porque valoro cada sacrificio que han hecho para hacerme una mejor persona. Por su ejemplo y congruencia.

A mis hermanos, porque son mis compañeros de vida, con quienes siempre cuento y las personas de quienes más aprendo.

A mis maestros y compañeros de trabajo, por su generosidad al enseñarme.

Índice de contenido

<u>I INTRODUCCIÓN</u>	1
<u>Hipótesis</u>	3
<u>Objetivo general</u>	3
<u>Objetivos específicos</u>	3
<u>Estructura de la tesis</u>	5
<u>CAPITULO 1: ANTECEDENTES</u>	7
<u>1.1</u> Efecto de la temperatura en las baterías plomo-ácido	7
<u>1.2</u> Mecanismos de transferencia de calor	8
<u>1.2.1</u> <i>Conducción</i>	8
<u>1.2.2</u> <i>Radiación</i>	9
<u>1.2.3</u> <i>Convección</i>	10
<u>1.3</u> Resistencia térmica de contacto	10
<u>1.3.1</u> <i>Factores que afectan la resistencia térmica de contacto</i>	13
<u>1.3.2</u> <i>Justificación para la determinación de la resistencia térmica de contacto</i>	13
<u>1.4</u> Coeficiente de transferencia de calor por convección	14
<u>1.4.1</u> <i>Cálculo de coeficiente de transferencia de calor por convección en TAItherm</i>	15
<u>1.5</u> Longitud característica	15
<u>1.5.1</u> <i>Longitud característica forzada</i>	15
<u>1.6</u> Ecuaciones gobernantes de los fluidos	18
<u>1.7</u> Análisis computacional de fluidos	19
<u>1.8</u> Discretización	20
<u>1.9</u> Simulación térmica acoplada con un programa de CFD	21
<u>1.9.1</u> <i>Software utilizado</i>	23
<u>1.9.2</u> <i>Preparación del CAD en ANSA</i>	24
<u>1.9.3</u> <i>Preparación de la simulación para el cálculo de la convección en CFD-ACE y en STAR-CCM+</i>	25

<u>1.9.4</u>	<i>Preparación de la simulación para el modelo térmico en TAITherm</i>	25
	<u>CAPÍTULO 2: DATOS INICIALES PARA ADVERTIR LA FALTA DE CORRELACIÓN</u>	27
	<u>CAPITULO 3: METODOLOGÍA</u>	35
<u>3.1</u>	Separación de los fenómenos de radiación y convección	35
<u>3.1.1</u>	<i>Conducción del catalizador al escudo térmico multicapa que lo cubre</i>	35
<u>3.1.2</u>	<i>Convección que rodea al soporte de la batería</i>	36
<u>3.2</u>	Metodología propuesta para la investigación	37
<u>3.2.1</u>	<i>Etapas de preparación</i>	37
<u>3.2.2</u>	<i>Etapas A: resistencia térmica de contacto del escudo térmico del catalizador</i>	38
<u>3.2.3</u>	<i>Etapas B: longitud característica forzada del escudo térmico del catalizador</i>	39
<u>3.2.4</u>	<i>Etapas C: longitud característica forzada del soporte de la batería</i>	40
	<u>CAPÍTULO 4: RESULTADOS Y DISCUSIÓN</u>	43
<u>4.1</u>	Etapas de preparación: perfil de temperatura y porcentaje de contacto	43
<u>4.2</u>	Etapas A: resistencia térmica de contacto del escudo térmico del catalizador	50
<u>4.3</u>	Etapas B: longitud característica forzada del escudo térmico del catalizador	54
<u>4.4</u>	Etapas C: longitud característica forzada del soporte de la batería	57
<u>4.4.1</u>	<i>Convección que rodea al soporte de la batería</i>	57
<u>4.4.2</u>	<i>Soporte de la batería mediante h y T de STAR-CCM+</i>	60
<u>4.4.3</u>	<i>Soporte de la batería mediante V y T de CFD-ACE</i>	61
	<u>CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES</u>	67
	<u>CAPÍTULO 6: SUGERENCIAS PARA TRABAJOS FUTUROS</u>	69
	<u>Referencias bibliográficas</u>	71

Índice de tablas y figuras

Figura 1	Conducción de calor a través de una pared plana
Figura 2	Catalizador protegido mediante escudo térmico multicapa
Figura 3	Vista microscópica del contacto entre dos superficies
Figura 4	Perfil de temperatura en la zona de contacto de dos superficies
Figura 5	Longitud característica en una placa plana
Figura 6	Longitud característica forzada de acuerdo a la descripción del manual de usuario de TAItherm
Figura 7	Asignación de la longitud característica forzada en TAItherm usando el vector en X
Figura 8	Proceso de discretización
Figura 9	Nube de puntos de convección proveniente de STAR-CCM+ importada en TAItherm
Figura 10	Simulación térmica acoplada a un programa de CFD
Figura 11	Disposición de los componentes dentro del vehículo
Figura 12	Mecanismos de transferencia de calor que afectan la temperatura del soporte de la batería
Figura 13	Estatus reportado inicialmente para el soporte de la batería con escudo térmico
Figura 14	Resultados de la prueba física en la que se identifica que el escudo térmico no es necesario debido a que la temperatura máxima encontrada es de 111°C
Figura 15	Comparativa de las temperaturas de la simulación inicial sin escudo térmico y las temperaturas máximas obtenidas en la prueba física sin escudo térmico
Tabla 1	Comparativa de los resultados de las simulaciones iniciales con los resultados de las pruebas físicas para los cuatro termopares colocados en el soporte de la batería
Figura 16	Ubicación de los cuatro termopares colocados en el escudo térmico del catalizador
Tabla 2	Comparativa de los resultados de las simulaciones iniciales con los resultados de las pruebas físicas para los cuatro termopares colocados en el escudo térmico del catalizador
Figura 17	A la izquierda se muestra una fotografía utilizada para mostrar los pliegues existentes en las depresiones del escudo térmico del catalizador. A la derecha se observa la región definida en TAItherm para representar la conducción

Figura 18	Etapa de preparación en la que se obtiene un perfil de temperaturas del escudo térmico del catalizador que coincide con las temperaturas obtenidas en las pruebas físicas
Figura 19	Etapa A, en la que se obtiene el valor de resistencia térmica de contacto
Figura 20	Etapa B, en la que se obtienen los valores de longitud característica forzada para el escudo térmico del catalizador
Figura 21	Etapa C, en la que se obtienen los valores de longitud característica forzada para el soporte de la batería
Figura 22	Análisis del flujo de aire en el soporte de la batería
Figura 23	Análisis del flujo de aire en el escudo térmico del catalizador
Figura 24	Asignación de regiones de conducción mostrando de lado izquierdo el proceso automático llevado a cabo anteriormente; y de lado derecho, el nuevo proceso manual
Figura 25	Fotografía utilizada para definir el porcentaje de contacto para la zona en las que el escudo térmico se apoya en el catalizador
Figura 26	Ubicación de los cuatro termopares colocados en el escudo térmico del catalizador
Figura 27	Etapa de preparación: perfiles de temperatura obtenidos en TAItherm al variar la asignación de las zonas de contacto y el porcentaje de contacto
Figura 28	Etapa de preparación: perfiles de temperatura obtenidos en TAItherm al variar la resistencia térmica de contacto.
Tabla 3	Etapa de preparación: temperaturas obtenidas en TAItherm al variar el porcentaje de contacto y la resistencia térmica de contacto
Tabla 4	Etapa de preparación: comparación entre los resultados de la segunda iteración y la prueba física para las temperaturas del catalizador
Figura 29	Zona de pliegues encontrados en las ubicaciones uno y dos de los termopares
Figura 30	Etapa A: perfiles de temperatura obtenidos en TAItherm al variar la resistencia térmica de contacto
Tabla 5	Etapa A: temperaturas obtenidas en TAItherm al variar la resistencia térmica de contacto
Tabla 6	Etapa A: comparación entre los resultados de la segunda iteración y la prueba física para las temperaturas del catalizador
Figura 31	De lado izquierdo se muestra la asignación de contacto del caso h y de lado derecho se muestra la asignación de regiones con pliegues observados en la fotografía de la figura 21

Figura 32	Etapa A: el caso j muestra el mapa de temperaturas obtenido en TAItherm al incluir el contacto por pliegues, identificado en la fotografía del catalizador
Tabla 7	Etapa A: temperaturas obtenidas en TAItherm al incluir el contacto por pliegues en la simulación
Tabla 8	Etapa A: comparación entre los resultados de la segunda iteración con pliegues y la prueba física para las temperaturas del catalizador
Figura 33	Etapa B: perfiles de temperatura obtenidos en TAItherm al variar la longitud característica forzada
Tabla 9	Etapa B: comparativa de temperaturas obtenidas en TAItherm para los casos h y n
Figura 34	Etapa B: temperaturas obtenidas en TAItherm al incluir el contacto por pliegues en la simulación
Tabla 10	Etapa B: temperaturas obtenidas en TAItherm al incluir el contacto por pliegues en la simulación
Tabla 11	Comparación entre los resultados de la tercera iteración con pliegues y la prueba física para las temperaturas del catalizador
Tabla 12	Etapa A vs B: Comparativa de las temperaturas obtenidas en las etapas A y B antes y después de incluir los pliegues
Figura 35	Comparativa de las temperaturas obtenidas en las etapas A y B, incluyendo los pliegues durante la simulación
Figura 36	Vista frontal (a la izquierda) y superior (a la derecha), del perfil de temperatura en el soporte de la batería para la convección en CFD-ACE
Figura 37	Vista frontal (a la izquierda) y superior (a la derecha) del perfil de temperatura en el soporte de la batería para la convección en STAR-CCM+
Figura 38	Vista frontal (a la izquierda) y superior (a la derecha) del perfil de velocidad en el soporte de la batería para la convección en CFD-ACE
Figura 39	Vista frontal (a la izquierda) y superior (a la derecha) del perfil de velocidad en el soporte de la batería para la convección en STAR-CCM+
Figura 40	Comparativa de las temperaturas del soporte de la batería, obtenidas en la prueba física y las generadas CFD a través de h y T
Tabla 13	Comparativa de las temperaturas del soporte de la batería obtenidas en la prueba física, las reportadas inicialmente en CFD y las generadas a través de h y T

Tabla 14	Comparativa de las temperaturas del soporte de la batería obtenidas en la prueba física y las reportadas inicialmente en CFD
Tabla 15	Comparativa de las temperaturas del soporte de la batería obtenidas en la prueba física y las generadas a través de h y T, con la correcta selección de parámetros de simulación
Figura 41	Comparativa de las temperaturas del soporte de la batería obtenidas en la prueba física y las generadas CFD a través de V y T, capturando los pliegues
Tabla 16	Comparativa de las temperaturas del soporte de la batería obtenidas en la prueba física, las reportadas inicialmente en CFD y las generadas a través de V y T
Tabla 17	Comparativa de las temperaturas del soporte de la batería obtenidas en la prueba física y las reportadas inicialmente en CFD
Tabla 18	Comparativa de las temperaturas del soporte de la batería obtenidas en la prueba física y las generadas a través de V y T, con la correcta selección de parámetros de simulación para el catalizador
Figura 42	Etapas C: temperaturas obtenidas en TAITherm al variar la longitud característica forzada del soporte de la batería
Tabla 19	Comparativa de las temperaturas del soporte de la batería, obtenidas en la prueba física, y las reportadas en CFD a través de V y T, con los valores de longitud característica forzada iniciales y los encontrados
Tabla 20	Comparativa de las temperaturas del soporte de la batería, obtenidas en la prueba física y las reportadas en CFD a través de V y T, con los valores de longitud característica forzada iniciales
Tabla 21	Comparativa de las temperaturas del soporte de la batería, obtenidas en la prueba física y las reportadas en CFD a través de V y T, con los valores de longitud característica forzada encontrados
Tabla 22	Comparativa de las temperaturas del soporte de la batería, obtenidas mediante la prueba física y a través de CFD con el uso de los parámetros de simulación correctos para V y T y para h y T
Figura 43	Comparativa de las temperaturas del soporte de la batería, obtenidas mediante la prueba física y a través de CFD con el uso de los parámetros de simulación correctos para V y T y para h y T
Tabla 23	Comparativa de las temperaturas del soporte de la batería, obtenidas mediante la prueba física y a través de CFD con el uso de los parámetros de simulación correctos para h y T
Tabla 24	Comparativa de las temperaturas del soporte de la batería, obtenidas mediante la prueba física y a través de CFD con el uso de los parámetros de simulación correctos para V y T

Introducción

La industria automotriz en la actualidad se encuentra frente a una competencia intensa, tiempos de diseño más cortos y requerimientos de los clientes cada día más estrictos. Por una parte, tenemos autos en los que se incrementa el número de componentes complejos y por otra, ciclos de vida más cortos que provocan lanzamientos más acelerados.

La reducción de la acumulación de calor dentro de los vehículos y asegurar los niveles adecuados de temperatura vehicular puede conducir a una mayor economía de combustible, alcance, confiabilidad, longevidad, comodidad de los pasajeros y seguridad del vehículo. Los avances en la gestión térmica de vehículos siguen siendo clave a medida que surgen y evolucionan nuevas tecnologías, la demanda de los consumidores, las preocupaciones sociales y las regulaciones gubernamentales (Marshall, et al., 2019).

El compartimiento del motor es un lugar en donde se encuentra el colector de escape que emite calor, el flujo de aire caliente que sale del radiador y componentes sensibles a la temperatura como la batería. Para lograr que todos estos componentes se encuentren en este espacio se agregan escudos térmicos que aíslan las altas temperaturas del escape.

Un diseño ingenieril optimizando el costo y peso es obligatorio para el desarrollo de escudos térmicos en el sistema de escape, con una pérdida de calor mínima. Los parámetros de diseño del escudo térmico, como el tipo de material de aislamiento, la composición del material de aislamiento, el grosor del aislamiento, la densidad del aislamiento, el grosor del espacio de aire y el material de la capa exterior, se estudian por sus influencias en la temperatura de la piel mediante cálculos matemáticos, Análisis Computacional de Fluidos y medición (Rajadurai, y S., A., 2019).

La industria automotriz cada vez hace mayor uso de herramientas de análisis computacional para poder cumplir con tiempos de diseño más cortos y reducir los costos de la experimentación física. Las herramientas del Análisis Computacional de Fluidos permiten predecir, a través de métodos numéricos y algoritmos, problemas como la transferencia de calor y la dinámica de los fluidos.

Los programas usados para el análisis de Análisis Computacional de Fluidos (CFD por sus siglas en inglés), son sumamente flexibles y están diseñadas para una multitud de aplicaciones, permiten que sea el usuario quien determine las variables de simulación que más se apeguen a sus necesidades. Es imprescindible una buena elección de los parámetros de simulación, como lo son materiales, espesores, temperaturas y la resistencia de contacto, para que la correlación con los resultados del túnel de viento y las pruebas físicas pueda ser válida.

Si bien las herramientas de CFD son muy comunes para simular láminas de metal, todavía es inusual simular diseños de escudos térmicos formados por combinaciones de capas de distintos

materiales, el llamado “material sándwich”. Incluso los proveedores de software CAE no tienen mucha experiencia en modelar este material compuesto. La construcción y montaje de las diferentes capas en forma de escudo térmico es un aspecto importante de la simulación, pero también dificulta mucho el modelado (Zika-Beyerlein, B., Köstler, S., y Friedow, T., 2005).

En FCA México, mediante herramientas de CFD, se ha llevado a cabo el análisis térmico del compartimiento de motor para un vehículo, y los resultados han sido de mucha utilidad para la toma de decisiones a lo largo de las fases del programa de desarrollo. El vehículo fue lanzado al mercado y actualmente se busca hacerle mejoras que permitan reducir tiempos de manufactura, peso y costos, sin sacrificar su buen desempeño.

En este documento estudiaremos el caso particular del soporte de la batería, ubicado en una zona cercana al catalizador. En la fase inicial de diseño el grupo de CFD sugirió, a partir de los resultados de las simulaciones, agregarle al soporte de la batería un escudo térmico multicapa, adicional al escudo térmico que cubre el catalizador. Más adelante, ya lanzado al mercado el vehículo se identificó, como parte de las propuestas de reducción de costo, que el escudo del soporte de la batería no era necesario y que las temperaturas de CFD tenían una sobreestimación.

La adición de un escudo térmico innecesario por sobreestimación de temperatura de CFD implicó tiempos y costos adicionales al programa, por lo que fue crítico identificar las razones de la falta de correlación y generar una propuesta de parámetros de simulación adecuados y basados en los fenómenos físicos involucrados que permitiera predecir de manera correcta las temperaturas.

Hipótesis

“Mejorar la correlación actual entre los resultados de pruebas físicas y los análisis numéricos en las simulaciones de CFD, mediante el ajuste de parámetros relacionados con la convección que recibe el soporte de la batería y la conducción entre el catalizador y su escudo térmico”

Preguntas de investigación

- ¿Cuáles son los parámetros de simulación que afectan la correlación y en qué medida lo hacen?
- ¿Cómo se deben modificar los parámetros de simulación para hacer que logren ser más representativas de los fenómenos físicos?
- ¿Son los programas de CFD usados, capaces de representar en su totalidad los fenómenos físicos planteados en esta tesis y lograr una correcta representación para el soporte de la batería?
- ¿Es posible reducir el peso y costo de componentes vehiculares a partir de una mejora en los parámetros de simulación que permita tomar mejores decisiones?

Objetivo general

El objetivo general del presente trabajo es desarrollar un método que permita simular los fenómenos de transferencia de calor que afectan el soporte de la batería del vehículo y el escudo térmico del catalizador para lograr una óptima correlación con las pruebas físicas.

Objetivos específicos

Para poder lograr el objetivo general, se proponen los siguientes objetivos específicos:

- Tomar en consideración los factores que afectan el mapeo de la transferencia de calor por convección al soporte de la batería y por conducción del catalizador hacia su escudo térmico.
- Comparación de pruebas físicas del vehículo en el túnel de viento con simulaciones a través de TAITherm, CFD-ACE+ y STAR-CCM+.
- Determinar los parámetros de simulación que deben ser ingresados a los programas de CFD para arrojar una mejor correlación con las pruebas físicas.

Estructura de la tesis

La presente tesis está constituida por cinco capítulos. A continuación, se enlista una breve explicación de su contenido:

1.-En el primer capítulo titulado **Antecedentes**, se analiza el efecto de la temperatura en las baterías, los mecanismos de transferencia de calor, la resistencia térmica de contacto, el coeficiente de transferencia de calor por convección y la longitud característica. Se habla acerca de las ecuaciones gobernantes de los fluidos, de la discretización y de cómo una simulación térmica es acoplada con un programa de CFD.

2.-En el segundo capítulo llamado **Datos iniciales para advertir la falta de correlación**, se muestran los resultados arrojados para el soporte de batería y el catalizador. De acuerdo con las simulaciones de CFD iniciales, se comparan con los resultados de las pruebas físicas y se discute la falta de correlación encontrada.

3.- En el tercer capítulo nombrado **Metodología**, se describe la estrategia a seguir para encontrar los parámetros de simulación correctos y se detallan las diferentes etapas de la investigación.

4.-En el cuarto capítulo nombrado **Resultados y discusión**, se dan a conocer los resultados obtenidos para las diferentes etapas de la investigación y se interpretan los resultados obtenidos.

5.-En el quinto capítulo de **Conclusiones**, se sintetiza la información descrita en el capítulo anterior y se analiza si los objetivos se lograron.

6.-En el capítulo sexto titulado **Sugerencias para trabajos futuros**, se detalla el trabajo futuro, el cual podrá retomar cualquier ingeniero interesado en el tema y tenga la intención de seguir contribuyendo a un proyecto como éste.

Capítulo 1

Antecedentes

En este capítulo se estudia el efecto de la temperatura en las baterías, los mecanismos de transferencia de calor, la resistencia térmica de contacto, el coeficiente de transferencia de calor por convección, y la longitud característica. Se profundiza en los diversos estudios llevados a cabo para la determinación de sus valores y se justifica la necesidad de su estudio para resolver la problemática planteada en la introducción. Se habla brevemente sobre las ecuaciones que gobiernan los fluidos, la discretización y el funcionamiento de las simulaciones térmicas acopladas con un programa de CFD.

1.1 Efecto de la temperatura en las baterías plomo-ácido

La gestión térmica en la zona del cofre de un automóvil es particularmente importante para mejorar la comodidad de los pasajeros y reducir el desgaste térmico de los componentes del motor, además de ayudar al diseño a cumplir con los nuevos requisitos de eficiencia energética y emisiones en condiciones normales de trabajo (Lam, S., Shuaib N., Hasini H., y Shuaib N., 2012).

En la mayoría de los automóviles modernos, no queda mucho espacio en el compartimiento del motor para instalar la batería. Por lo tanto, la temperatura media de la batería puede ser más alta que hace algunas décadas. En algunos modelos de automóviles, la batería se encuentra en el interior del vehículo o en el maletero, donde la temperatura ambiente es más moderada (Albers, J., 2009).

El uso de baterías de plomo-ácido como baterías de arranque en el sector automotriz, ha aumentado debido al alto porcentaje de automotores que las emplean. La razón principal es la facilidad con la que se pueden conseguir y su precio relativamente bajo, ya que los componentes como el plomo y sus derivados, además del electrolito de ácido sulfúrico (H_2SO_4) que presentan este tipo de baterías, son de bajo costo (Torres, J., Sierra, A., Peña, D., Uribe, I., y Estupiñan, H., 2014).

Las baterías de plomo-ácido pueden estar afectadas por diferentes factores como la corrosión (que se da en las rejillas, uniones, separadores, conectores, entre otros componentes de la batería), la degradación del material activo positivo, la pérdida de la adhesión a la rejilla, la formación de sulfato de plomo, pérdida de agua, temperatura, entre otros. La temperatura tiene un efecto significativo en el desempeño de la batería, ya que el aumento de la temperatura trae como consecuencia un incremento de la corrosión interna, pues el proceso de óxido-reducción se acelera; y la gasificación debido a la descomposición del electrolito, como resultado de que todas las baterías plomo-ácido pierden un poco de agua por electrólisis en el proceso de carga a elevadas temperaturas. (Torres, J., 2014)

La temperatura es un factor importante en el rendimiento, vida útil, carga y control de voltaje de las baterías. A temperaturas altas, el rendimiento y la duración de las baterías resultan afectados. Esto sucede en cualquier tipo de batería del tipo plomo-ácido. (Torres, J., 2014)

1.2 Mecanismos de transferencia de calor

El calor se define como energía transferida en virtud de una diferencia de temperatura. Fluye de regiones de mayor temperatura a regiones de menor temperatura (Rohsenow, 1998). Los mecanismos de transferencia del calor son conducción, convección y radiación. A continuación, se encuentra la explicación de cada uno de estos fenómenos.

1.2.1 Conducción

La conducción es un fenómeno de transferencia de calor que ocurre en cuerpos sólidos. Puede ocurrir entre el mismo cuerpo o de un cuerpo a otro, siempre y cuando estén en contacto físico. Para ambos casos el flujo de calor siempre ocurre del punto de mayor temperatura al de menor temperatura, lo cual genera un gradiente de temperatura. Ver figura 1. La transferencia de calor por conducción está gobernada por la Ley de Fourier de la conducción (Levenspiel, O. 1984):

$$\dot{Q}_x = kA \frac{dT}{dx} \quad (1)$$

donde:

\dot{Q}_x es el flujo de calor en la dirección x [W]

k es la conductividad térmica del material en cuestión [$\frac{W}{m^{\circ}C}$]

A es el área [m^2]

dT es la diferencia de temperatura entre el foco caliente y el frío [K]

dx es el espesor del material [m]

A partir de la ecuación (1) se puede observar que el flujo de calor es directamente proporcional al gradiente de temperatura, el área de transferencia de calor y conductividad térmica del material e inversamente proporcional al espesor del material.

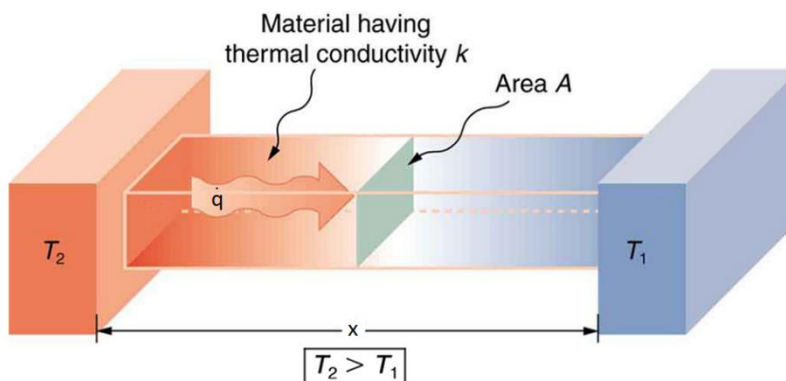


Figura 1 Conducción de calor a través de una pared plana. What is thermal conductivity. Recuperado de <https://www.khanacademy.org/science/physics/thermodynamics/specific-heat-and-heat-transfer/a/what-is-thermal-conductivity>

1.2.2 Radiación

La transferencia de calor de un cuerpo con una temperatura alta, a un cuerpo con una temperatura más baja; cuando los cuerpos no están en contacto físico directo entre sí, o cuando están separados en el espacio, se llama radiación de calor. El medio a través por el cual pasa la radiación podría ser un vacío, un gas o un líquido (Ganji, 2018).

La energía es transmitida desde un objeto por ondas electromagnéticas. A un nivel macroscópico el cálculo de la radiación térmica está basado en la ley de Stefan Boltzmann, que establece que para un cuerpo negro el calor radiado es proporcional a su temperatura absoluta elevada a la cuarta potencia. Una consecuencia de esta no linealidad es que un objeto frío necesita un aumento de temperatura mayor que un objeto caliente para alcanzar el mismo aumento de radiación emitida (Henry y Merlis, 2018).

La emisividad es una propiedad que depende del material de la superficie y puede variar de 0 a 1, dependiendo de la eficiencia de un cuerpo en comparación con un cuerpo negro que representa una emisividad de 1 (León, 2012):

$$\dot{Q} = \epsilon \sigma A T^4 \quad \text{para la superficie que emite} \quad (2)$$

$$\dot{Q} = \alpha \sigma A T^4 \quad \text{para la superficie que absorbe} \quad (3)$$

$$\epsilon + \alpha = 1 \quad (4)$$

donde:

\dot{Q} es el flujo de calor por radiación [W]

ϵ es la emisividad y tiene un valor entre 0 y 1.

α es la absorptividad y tiene un valor entre 0 y 1.

σ es la constante de Stefan Boltzmann con un valor de $5.669 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$

A es el área superficial del objeto [m^2]

T es la temperatura superficial del objeto [K]

1.2.3 Convección

La convección es el modo de transferencia de calor donde la energía es transferida por movimiento macroscópico de moléculas fluidas. La transferencia de calor por convección puede ocurrir en un fluido en movimiento de una región a otra o hacia una superficie sólida, que puede tener la forma de un conducto, en el que fluye el fluido o sobre el cual fluye el fluido (Bell, K.). Si el movimiento del fluido es inducido por una diferencia de presiones o por una fuerza externa como una bomba o ventilador, el proceso es llamado “convección forzada”. La convección libre, o convección natural, es un flujo espontáneo que surge de campos no homogéneos de fuerzas volumétricas (gravitacionales, centrífugas, Coriolis, electromagnéticas, etc.) (Martynenko, Oleg, Polijakov).

La convección mixta es una combinación de convección forzada y libre, que es el caso general de la convección cuando un flujo se determina simultáneamente tanto por un sistema de forzamiento externo (es decir, el suministro de energía externa al sistema corporal aerodinámico) como por un sistema volumétrico interno (masa), es decir, por la distribución de densidad no uniforme de un medio fluido en un campo de gravedad (Polijakov).

La transferencia de calor con convección es gobernada por la ecuación (Narendra, 2015):

$$\dot{Q} = hA(T_2 - T_1) \quad (5)$$

donde:

\dot{Q} es el flujo de calor por convección [W]

h es el coeficiente de transferencia de calor por convección [$\frac{W}{m^2 K}$]

A es el área de contacto de la superficie y el fluido [m^2]

T es la diferencia de temperaturas entre la superficie y el fluido [K]

1.3 Resistencia térmica de contacto

En la presente tesis nos interesa capturar de manera correcta la temperatura del escudo térmico del catalizador, por ser la principal fuente de calor externa para la batería. Como se observa en la figura 2, el escudo térmico multicapa se encuentra directamente apoyado sobre el catalizador, por lo que el análisis de la transferencia de calor por conducción entre estos componentes es

crucial. A mayor caída de temperatura en la zona de contacto del catalizador y de su escudo térmico, menor será la temperatura del soporte de la batería.

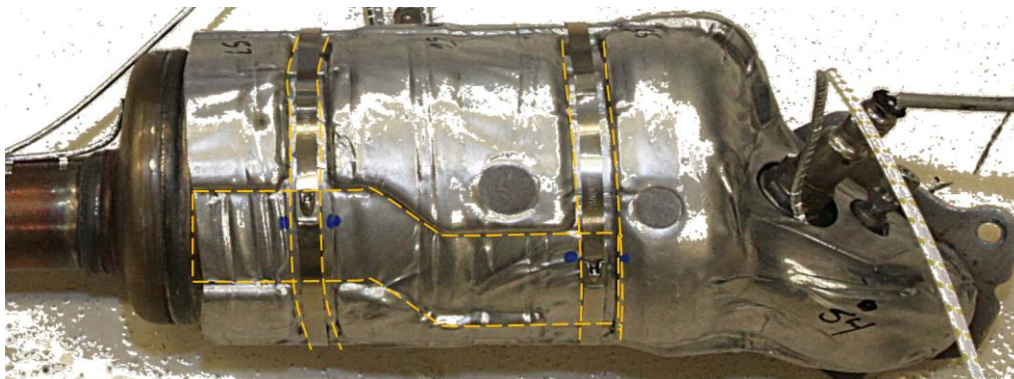


Figura 2 Catalizador protegido mediante escudo térmico multicapa

Cuando se forma una unión presionando dos materiales metálicos similares o diferentes entre sí, solo una pequeña fracción del área superficial nominal está realmente en contacto debido a la falta de planitud y rugosidad de las superficies en contacto. Si se impone un flujo de calor a través de la unión, el flujo uniforme de calor generalmente se restringe a la conducción a través de los puntos de contacto (Mantelli, 2002).

Al poner dos sólidos en contacto, existe entre ellos una resistencia al flujo de calor debido a que las superficies no son completamente lisas. A un nivel microscópico todos los materiales tienen cierta rugosidad, como se observa en la figura 3. El área de contacto real es solo una parte del área de contacto aparente (Narendra, 2015).

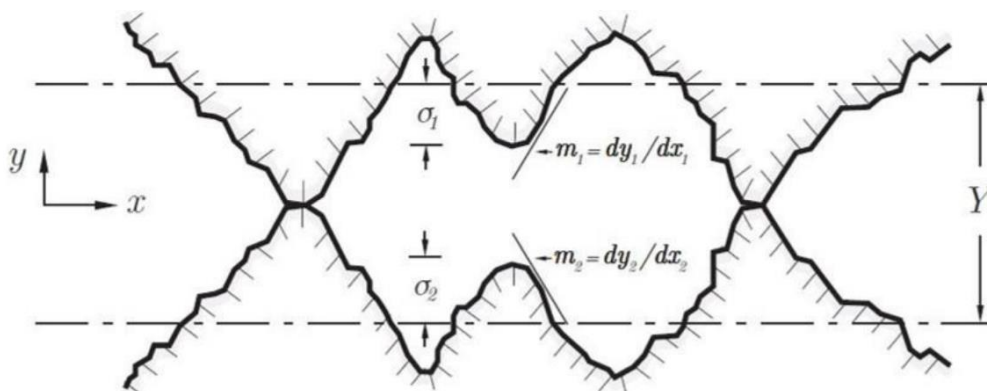


Figura 3 Vista microscópica del contacto entre dos superficies. Narendra Babu, Karthik. (2015). Thermal Contact Resistance: Experiments and Simulation [Tesis]. Recuperado de <http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/223157/223157.pdf>

La resistencia térmica de contacto producirá una disminución de temperatura en la unión, que será proporcional al valor de la resistencia de contacto térmica que se expresa como (Cengel, 2007):

$$R_c = \frac{dx}{kA} \quad (6)$$

donde:

R_c es la resistencia térmica de contacto [$\frac{^\circ C}{W}$]

dx es el grosor de la capa unión [m]

k es la conductividad térmica del material de la capa [$\frac{W}{m^\circ C}$]

A es el área de contacto [m^2]

Nota: a lo largo de la tesis, para fines prácticos, la resistencia térmica de contacto se expresará por unidad de área ($\frac{m^2 K}{W}$)

La figura 4 muestra una disminución de temperatura en la unión. La transferencia de calor en ésta se produce por los tres métodos de transferencia de calor, siendo la conducción el predominante:

- 1) Conducción a través del fluido
- 2) Radiación entre las superficies que forman los huecos
- 3) Conducción a través de las zonas de contacto real

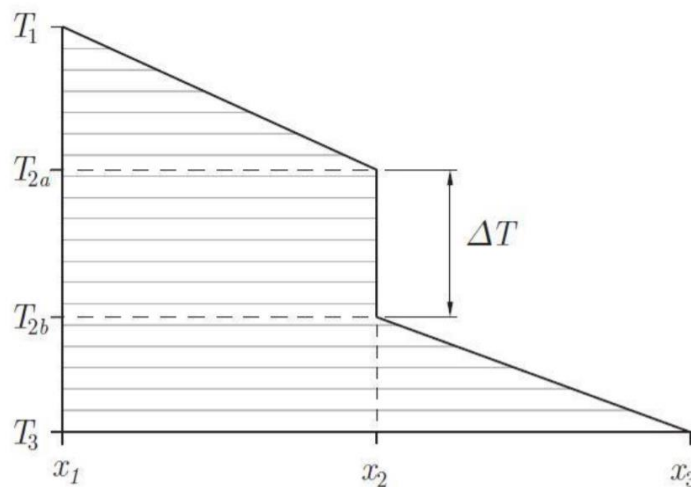


Figura 4 Perfil de temperatura en la zona de contacto de dos superficies. Narendra Babu, Karthik. (2015). Thermal Contact Resistance: Experiments and Simulation [Tesis]. Recuperado de <http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/223157/223157.pdf>

El estudio de la caída de temperatura en las uniones del catalizador y de las capas del escudo térmico que lo cubren es crucial para predecir la temperatura del soporte de la batería. A mayor caída de temperatura en la zona de contacto del catalizador y de su escudo térmico, menor será la radiación que recibirá el soporte de la batería.

1.3.1 Factores que afectan la resistencia térmica de contacto

Se considera que varios factores influyen en la resistencia térmica de contacto de una junta en vacío. Algunos de estos factores involucran propiedades de los dos materiales y algunos son parámetros de variables externas (Hasselström, 2012).

- a) Dureza: un material más duro presentará menos deformación en las rugosidades lo cual reduce el área de contacto e incrementa la resistencia térmica de contacto.
- b) Presión en la unión: el área de contacto aumenta conforme a la presión ejercida entre las superficies. Al aumentar la presión y el área se disminuye la resistencia térmica de contacto.
- c) Rugosidad: a mayor rugosidad menor área de contacto y por lo tanto la resistencia térmica de contacto se incrementa.
- d) Conductividad térmica: si los materiales en cuestión tienen mayor conductividad térmica, la resistencia térmica de contacto será menor.
- e) Pendiente de las rugosidades: a mayor pendiente en las rugosidades será menor el área de contacto y mayor será la resistencia térmica de contacto.

Estas características físicas de los materiales, hacen que la determinación de un valor de resistencia de contacto entre el catalizador y su escudo térmico sea una tarea que se basa más en la experimentación que en cálculos matemáticos complejos.

1.3.2 Justificación para la determinación de la resistencia térmica de contacto

Para predecir correctamente la temperatura del escudo térmico, montado sobre el catalizador del vehículo, es crítico analizar cómo afecta la conducción y en particular la resistencia térmica de contacto. El estudio de la resistencia térmica de contacto cobra aún más importancia y complejidad cuando se trata de escudos laminados formados por múltiples capas de distintos materiales, como lo es el escudo del catalizador que se forma de acero aluminizado en sus extremos, y al interior, fibra de vidrio que sirve como aislante. La determinación de la resistencia térmica de contacto es una labor difícil y a pesar de los estudios teóricos y prácticos que se han llevado a cabo hasta ahora, no existe una teoría o metodología fiable que permita obtener su valor para los distintos materiales y sus disposiciones en la multitud de sus aplicaciones.

Rohsenow W., Hartnett, J., y Cho, Y. (1998) refieren que la práctica de la ingeniería moderna en el campo de la transferencia de calor se basa en una combinación de análisis teóricos y datos experimentales. A menudo, el ingeniero se enfrenta a la necesidad de obtener resultados prácticos en situaciones en las que, por diversas razones, los fenómenos físicos no pueden

describirse matemáticamente o las ecuaciones diferenciales que describen el problema son demasiado difíciles de resolver. Un programa experimental debe ser considerado en tales casos. Sin embargo, al llevar a cabo el programa experimental, el ingeniero debe saber cómo relacionar los datos experimentales con el sistema real, generalmente más grande (prototipo). La determinación de los parámetros adimensionales relevantes proporciona una herramienta poderosa para ese propósito.

Narendra (2015), habla de la dificultad para aislar el efecto de cada una de las dos capas del escudo térmico que cubre el múltiple de admisión de un vehículo. A través de pruebas experimentales y simulaciones logra estimar la resistencia térmica de contacto total que arroja mejor correlación. Sin embargo, en este estudio no se toma en cuenta el efecto que tendría la radiación de este escudo en la correlación de algún otro componente ni se analiza dentro del entorno de un vehículo.

1.4 Coeficiente de transferencia de calor por convección

El coeficiente de transferencia de calor (h) es un parámetro básico, utilizado en el cálculo de problemas de transferencia de calor por convección (Moreira, Colmanetti, Tibiriçá, 2019). Es una característica cuantitativa de la transferencia de calor por convección entre un medio fluido (un fluido) y la superficie (pared) sobre la que fluye el fluido. La unidad de medida en el sistema internacional de unidades es $\frac{W}{m^2K}$ (Kurganov, 2011).

Los factores que afectan el coeficiente de transferencia de calor son (Cengel, 2007):

- 1) Velocidad del fluido
- 2) Densidad del fluido
- 3) Viscosidad del fluido
- 4) Conductividad del fluido
- 5) Longitud característica del área de transferencia de calor
- 6) Capacidad calorífica del fluido
- 7) Diferencia de temperatura entre el cuerpo frío y el caliente
- 8) Temperatura media de la película del fluido

El coeficiente de transferencia de calor ha ganado vigencia en los cálculos de la transferencia de calor por convección y en la resolución de problemas de intercambio de calor externo entre un medio sólido conductor de calor y su entorno. El coeficiente de transferencia de calor depende tanto de las propiedades térmicas de un medio, de las características hidrodinámicas de su flujo como de las condiciones de frontera hidrodinámicas y térmicas (Kurganov, 2011).

1.4.1 Cálculo de coeficiente de transferencia de calor por convección en TAItherm

El coeficiente de transferencia de calor se calcula individualmente para cada elemento de cada componente y es el resultado de la mezcla de convección forzada, convección natural de placa horizontal y convección natural de placa vertical. Para estos tres tipos de convección, se calcula un número de Nusselt promedio, que posteriormente se mezcla para obtener un número de Nusselt global. Para poder calcular la convección natural de placa horizontal y vertical, TAItherm primero determina la orientación horizontal y vertical de cada elemento, utilizando el elemento normal. Posteriormente, esta orientación se utiliza para calcular un número de Nusselt para la convección natural de placa horizontal y vertical. El componente de convección forzada del coeficiente de transferencia de calor supone que el flujo es paralelo al elemento (Boettcher C., 2016).

1.5 Longitud característica

La longitud característica se define con base en la geometría del sistema. En el caso del flujo dentro de un tubo, el diámetro del tubo se toma como longitud característica, mientras que para una placa plana se toma a partir del borde de ataque, como lo muestra la figura 5 (Cengel, 2007).

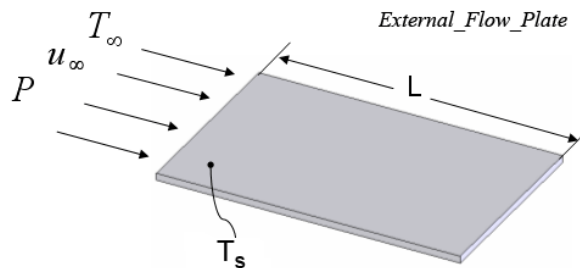


Figura 5 Longitud característica en una placa plana. F-Chart Software. Recuperado de http://fchart.com/ees/heat_transfer_library/external_flow/hs2030.htm

1.5.1 Longitud característica forzada

En el manual de usuario de TAItherm, el parámetro de “forced length”, al que referiremos como longitud característica forzada, es definido como el largo usado como longitud característica para la convección forzada en el que se considera la distancia del borde de ataque al borde de salida, en donde el fluido hace contacto con la geometría. TAItherm calcula la proyección de la parte en X, Y y Z y asigna el mayor de estos valores como longitud característica forzada, sin embargo, este criterio no es correcto ya que no considera la dirección del fluido. En la figura 6 se muestra la longitud característica forzada que asignaría TAItherm y

que coincide con la proyección en X por ser el de mayor magnitud, sin embargo, no se considera la dirección del flujo.

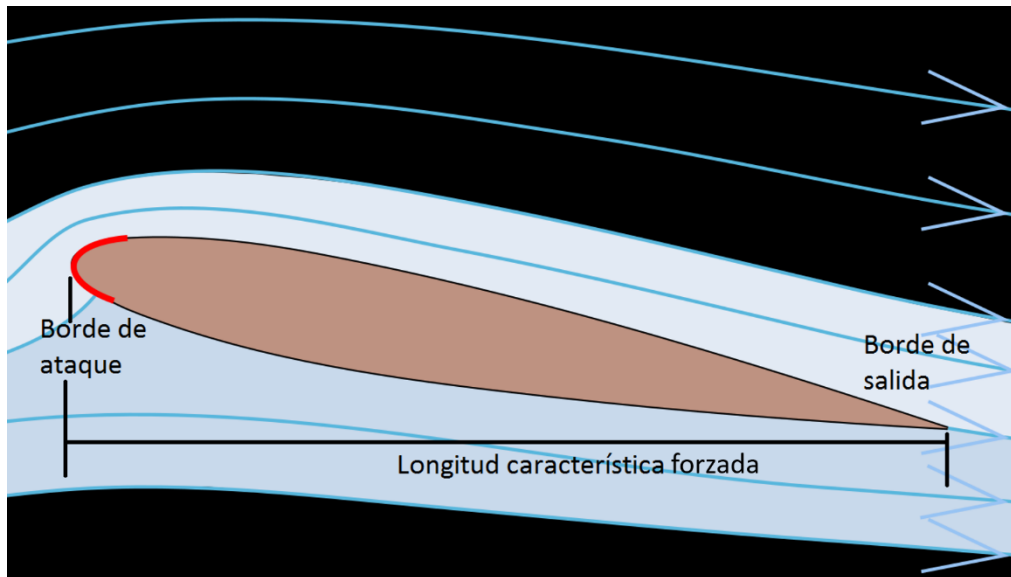


Figura 6 Longitud característica forzada de acuerdo a la descripción del manual de usuario de TAItherm. Figura adaptada de: Belisle Michael. (2008). Streamlines around a NACA 0012. [Artículo]. Recuperado de https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Leading_edge_NA

El parámetro de longitud característica forzada sólo es requerido al ingresar la convección proveniente de CFD-ACE+ en función de la velocidad y la temperatura.

Determinar la longitud característica forzada para todos los componentes de un vehículo es una tarea muy compleja, la dirección del flujo no es constante y las geometrías no son simples, implica un análisis del flujo alrededor de cada componente del vehículo. Debido a esto, el criterio genérico para asignar un valor a la longitud característica forzada, que se ha establecido en la empresa, es usar la distancia en el eje **X**, que corresponde a la orientación adelante-atrás del vehículo (ver figura 7). Al tratarse de convección forzada y contar con un ventilador que dirige el aire hacia atrás, se asume que el aire va de adelante del vehículo hacia atrás, es decir, eje **X**.

Este criterio se ha usado para simplificar la determinación de la longitud característica forzada, sin embargo, se sabe que su uso genera problemas de correlación.

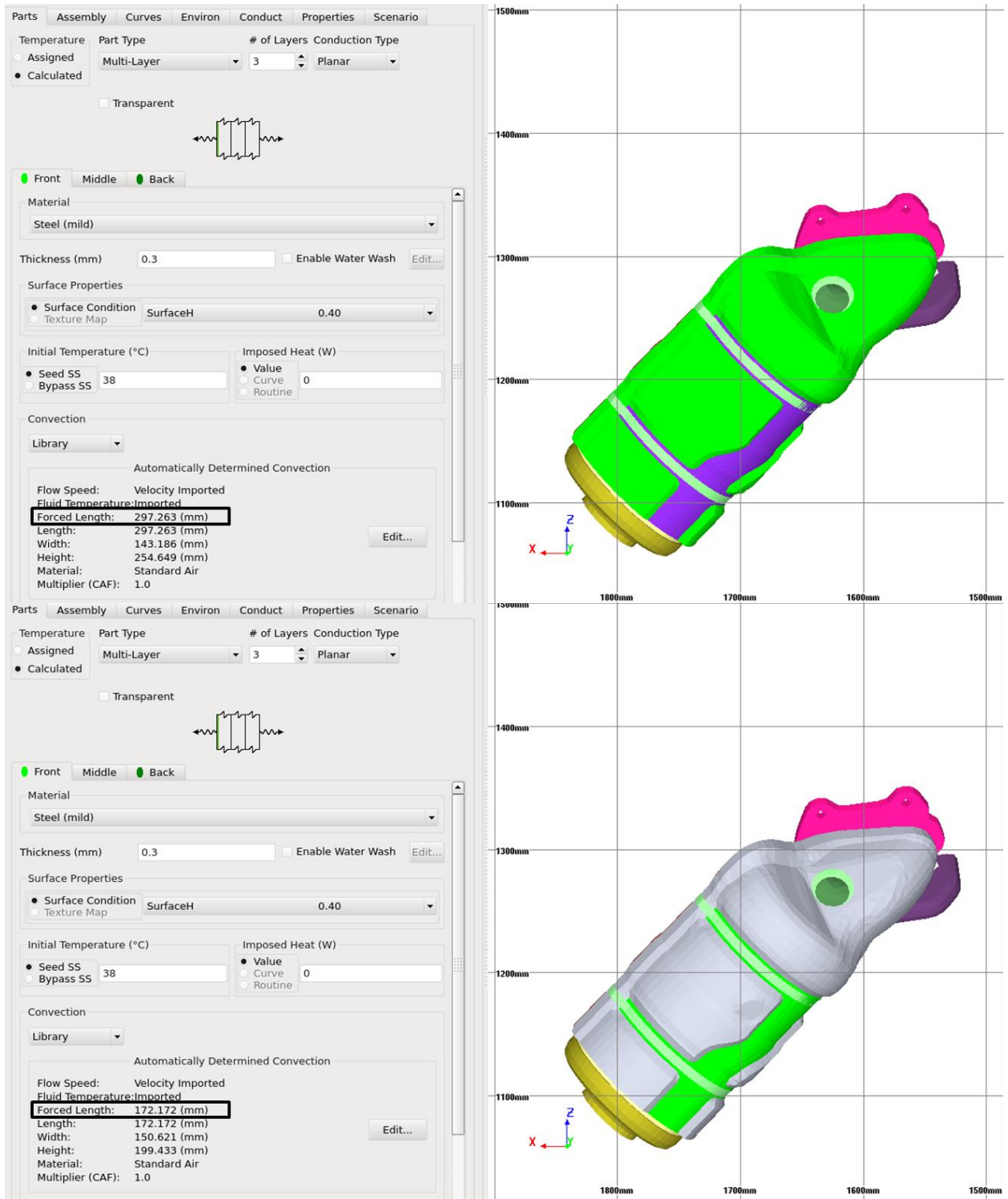


Figura 7 Asignación de la longitud característica forzada en TAItherm usando el vector en X

1.6 Ecuaciones gobernantes de los fluidos

La piedra angular de la dinámica de fluidos computacional son las ecuaciones fundamentales de la dinámica de fluidos: las ecuaciones de continuidad, momento y energía. Estas ecuaciones son las declaraciones matemáticas de tres principios físicos fundamentales en los que se basa toda la dinámica de fluidos (Wendt, 1992):

- (1) se conserva la masa;
- (2) $F = ma$ (segunda ley de Newton);
- (3) la energía se conserva.

Ecuaciones de Navier-Stokes

Las ecuaciones de Navier-Stokes gobiernan el movimiento de los fluidos:

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot \nabla u \right) = \rho g - \nabla p + \mu \nabla^2 u \quad (8)$$

donde:

ρ es la densidad del fluido [$\frac{kg}{m^3}$]

u es la velocidad del fluido [$\frac{m}{s}$]

t es el tiempo [s]

p es la presión del fluido [Pa]

μ es la viscosidad dinámica del fluido [Pa · s]

Los diferentes términos corresponden a las fuerzas inerciales, las fuerzas externas aplicadas al fluido, fuerzas de presión y fuerzas viscosas.

Ecuación de continuidad

Las ecuaciones de Navier-Stokes siempre se resuelven junto con la ecuación de continuidad:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u) = 0 \quad (9)$$

Ecuación de energía

Se puede adquirir una visión más amplia del efecto de las fuerzas de superficie en el movimiento del fluido, considerando el balance de energía en un elemento material de volumen dV limitado por la superficie dS .

Las fuerzas de volumen y de superficie realizan trabajo sobre el fluido en dW , y al mismo tiempo puede haber transferencia de calor a través del contorno dQ . Parte de la ganancia neta de energía se manifiesta como un incremento de la energía cinética del fluido y, el resto, de acuerdo con la Primera Ley de la Termodinámica, aparece como un aumento de la energía del sistema dE (Cengel, 2007). Por lo tanto

$$\frac{dE}{dt} = \frac{dQ}{dt} + \frac{dW}{dt} \quad \text{y sabemos que } \frac{dQ}{dt} = \dot{Q}, \quad \frac{dW}{dt} = \dot{W} \quad (10)$$

$$\text{Por lo tanto } \frac{dE}{dt} = \dot{Q} + \dot{W} \quad (11)$$

donde:

$\frac{dE}{dt}$ es la variación de la energía en un lapso de tiempo [W]

\dot{Q} es el flujo de calor total transferido del sistema [W]

\dot{W} es la potencia mecánica desarrollada por el sistema [W]

Analizaremos este balance para deducir una ecuación diferencial válida en cada punto del fluido, que exprese el balance de energía para una dada masa de fluido.

1.7 Análisis computacional de fluidos

Los tres principios físicos fundamentales en los que se basa toda la dinámica de fluidos, en su forma más general se expresan como ecuaciones diferenciales parciales. El análisis computacional de fluidos es, en parte, el arte de reemplazar las ecuaciones parciales diferenciales gobernantes de los fluidos con números en el espacio y/o en el tiempo, para obtener una descripción numérica final y completa del campo de flujo de interés (Wendt, 1992). Esta no es una definición integral de CFD; hay algunos problemas que permiten la solución inmediata del campo de flujo sin avanzar en el tiempo o el espacio, y hay algunas aplicaciones que involucran ecuaciones integrales en lugar de ecuaciones diferenciales parciales. En cualquier caso, todos estos problemas implican la manipulación y la solución de números. El producto final de CFD es una colección de números, en contraste con una solución analítica de forma cerrada. Sin embargo, a largo plazo, el objetivo de la mayoría de los análisis de ingeniería, de forma cerrada o de otro tipo, es una descripción cuantitativa del problema. Las soluciones de CFD generalmente requieren de la manipulación repetitiva de miles o millones de números, una tarea que es humanamente imposible sin la ayuda de las computadoras.

Un modelo CFD tiene tres etapas secuenciales conocidas como pre-procesamiento, resolución y post procesamiento. En la primera etapa o pre-procesamiento, las ecuaciones, propiedades y condiciones de contorno que rigen se definen dentro de un dominio compuesto por pequeños elementos volumétricos interconectados para modelar el movimiento del fluido. Durante la segunda etapa o proceso de resolución, se realiza la adecuada selección de esquemas de discretización (temporal y espacial) para las ecuaciones gobernantes. Además, en esta etapa se configuran los criterios de convergencia o el número de iteraciones, los factores de relajación y el algoritmo de acoplamiento de presión y velocidad. Finalmente, la etapa de post procesamiento involucra el análisis e interpretación de las soluciones obtenidas utilizando campos de flujo, temperatura y presiones (Alonzo, Gutiérrez, Jiménez, 2015).

1.8 Discretización

La solución numérica de una ecuación diferencial parcial consiste en encontrar los valores de la variable dependiente ϕ en puntos específicos, a partir de los cuales se puede construir su distribución sobre el dominio de interés. Estos puntos se denominan elementos o nodos, y resultan de la discretización de la geometría original en un conjunto de elementos discretos no superpuestos, un proceso conocido como mallado. En todos los métodos, el foco está en reemplazar la solución exacta continua de la ecuación diferencial parcial con valores discretos. Por lo tanto, la distribución de ϕ está discretizada, y es apropiado referirse a este proceso de convertir la ecuación gobernante en un conjunto de ecuaciones algebraicas para los valores discretos de ϕ como el proceso de discretización. Los valores discretos de ϕ se calculan típicamente resolviendo un conjunto de ecuaciones algebraicas que relacionan los valores de los elementos vecinos; estas ecuaciones discretas o algebraicas se derivan de la ecuación de conservación que rige ϕ . Una vez que se calculan los valores de ϕ , los datos se procesan para extraer cualquier información necesaria. (Moukalled, 2016). Las diversas etapas del proceso de discretización se ilustran en la figura 8.

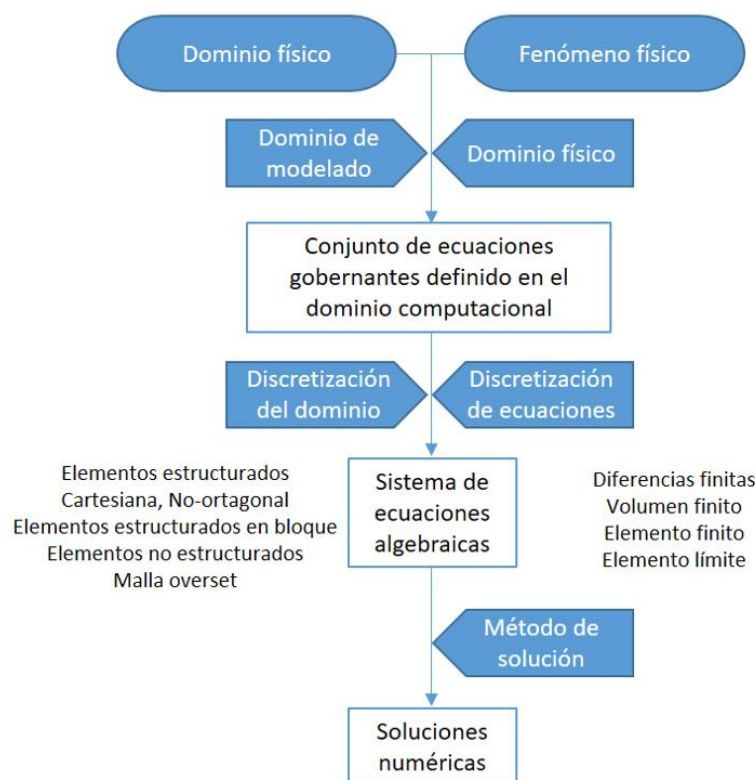


Figura 8 Proceso de discretización. Moukalled, F., Mangani, L., y Darwish, M. (2016) The discretization process. [Figura]. The Finite Volume Method in Computational Fluid Dynamics. Suiza: Springer

1.9 Simulación térmica acoplada con un programa de CFD

Las simulaciones térmicas están generalmente separadas en dos etapas de acuerdo con Popielas (2004) y Srinivasan (2005): el estudio de flujo de aire a través de CFD y el análisis térmico que incluye la información del flujo de aire obtenida en la primera etapa.

Para simular un transporte convectivo más detallado del lado del fluido, cuando se exceden las posibilidades de TAITherm (modelo térmico), se debe acoplar un programa de CFD como CFD-ACE+ o STAR-CCM+ (Brodbeck, 2017).

El programa de CFD resuelve la convección para cada nodo de la malla. La información es almacenada en un archivo con extensión .neu al que se le llama nube de puntos. Su nombre se debe a que contiene la coordenada de cada nodo de la malla y la información de la convección que le corresponde. Esta información se encuentra en términos de las velocidades y temperaturas del aire (V y T) para CFD-ACE+, o del coeficiente de transferencia de calor por convección y la temperatura del aire (h y T) en el caso de STAR-CCM+.

El modelo térmico de TAITherm captura con todo detalle la conducción y la radiación, tomando en consideración los valores de convección que se le importen del programa de CFD. Es decir, el modelo de TAITherm no modela el flujo del ventilador, o la descarga de los intercambiadores de

calor, esto ya está considerado en la información que provee el programa de CFD. TAItherm, a diferencia de los programas de CFD, considera los materiales en cuestión, las emisividades, los espesores y los contactos entre componentes para calcular las temperaturas finales.

Al importar en TAItherm la nube de puntos de convección, previamente obtenida en CFD-ACE+ o en STAR-CCM+, en formato .neu se tienen valores discretizados, por lo que TAItherm realiza una interpolación. En la figura 9 puede observarse la manera en la que la convección importada de CFD-ACE+ se puede ver en TAItherm para el escudo térmico del catalizador. Podemos ver que el aire que rodea el catalizador tiene un rango de temperatura de 38°C a 150°C.

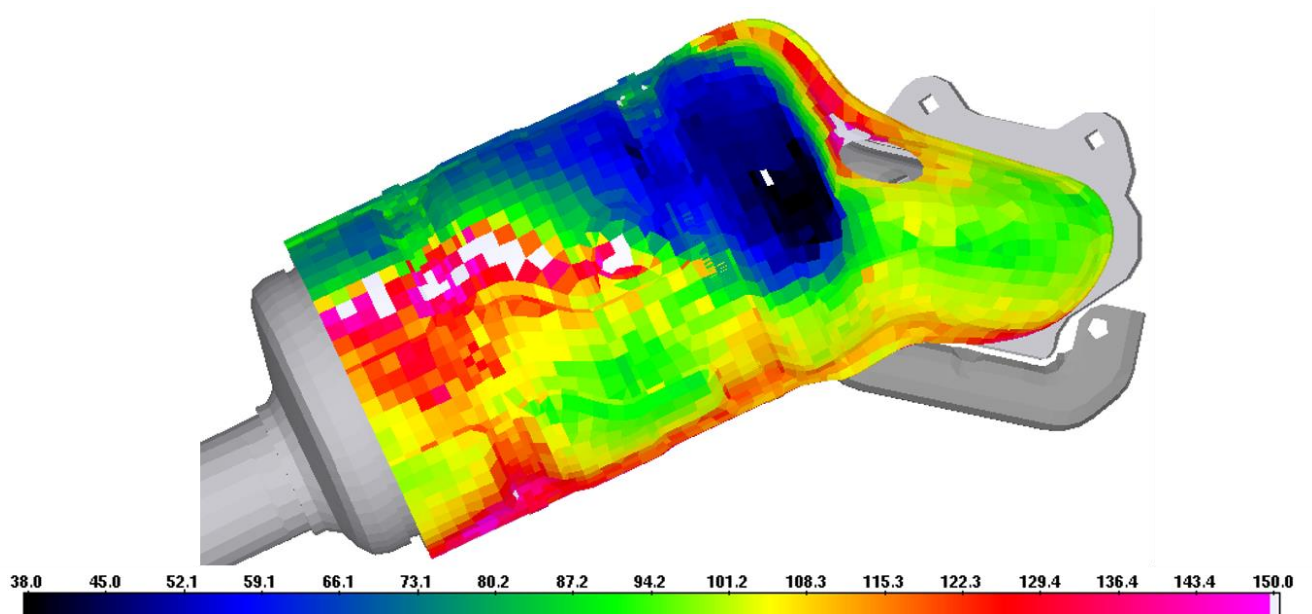


Figura 9 Nube de puntos de convección proveniente de STAR-CCM+ importada en TAItherm (°C)

Cuando la convección proveniente de CFD-ACE+ en formato V y T es importada en TAItherm. Se le debe asignar una longitud característica forzada (L_c) a cada una de las partes del vehículo. Esto no ocurre cuando la convección es importada de STAR-CCM+ en formato h y T. Esto puede observarse en la figura 10.

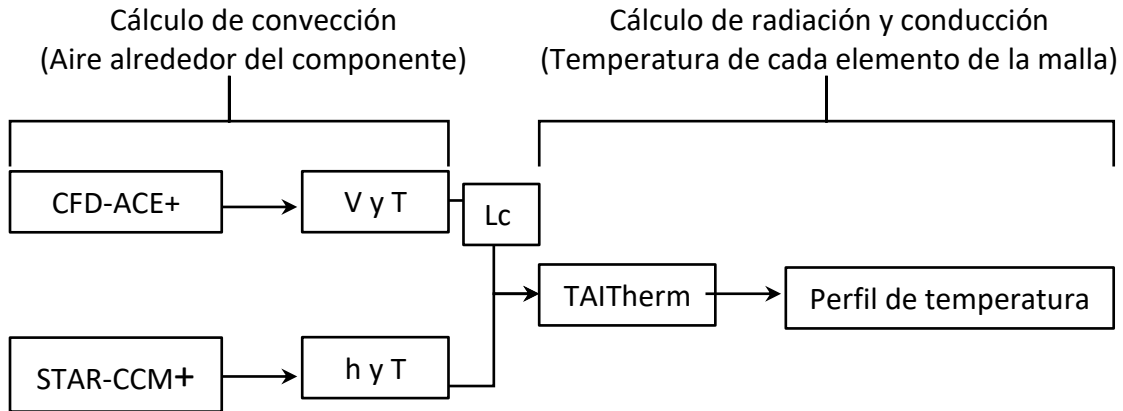


Figura 10 Simulación térmica acoplada a un programa de CFD

Hasta el momento no es posible obtener en CFD-ACE+ una nube de puntos con el coeficiente de transferencia de calor por convección y la temperatura (h y T), por lo que hasta el momento se ha asignado la longitud característica forzada de manera manual a partir de la observación del flujo.

1.9.1 Software utilizado

ANSA de la empresa BETA, es una avanzada herramienta multidisciplinaria de pre-procesamiento CAE que proporciona toda la funcionalidad necesaria para la creación de un modelo completo, desde datos CAD hasta archivos de entrada del solucionador, listos para ejecutar, en un único entorno integrado.

CFD-ACE+ de la empresa ESI, es una herramienta de análisis y diseño de ingeniería que se utiliza en todo el mundo debido a su capacidad única para modelar una amplia gama de fenómenos físicos y químicos, desde la aerodinámica del vehículo hasta la microfluídica, desde la industria de procesamiento de semiconductores hasta el modelado de celdas de combustible.

STAR-CCM+ de la empresa Siemens, permite el modelado y análisis de una variedad de problemas de ingeniería que involucran flujo de fluidos, transferencia de calor, estrés, flujo de partículas, electromagnetismo y fenómenos relacionados.

TAItherm de la empresa ThermoAnalytics, es un software que permite considerar y simular la gama completa de fenómenos de transferencia de calor, desde la convección hasta la radiación, desde el almacenamiento hasta la disipación, desde el estado estable hasta las influencias ambientales dinámicas y transitorias. Utiliza el método “multigrid” para resolver las ecuaciones de transferencia de calor. Este método permite que el solucionador converja de manera eficiente en una pequeña cantidad de iteraciones incluso para modelos finamente mallados. El solucionador se ejecuta en paralelo utilizando memoria local o distribuida, haciendo uso fácilmente de estaciones de trabajo de múltiples núcleos o recursos HPC.

El cálculo de la convección a lo largo del desarrollo del vehículo estudiado se hizo en CFD-ACE+, ya que este es el programa que se usa en la compañía automotriz en cuestión. Actualmente se están llevando a cabo análisis en paralelo para evaluar las capacidades de STAR-CCM+, sin embargo, hasta el momento se mantiene el uso de CFD-ACE por las ventajas que la malla del interior hacia el límite representa en cuanto a la velocidad de cálculo para análisis de flujo de aire y la corrección de problemas del CAD, de acuerdo con Srinivasan (2004).

En la presente tesis se hará uso de CFD-ACE+ y de STAR-CCM+ como parte de la metodología que se explicará en el capítulo 3. El uso de STAR-CCM+ permite encontrar los valores de resistencia térmica de contacto sin la intervención del error generado al determinar de manera arbitraria la longitud característica forzada en TAITherm, que es requerida cuando la convección es importada de CFD-ACE+ en formato V y T, de acuerdo a la figura 10. El uso de ambos programas también nos permitirá detectar la sensibilidad que se tiene al elegir un valor de longitud característica conforme a la proyección en X, como se explica en el capítulo 1.5.1.

1.9.2 Preparación del CAD en ANSA

El modelo utilizado en las simulaciones consiste en un vehículo completo dentro del túnel de viento. La preparación previa del CAD se hace en un programa de pre-procesado llamado ANSA, Los pasos que se siguieron se listan a continuación:

- 1) Se importan los archivos con formato .jt del vehículo completo a ANSA v18.1.
- 2) Se cierran las geometrías que no se requiere capturar mediante un “wrap”, como los componentes al interior del motor, el tanque de gasolina y el interior del vehículo.
- 3) Se retiran las geometrías de los componentes que son matemáticamente modelados en el programa de CFD, como el ventilador y los intercambiadores de calor.
- 4) Se separan en distintas regiones las geometrías que son fuentes de calor de acuerdo a sus temperaturas, como el escape, para poderles asignar temperaturas de acuerdo con la ubicación de los termopares.
- 5) Se separan los componentes que requieran que su tamaño de malla sea más fino para capturarlos con más detalle. Dado que el objetivo de la tesis es el compartimento del motor, naturalmente, se utilizó la resolución más alta allí, con foco en la batería y en el catalizador. El tamaño de la celda en las paredes del túnel de viento se estableció en magnitudes más grandes.
- 6) Se procede con el mallado de las partes usando los criterios de malla recomendados por ANSA y los establecidos en los archivos de mejores prácticas de la empresa, que por motivos de confidencialidad no es posible publicar.

1.9.3 Preparación de la simulación para el cálculo de la convección en CFD-ACE+ y en STAR-CCM+

Para esta etapa no se requiere mallar manualmente la geometría, ya que CFD-ACE+ y STAR-CCM+ generan mallas automáticas de tipo hexaédrica de alrededor de 100 millones de elementos, al usar los parámetros que se apegan a los archivos de mejores prácticas de la empresa, que por motivos de confidencialidad no es posible publicar. Los pasos a seguir son los siguientes:

- 1) Se importa a CFD-ACE+ o STAR-CCM+, la geometría que se preparó en ANSA previa a ser mallada en formato.jt
- 2) Se definen los tamaños de malla superficial deseados.
- 3) Se modelan matemáticamente los núcleos de los intercambiadores de calor, el ventilador, y las entradas al sistema. Los intercambiadores de calor se modelan a partir de los datos de caída de presión que se obtiene de pruebas. Para el ventilador se usa el modelado “Moving reference frame” (MRF) y se le asigna la velocidad de giro del ventilador.
- 4) Se ingresan los datos experimentales: velocidad del vehículo, temperaturas del escape, emisividades, temperatura ambiente y temperatura de descarga del radiador.
- 5) Se ajustan los criterios de convergencia de acuerdo a mejores prácticas de la empresa.

1.9.4 Preparación de la simulación para el modelo térmico en TAITherm

Para esta etapa sí se requiere mallar manualmente la geometría en ANSA, ya que TAITherm requiere una malla superficial de tipo “quad”. Los parámetros que se usan se apegan a los archivos de mejores prácticas de la empresa. Los pasos a seguir son los siguientes:

- 1) Importar a TAITherm la malla generada en ANSA, verificando previamente que la malla cumpla con todos los criterios de calidad establecidos para evitar divergencia en la solución.
- 2) Se establece el material, emisividad, temperatura y espesor para cada componente.
- 3) Se establecen los contactos térmicos en las partes en las que existe conducción y se define el porcentaje de contacto y la resistencia térmica de contacto correspondiente.
- 4) Se ingresa a TAITherm la nube de puntos de convección en formato V y T o h y T; en el caso de V y T es necesario determinar para cada parte una longitud característica forzada para que el programa calcule el coeficiente de transferencia de calor por convección.
- 7) Finalmente se establecen los criterios de convergencia establecidos en la guía de mejores prácticas para asegurar la confiabilidad de los resultados, que por motivos de confidencialidad no es posible publicar.

Capítulo 2

Datos iniciales para advertir la falta de correlación

En este capítulo se profundiza en cómo se identificó la falta de correlación al momento de hacer pruebas con el vehículo y compararlas con los resultados arrojados por CFD. También se estudian los parámetros de la simulación que arrojan esos resultados.

El objeto de estudio de esta tesis es un vehículo con motor V6 delantero, la batería se encuentra dentro de un soporte de polipropileno en una región cercana al catalizador. El catalizador se encuentra cubierto por un escudo térmico multicapa, que se monta sobre éste a través de dos abrazaderas metálicas. Las regiones en las que el contacto entre el catalizador y su escudo ocurren serán referidas como depresiones y su función es alojar las abrazaderas. Todos estos componentes son mostrados en la figura 11.

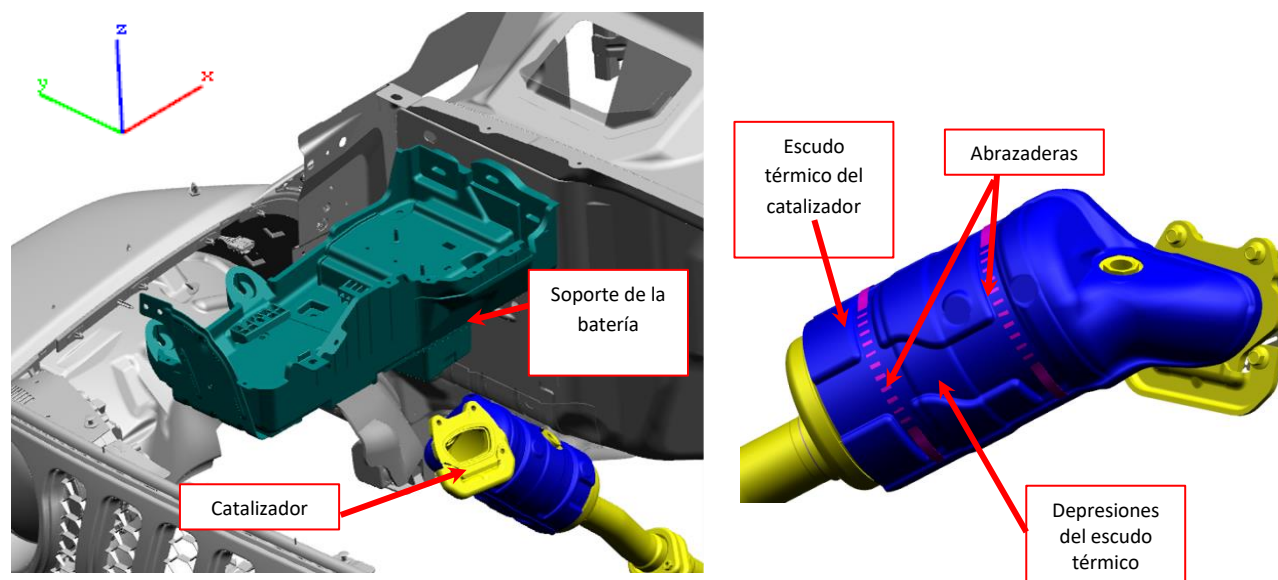


Figura 11 Disposición de los componentes dentro del vehículo

El vehículo cuenta al frente con una parrilla, intercambiadores de calor y un ventilador para su enfriamiento. Las condiciones de manejo son de la más alta demanda térmica, la velocidad del vehículo es de 49MPH, la temperatura ambiente de 38°C, el escape se encuentra en sus máximas temperaturas, el ventilador se encuentra encendido y la temperatura de descarga de aire del radiador es alta.

Los fenómenos principales que afectan los componentes de estudio y que se muestran en la figura 12 son los siguientes:

- El soporte de la batería y la batería reciben calor por convección proveniente de la descarga del radiador.
- El soporte de la batería y la batería también reciben radiación proveniente del escudo térmico multicapa que cubre el catalizador.
- El escudo del catalizador se calienta por radiación y por conducción en las depresiones.

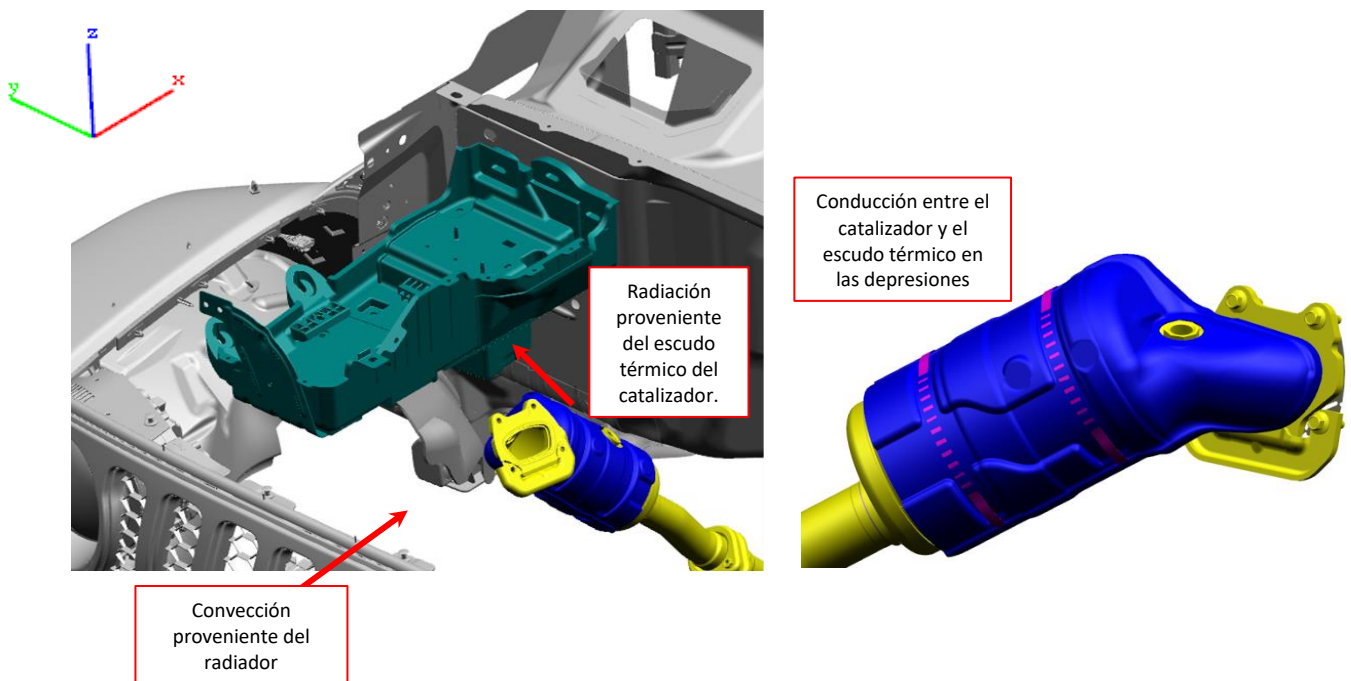


Figura 12 Mecanismos de transferencia de calor que afectan la temperatura del soporte de la batería

En la fase inicial de diseño, el grupo de CFD sugirió, a través de los resultados de las simulaciones, agregar un escudo térmico multicapa al soporte de la batería, debido a la cercanía con el catalizador y a las altas temperaturas alcanzadas por el escudo térmico que lo cubre. La disposición del escudo térmico del soporte de la batería y las temperaturas reportadas por CFD para cuatro puntos específicos, donde el vehículo se instrumentó. Posteriormente se muestran a continuación en la figura 13.

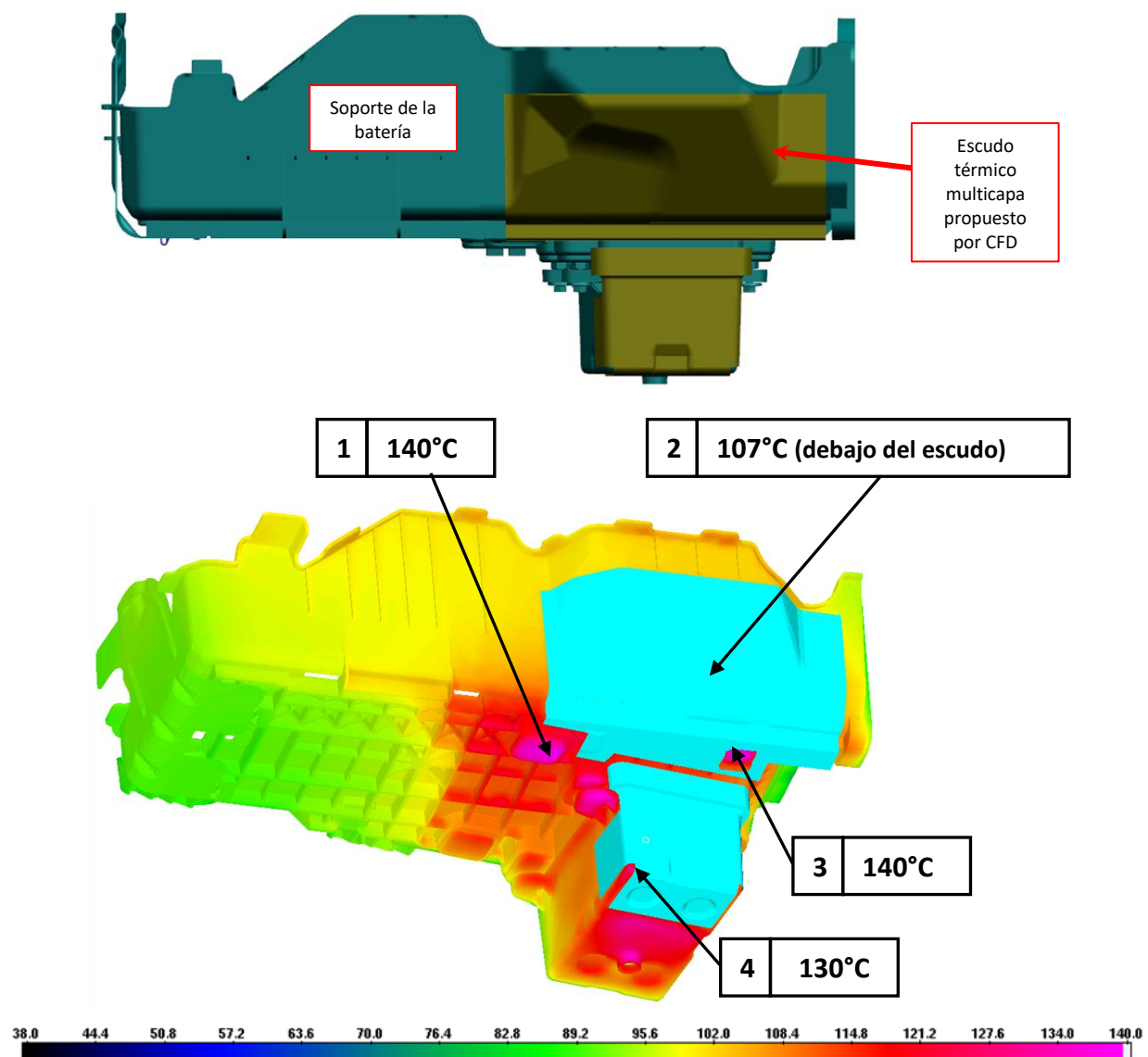


Figura 13 Estatus reportado inicialmente para el soporte de la batería con escudo térmico

El vehículo fue lanzado al mercado con el escudo térmico del soporte de la batería, la posibilidad de removerlo fue parte de las propuestas de reducción de costo para el siguiente año modelo vehicular. Con este fin en el túnel de viento se llevaron a cabo varias pruebas sin el escudo

térmico del soporte de la batería y se agregaron cuatro termopares para las mismas cuatro ubicaciones mostradas en la figura 13; encontraron una temperatura máxima de 111°C aun sin escudo térmico. Las temperaturas alcanzadas para cada ubicación se muestran en la figura 14.

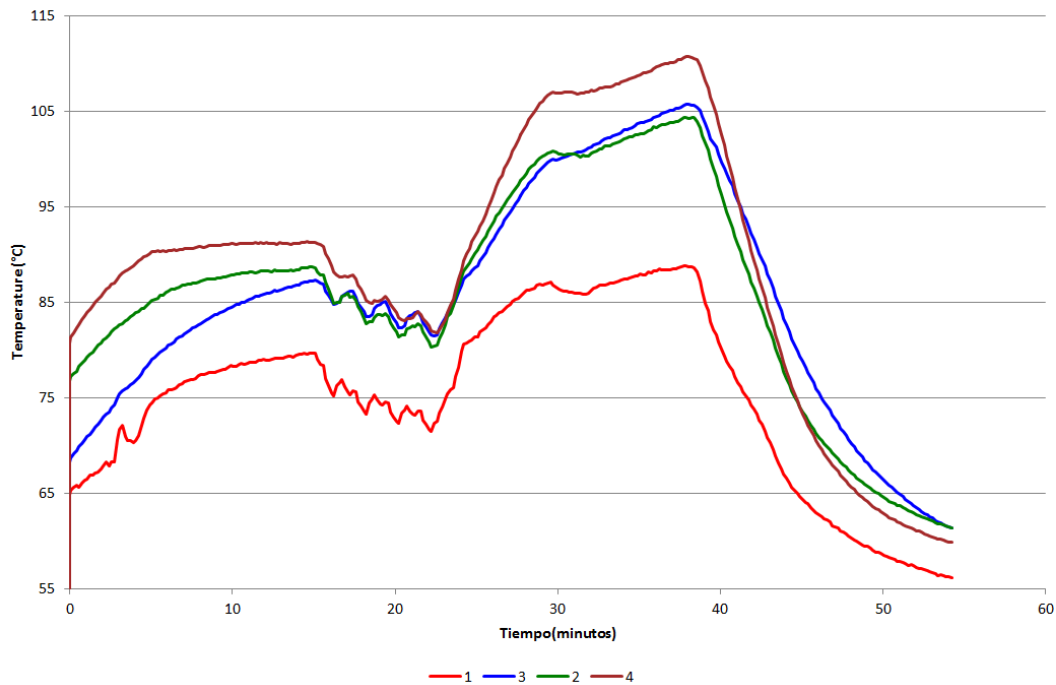


Figura 14 Resultados de la prueba física en la que se identifica que el escudo térmico no es necesario debido a que la temperatura máxima encontrada es de 111°C

Estos resultados de pruebas físicas confirmaron que era válido remover el escudo térmico del soporte de la batería, sin embargo, los resultados de CFD sin escudo mostraban temperaturas todavía más altas a las reportadas previamente durante el desarrollo del programa que incluían al escudo térmico. A continuación, en la figura 15, se muestran los resultados de la prueba física para los cuatro termopares instrumentados y las temperaturas registradas en la simulación para las mismas ubicaciones, ambas sin escudo térmico en el soporte de la batería.

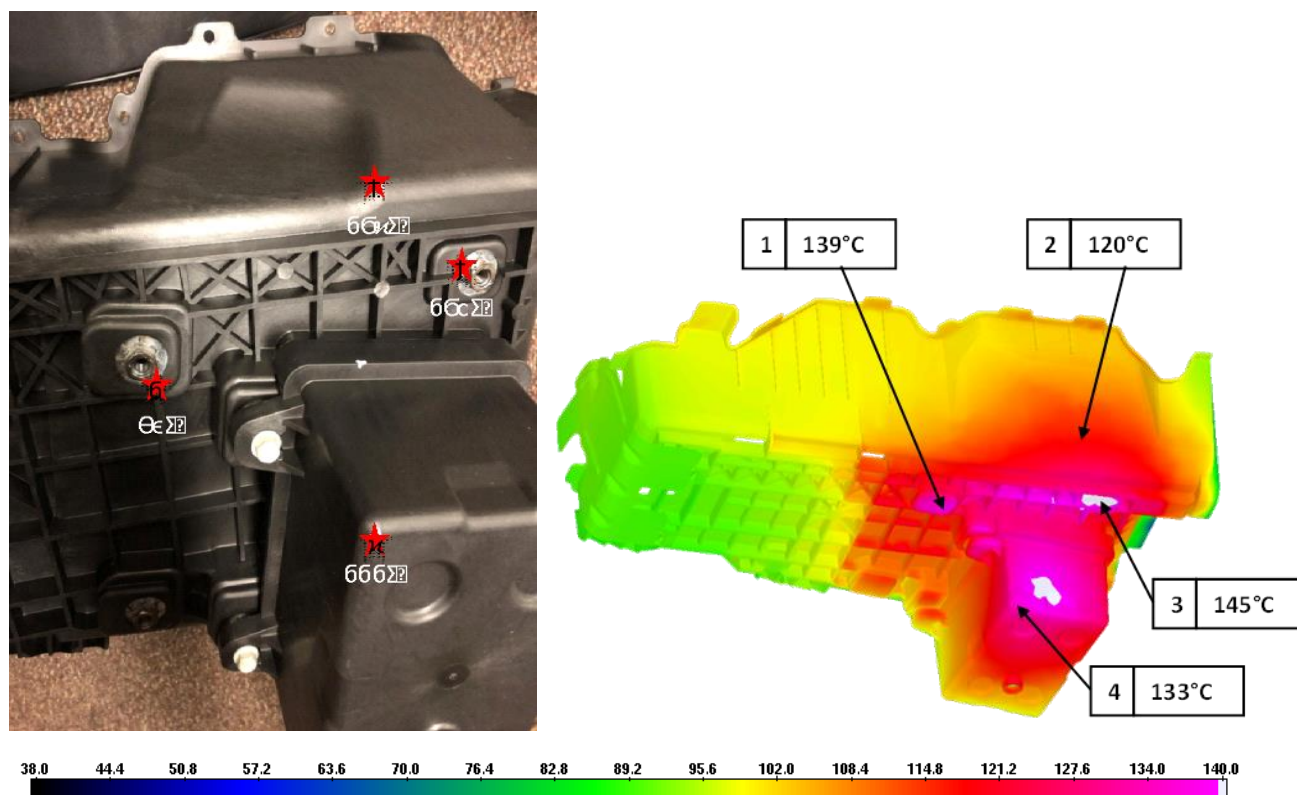


Figura 15 Comparativa de las temperaturas de la simulación inicial sin escudo térmico y las temperaturas máximas obtenidas en la prueba física sin escudo térmico

En la tabla 1 se resumen los resultados de las simulaciones de CFD con y sin escudo en el soporte de la batería, así como los resultados de la prueba en el túnel de viento que permitieron detectar la falta de correlación. Para las cuatro ubicaciones de los termopares en el soporte de la batería, sin escudo térmico, hay una gran diferencia entre los resultados de la simulación de CFD y de la prueba física. La temperatura máxima permitida para el polipropileno es de 135°C, por lo que los resultados de CFD y las pruebas físicas arrojaron señales contrarias para la toma de decisiones en el programa.

Tabla 1 Comparativa de los resultados de las simulaciones iniciales con los resultados de las pruebas físicas para los cuatro termopares colocados en el soporte de la batería

Ubicación (soporte de batería)	CFD con escudo en soporte de la batería °C	CFD sin escudo en soporte de la batería °C	Prueba física sin escudo en soporte de la batería °C	% error sin escudo en soporte de la batería
1	140	139	89	56%
2	107	120	104	15%
3	140	145	106	37%
4	130	133	111	20%
Promedio	129	134	103	30%

La adición de un escudo térmico innecesario por sobreestimación de temperatura de CFD implicó tiempos y costos adicionales al programa, por lo que fue crítico identificar las razones de la falta de correlación y generar una propuesta de parámetros de simulación adecuados y basados en los fenómenos físicos involucrados que permitieran predecir, de manera correcta, las temperaturas para éste y para futuros programas vehiculares.

El funcionamiento de la batería es altamente sensible a las temperaturas de operación; es crítico poder predecir su temperatura durante el desarrollo de un programa a través de las simulaciones y lograr que los números se asemejen a los resultados de las pruebas físicas.

La radiación del escudo térmico del catalizador incide directamente sobre el soporte de la batería, por lo que, para estudiar la correlación de éste, además de los cuatro termopares colocados sobre el escudo térmico del soporte de la batería, se agregaron otros cuatro termopares en el escudo térmico del catalizador. Su ubicación se muestra en la figura 16.

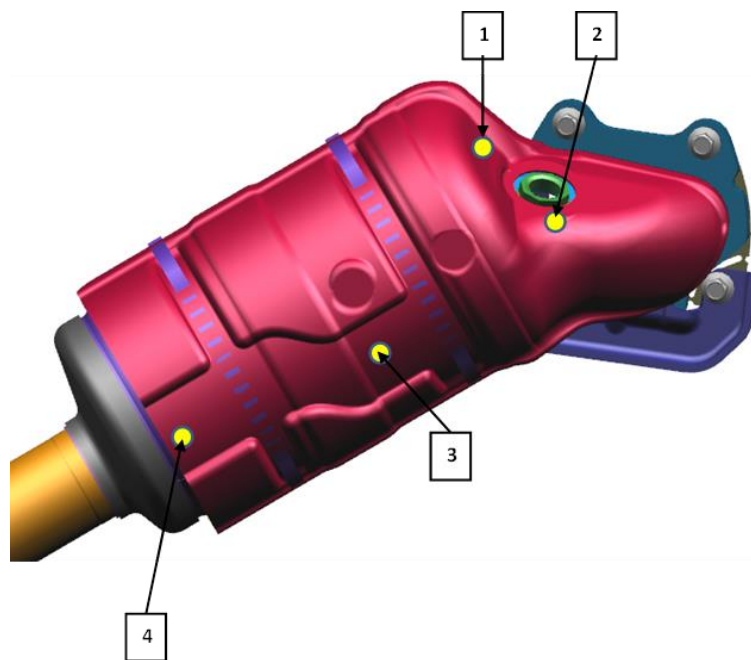


Figura 16 Ubicación de los cuatro termopares colocados en el escudo térmico del catalizador

Al comparar los resultados de las pruebas físicas contra la simulación, ahora para el catalizador, se observa también una gran variación en los resultados, (ver tabla 2). También se identifica que los errores más grandes están en las zonas de las depresiones (termopares 3 y 4).

Tabla 2 Comparativa de los resultados de las simulaciones iniciales con los resultados de las pruebas físicas para los cuatro termopares colocados en el escudo térmico del catalizador

Ubicación (catalizador)	CFD sin escudo en soporte de la batería °C	Prueba física sin escudo en soporte de la batería °C	Porcentaje de error %
1	401	448	-10%
2	404	402	0%
3	575	423	36%
4	528	373	42%
Promedio	477	412	17%

Capítulo 3

Metodología

En este capítulo se describe la metodología propuesta para dar solución al problema de correlación descrito en el capítulo 2. Se explica cómo se partió el problema y se resolvió en primer lugar la correlación del escudo térmico del catalizador, por ser la principal fuente de calor del soporte de la batería; en segundo lugar, una vez logrando la correlación del catalizador se trabajó con el soporte de la batería.

3.1 Separación de los fenómenos de radiación y convección

La radiación del escudo térmico del catalizador incide sobre el soporte de la batería, y por esta razón fue necesario estudiar la correlación de esta fuente de calor. Como se confirmó a partir de los resultados presentados en la tabla 2, las temperaturas del escudo del catalizador son más altas que las de la prueba física, sobretodo en sus depresiones.

A partir de los resultados de la falta de correlación del escudo térmico del catalizador se toma la decisión de separar el problema en partes y modificar en etapas los parámetros de simulación que afectan la óptima representación de los mecanismos de transferencia de calor implicados.

3.1.1 *Conducción del catalizador al escudo térmico multicapa que lo cubre*

Al revisar los resultados de las pruebas y ver que la mayor falta de correlación se tiene en las depresiones del escudo térmico del catalizador, se decide trabajar en primer lugar con las variables relacionadas con la conducción del catalizador al escudo térmico que lo cubre, y con esto representar correctamente la radiación del escudo del catalizador al soporte de la batería.

Los parámetros de simulación a estudiar relacionados con la conducción son los siguientes:

Porcentaje de contacto: en la región en la que el escudo térmico se apoya sobre el catalizador, TAItherm nos pide definir un porcentaje de contacto para simular la conducción. Puede observarse en la fotografía de la figura 17 que esta zona tiene pliegues, por lo que es incorrecto asignar un 100% de contacto como se hacía en las simulaciones inicialmente.

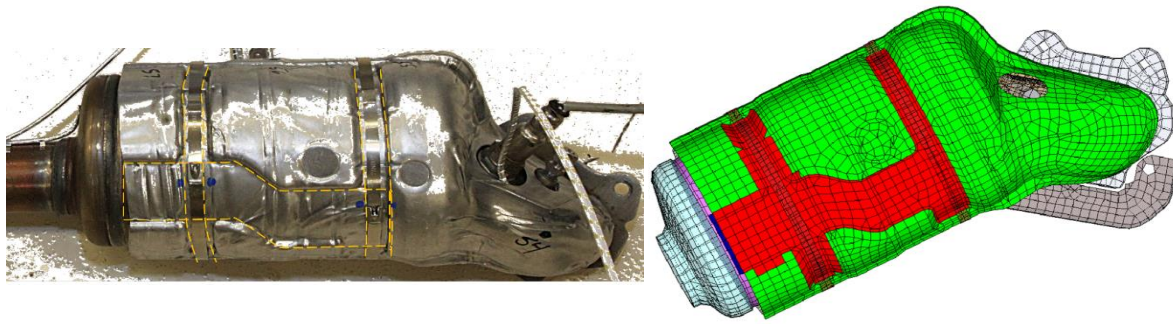


Figura 17 A la izquierda se muestra una fotografía utilizada para mostrar los pliegues existentes en las depresiones del escudo térmico del catalizador. A la derecha se observa la región definida en TAItherm para representar la conducción.

Resistencia térmica de contacto: TAItherm requiere este valor, pero como se estudió en el Capítulo 1.2, son muchos los factores que hacen que su determinación sea a prueba y error. Un factor adicional para su complejidad, radica en que este escudo está integrado por dos capas externas y una capa de aislante en su interior.

3.1.2 Convección que rodea al soporte de la batería

Habiendo logrado una buena correlación para el escudo del catalizador y habiendo asegurado que la radiación ya no fuera la causa de la falta de correlación, se trabajó posteriormente con la convección alrededor del soporte de la batería. Los parámetros de simulación a estudiar, relacionados con la convección son los siguientes:

- Método para el mapeo de la convección: el programa de CFD, como fue explicado en el capítulo 1.7, resuelve la convección y genera una nube de puntos con la información, en términos de las velocidades y temperaturas del aire (V y T) para CFD-ACE+ o del coeficiente de transferencia de calor por convección y la temperatura del aire (h y T) en el caso de STAR-CCM+. Ambas convecciones pueden ser usadas en TAItherm.
- Longitud característica forzada: este parámetro sólo es requerido en TAItherm cuando el mapeo de la convección es proveniente de CFD-ACE+ y está en términos de velocidad y temperatura (V y T).

3.2 Metodología propuesta para la investigación

La metodología propuesta se divide en cuatro etapas:

- Etapa de preparación
- Etapa A: resistencia térmica de contacto del escudo térmico del catalizador
- Etapa B: longitud característica forzada del escudo térmico del catalizador
- Etapa C: longitud característica forzada del soporte de la batería

3.2.1 Etapa de preparación

El objetivo de esta etapa es generar un mapa de temperaturas del escudo térmico del catalizador que coincida con las temperaturas que se tienen registradas en las ubicaciones de los termopares. Para poder lograrlo se encontró un **valor adecuado de resistencia de contacto** que es **válido únicamente para la longitud característica forzada determinada a partir de la observación del flujo**. Este perfil de temperatura del catalizador es más válido que tener sólo información de cuatro termopares y es usado para calcular la convección en las etapas A y B. Los parámetros de resistencia térmica de contacto y longitud característica forzada obtenidos son los que logran representar las temperaturas de la prueba para las cuatro ubicaciones de los termopares, sin embargo, no significa que sean los valores correctos a ser usados en futuras simulaciones.

Para lograr obtener el perfil de temperaturas del catalizador fue necesario realizar los pasos mostrados en la figura 18 en CFD-ACE+ y TAITherm:

- 1) Obtener a través de CFD-ACE+ el mapa de convección, una nube de puntos de V y T
- 2) Definir una longitud característica forzada para el catalizador y el soporte de la batería de acuerdo a la observación de la dirección del flujo de aire que los rodean.
- 3) Hacer una correcta selección de los elementos que están en contacto directo entre el escudo térmico del catalizador y el catalizador a través de la asignación de distintas partes.
- 4) Asignar a través de una fotografía el porcentaje de contacto para las zonas a las que se les determinará un contacto térmico.
- 5) Modificar manualmente la resistencia de contacto para las zonas a las que se les determinará un contacto térmico en TAITherm hasta lograr que la distribución de temperaturas coincida con la de los termopares agregados al escudo del catalizador.

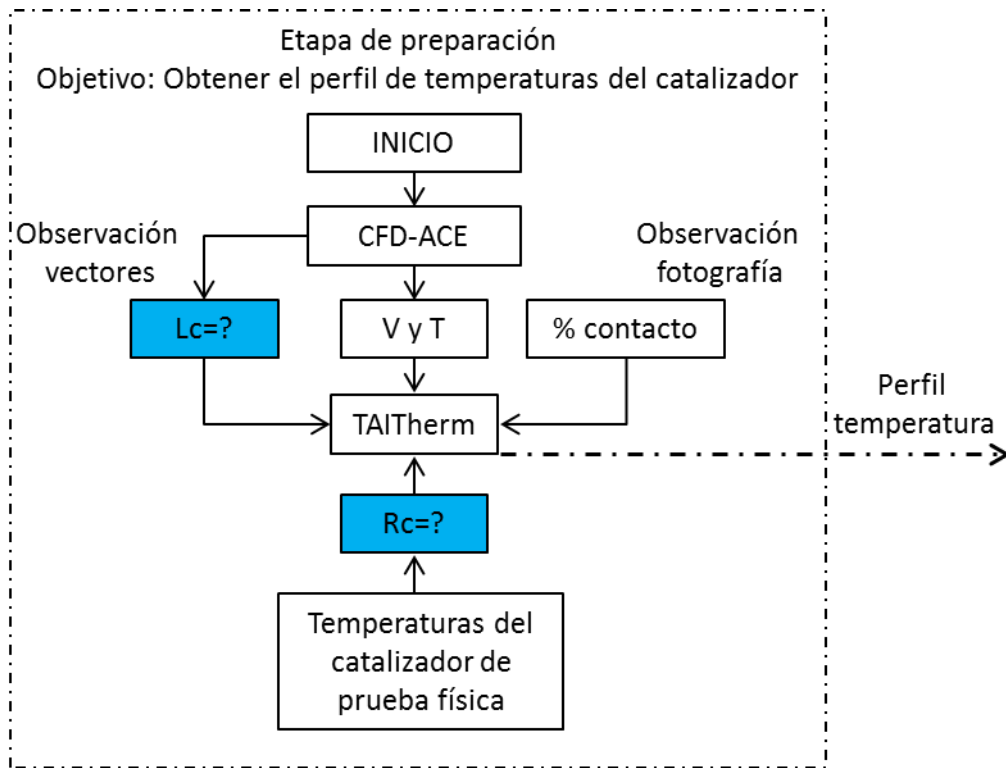


Figura 18 Etapa de preparación en la que se obtiene un perfil de temperaturas del escudo térmico del catalizador que coincide con las temperaturas obtenidas en las pruebas físicas

3.2.2 Etapa A: resistencia térmica de contacto del escudo térmico del catalizador

El objetivo de esta etapa es encontrar el **parámetro de simulación adecuado para la resistencia térmica de contacto**, para lograrlo se requiere hacerlo en STAR-CCM+ a modo de que la convección esté en formato h y T y que no sea requerida la determinación de una longitud característica forzada en TAItherm que dependa de la observación del flujo como se hizo en la etapa de preparación.

A partir del perfil de temperatura del catalizador encontrado en la etapa de preparación y con la finalidad de obtener una nube de puntos de h y T , que no sea afectada por la longitud característica forzada que el usuario determine, fueron realizados en STAR-CCM+ y TAItherm: los pasos siguientes que son mostrados en la figura 19:

- 1) Se asignó el perfil de temperaturas del catalizador obtenido en TAItherm previamente como fuente de calor en STAR-CCM+ para recalculer la nube de puntos, pero ahora en formato h y T .
- 2) Usando la nube de puntos h y T en TAItherm y ahora sin la necesidad de asignar una longitud característica forzada se recalcula el perfil de temperaturas del escudo del catalizador, partiendo del valor de resistencia térmica de contacto obtenido en la fase de preparación.

- 3) Se modifica manualmente la resistencia de contacto para las zonas a las que se les determinará un contacto térmico en TAItherm hasta lograr que la distribución de temperaturas coincida con la de los termopares agregados al escudo del catalizador.

En esta etapa se logró representar el perfil de temperatura del catalizador y se encontró el **parámetro de simulación adecuado para la resistencia térmica de contacto**, que no está en función de una longitud característica forzada determinada a partir de la observación. Este valor puede ser utilizado en futuras simulaciones que tengan catalizadores con escudos térmicos de las mismas propiedades.

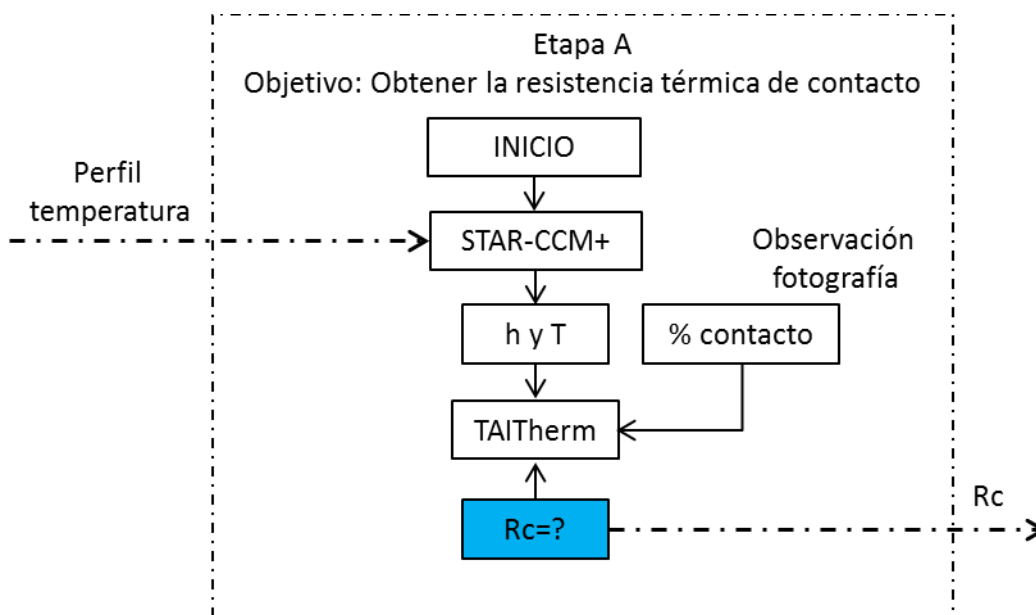


Figura 19 Etapa A en la que se obtiene el valor de resistencia térmica de contacto

3.2.3 Etapa B: longitud característica forzada del escudo térmico del catalizador

El objetivo de esta etapa es determinar el valor de longitud característica forzada para el catalizador que logra representar el perfil de temperaturas obtenido en la etapa de preparación y que coincida con los valores en los cuatro termopares. Esta etapa tiene también la finalidad de identificar la variación que existe entre el valor de longitud característica forzada encontrada y el asignado a partir de la observación de los vectores.

Los pasos a seguir son mostrados en la figura 20 y listados a continuación:

- 1) Con la finalidad de obtener la longitud característica forzada correcta se recurre de nuevo a la nube de puntos de V y T en CFD-ACE+.
- 2) En TAItherm se utiliza el valor de resistencia térmica de contacto encontrada en la etapa A.

- 3) Se modifica manualmente la longitud característica forzada del escudo térmico de catalizador en TAItherm hasta lograr que la distribución de temperaturas coincida con la obtenida mediante h y T .

En esta etapa se logró representar el perfil de temperatura del catalizador y se encontró el **parámetro de simulación adecuado para la longitud característica forzada del escudo térmico del catalizador.**

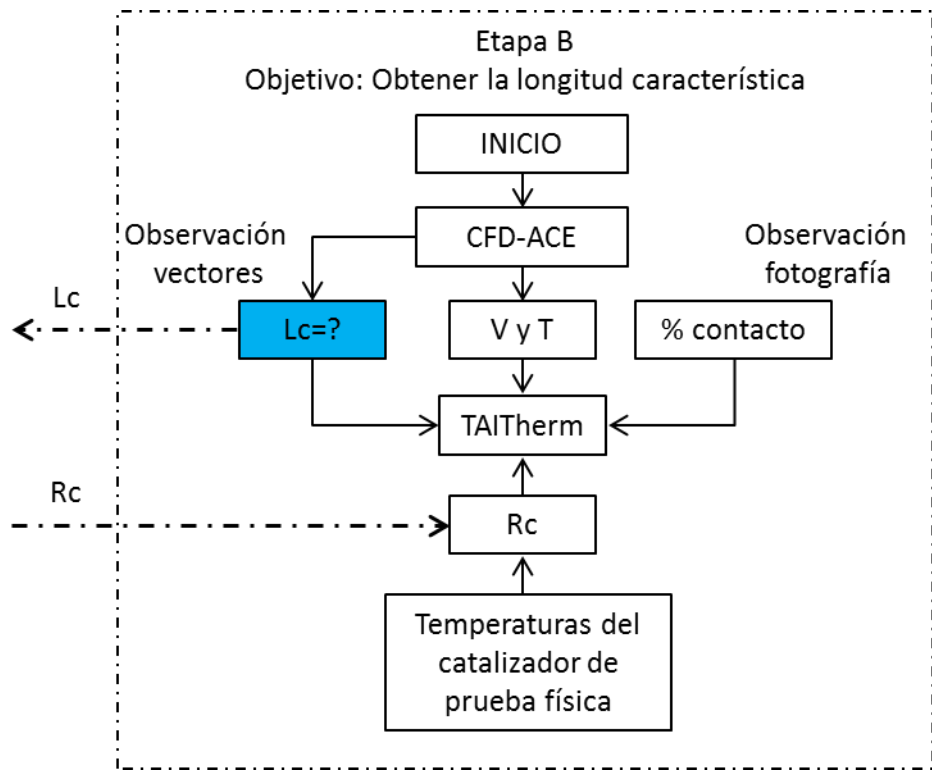


Figura 20 Etapa B en la que se obtienen los valores de longitud característica forzada para el escudo térmico del catalizador

3.2.4 Etapa C: longitud característica forzada del soporte de la batería

A partir de las dos diferentes nubes de puntos, V y T de CFD-ACE+ y h y T de STAR-CCM+ y del uso de los parámetros de simulación encontrados en las etapas A y B, se tienen dos simulaciones de TAItherm que representan perfectamente la temperatura del escudo térmico del catalizador. La variable con la que se trabaja en esta etapa es la longitud característica forzada del soporte de la batería, con el objetivo de lograr su correcta correlación. En la figura 21 y en la siguiente lista se explican los pasos:

- 1) En esta etapa se analizó la convección alrededor del soporte de la batería para las dos nubes de puntos

- 2) Para los dos modelos de TAItherm se comparan los diferentes perfiles de temperatura para el soporte de la batería y se analiza la correlación con los datos de prueba disponibles en la ubicación de los cuatro termopares.
- 3) Con la finalidad de obtener la longitud característica forzada correcta para el soporte de la batería se recurre de nuevo a la nube de puntos de V y T y se modifica manualmente la longitud característica forzada del soporte de la batería en TAItherm hasta lograr que la distribución de temperaturas coincida con la de los termopares agregados al soporte de la batería.

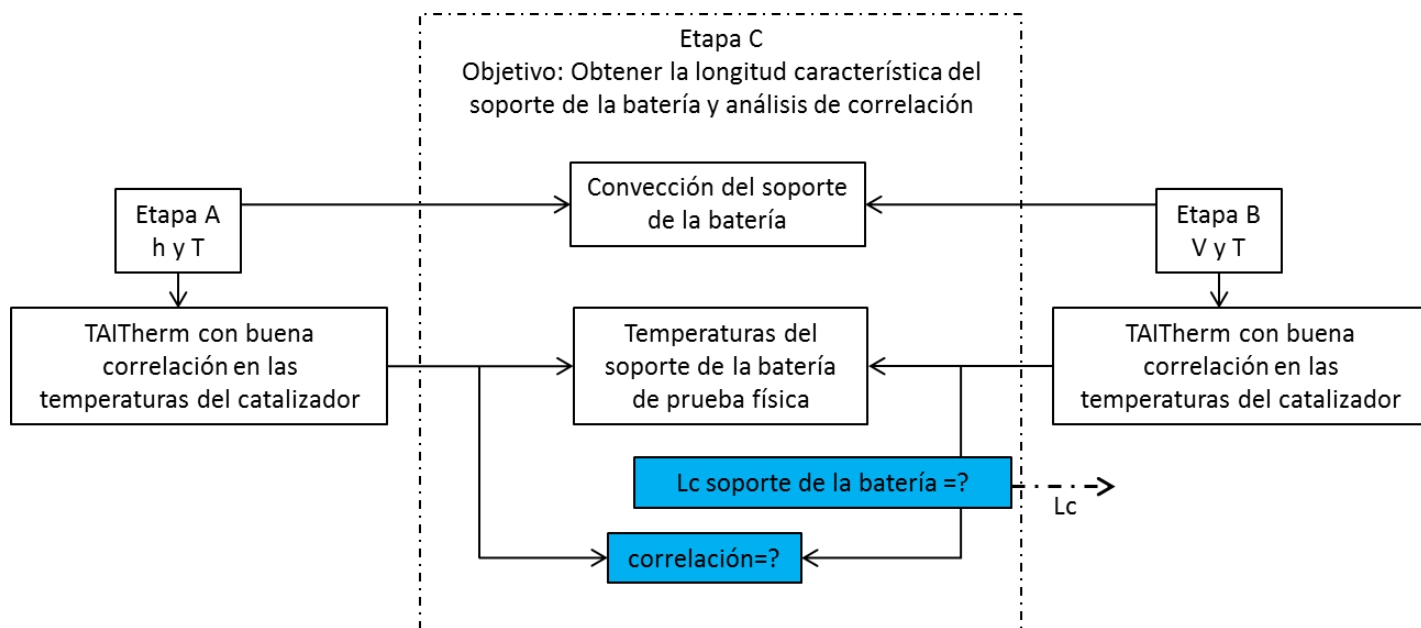


Figura 21 Etapa C en la que se obtienen los valores de longitud característica forzada para el soporte de la batería

Capítulo 4

Resultados y discusión

Los resultados se presentarán en las mismas secciones presentadas para la metodología en el capítulo anterior:

- Etapa de preparación
- Etapa A: resistencia térmica de contacto del escudo térmico del catalizador
- Etapa B: longitud característica forzada del escudo térmico del catalizador
- Etapa C: longitud característica forzada del soporte de la batería

4.1 Etapa de preparación: perfil de temperatura y porcentaje de contacto

La etapa de preparación se lleva a cabo con la finalidad de obtener un perfil de temperatura del escudo térmico del catalizador que permita hacer un mejor cálculo de la convección para las siguientes etapas de desarrollo. No conocemos el valor correcto de longitud característica forzada ni el valor de la resistencia térmica de contacto para el escudo térmico del catalizador, pero la intención es variar esta última para lograr un perfil de temperatura que dé mayor información que los cuatro termopares colocados.

- 1) Se obtuvo a través de CFD-ACE+ el mapa de convección, una nube de puntos de V y T.
- 2) Se definió una longitud característica forzada de acuerdo a la observación de la dirección del flujo de aire alrededor del catalizador y del soporte de la batería.

En las figuras 22 y 23 puede observarse que el flujo de aire alrededor del soporte de la batería y del escudo térmico del catalizador no está completamente dirigido del frente del vehículo hacia atrás, debido, en gran medida, a que el aire que entra por la parrilla es impulsado por el ventilador, la determinación de una longitud característica forzada para estas partes es una tarea compleja.

Se decide usar el valor de la proyección de estas partes en el eje X, sin embargo, sabemos que ésta no describe de manera correcta la longitud característica forzada.

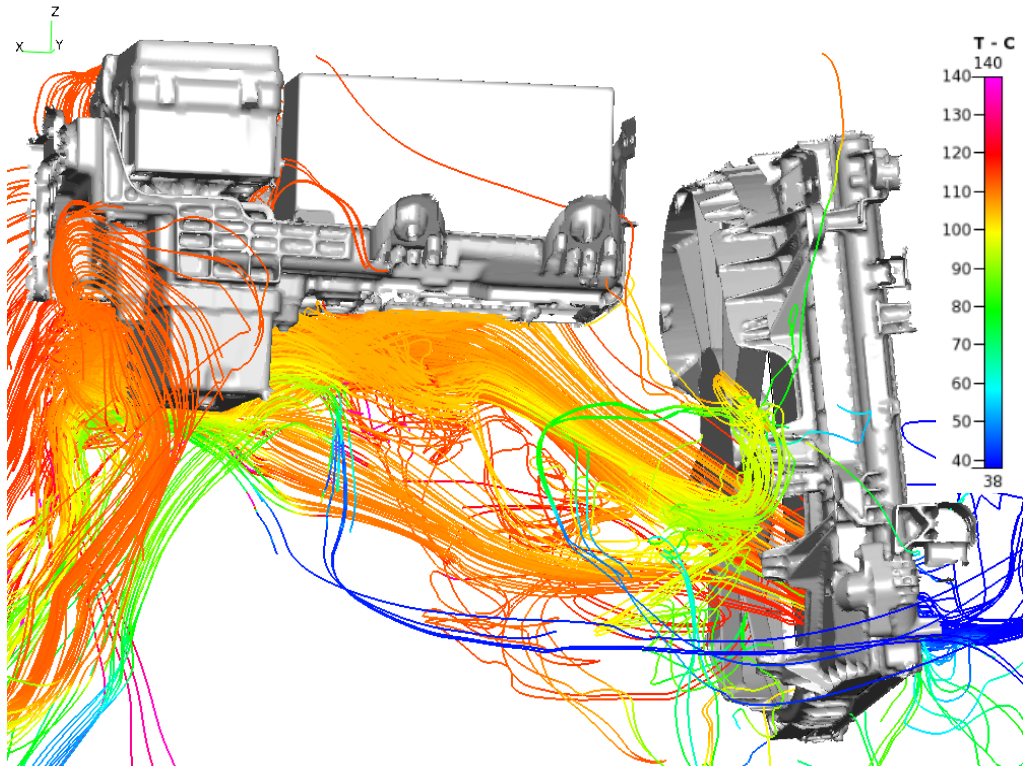


Figura 22 Análisis del flujo de aire en el soporte de la batería

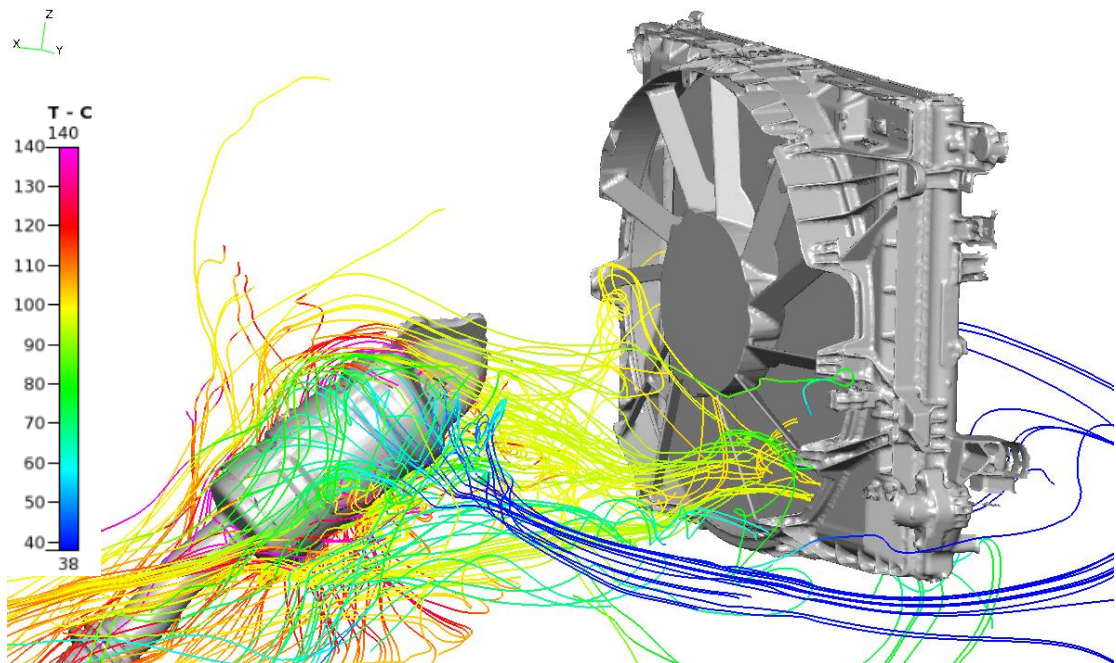


Figura 23 Análisis del flujo de aire en el escudo térmico del catalizador

- 3) A partir de la observación detallada del CAD se encontró que era conveniente separar en diferentes partes las depresiones del resto del escudo térmico. En la figura 24 del

lado izquierdo, se puede observar el proceso anterior en el que el TAItherm reconocía de manera automática las regiones de contacto por su cercanía, estableciendo conducción en esos elementos. En la misma figura del lado derecho, se separó manualmente la región que efectivamente está en contacto con el catalizador y como puede observarse, el área de contacto disminuyó.

A través de la asignación de distintas partes, se logró definir de mejor manera el área de contacto y se eliminaron elementos de contacto inexistentes que TAItherm asignaba solo por su cercanía.

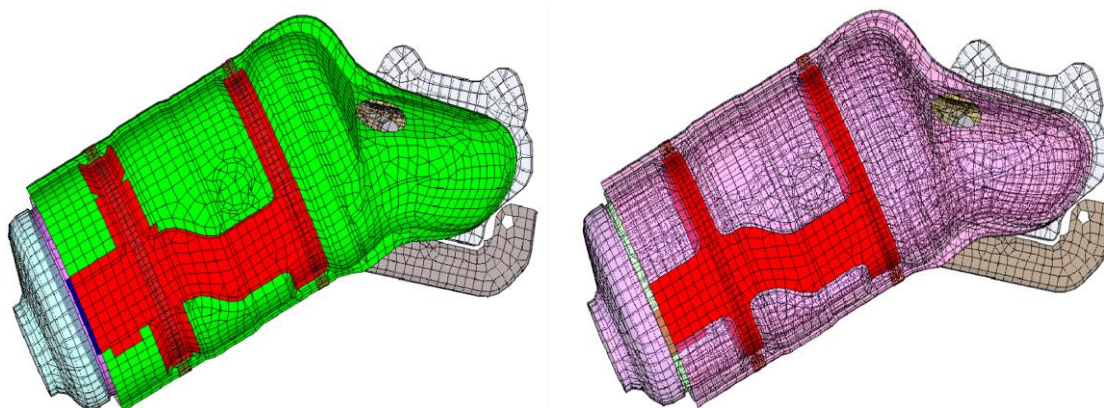


Figura 24 Asignación de regiones de conducción mostrando del lado izquierdo el proceso automático llevado a cabo anteriormente y del lado derecho el nuevo proceso manual

- 4) A través de la fotografía de la figura 25, se observó la gran cantidad de pliegues en las zonas en las que el escudo térmico se apoya en el catalizador, es por esto que a partir de su observación se determinó un porcentaje de contacto entre el catalizador y el escudo térmico de 65%.

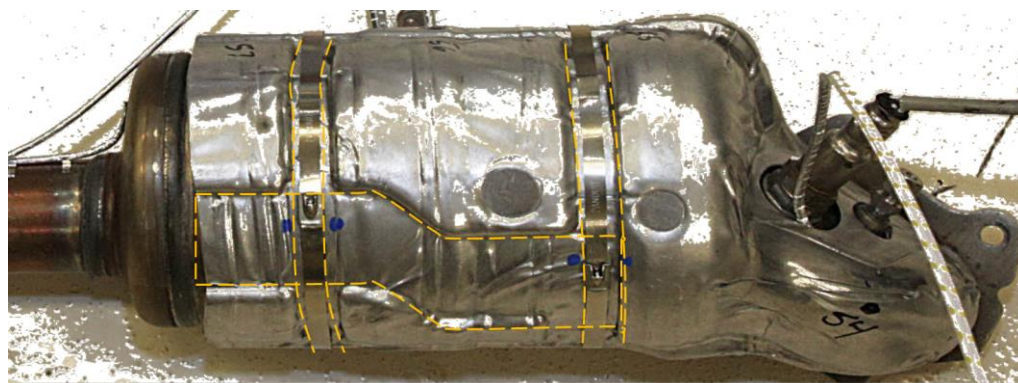


Figura 25 Fotografía utilizada para definir el porcentaje de contacto para la zona en las que el escudo térmico se apoya en el catalizador

En la figura 26, se muestran las ubicaciones de los termopares colocados sobre el escudo térmico del catalizador. Como puede observarse, en las depresiones se colocaron los termopares 3 y 4.

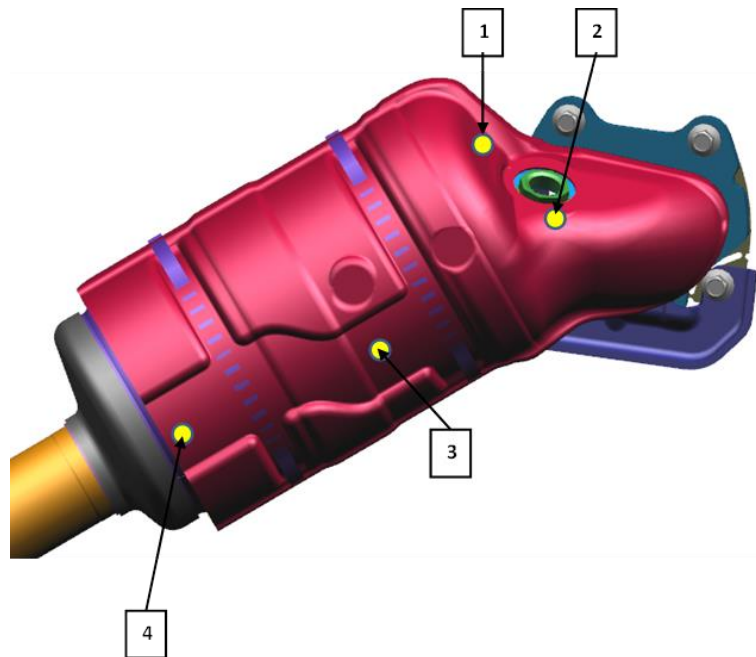


Figura 26 Ubicación de los cuatro termopares colocados en el escudo térmico del catalizador

A partir de la observación detallada de la fotografía del escudo térmico y del CAD, se hicieron los ajustes mencionados en los pasos 3 y 4, en relación al contacto en las depresiones y el porcentaje de contacto, y se corrió de nuevo la simulación inicial. En la figura 27 se pueden observar el caso a y el caso b; el primero muestra la condición inicial, es decir, cómo se simulaba antes de esta tesis: se identificaban de manera automática en TAITherm los elementos cercanos a los que se les asignaba conducción, el porcentaje de contacto era de 100%. En el caso b, se muestran las mejoras en cuanto a la asignación manual de las zonas de conducción y se ajusta el porcentaje de contacto a 65%, debido a los pliegues. Para ambos casos la resistencia térmica es la que sistemáticamente se asignaba y que corresponde a $0.001 \frac{m^2 K}{W}$.

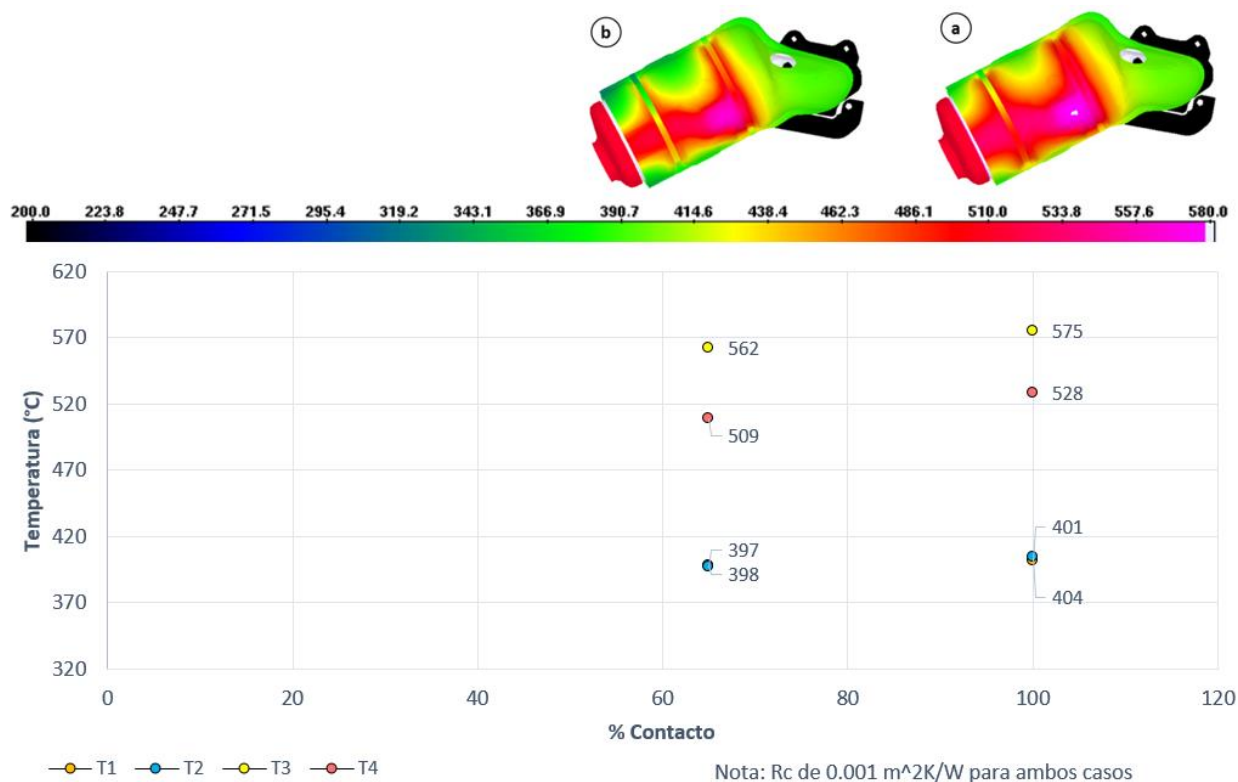


Figura 27 Etapa de preparación: perfiles de temperatura obtenidos en TAItherm al variar la asignación de las zonas de contacto y el porcentaje de contacto

A partir de la observación de la figura 27, podemos concluir que la temperatura del escudo térmico del catalizador disminuyó al definir correctamente las regiones de contacto y el porcentaje de contacto, y que los termopares 3 y 4 que están ubicados en las depresiones, son los más sensibles a estos ajustes.

- 5) Como siguiente paso se modificó gradualmente la resistencia de contacto para las zonas en las que se determinó un contacto térmico en TAItherm, hasta lograr que la distribución de temperatura coincidiera con la de los termopares agregados al escudo del catalizador.

La resistencia térmica de contacto utilizada a lo largo del desarrollo del programa, de manera arbitraria, fue de $0.001 \frac{m^2 K}{W}$. Para encontrar un valor adecuado para representar el perfil de temperaturas de las pruebas, se incrementó de manera arbitraria su valor en un orden de magnitud a $0.01 \frac{m^2 K}{W}$ y se evaluó también un valor de $0.019 \frac{m^2 K}{W}$.

En la figura 28 se muestra la evolución del perfil de temperatura del escudo térmico del catalizador con el incremento en la resistencia térmica de contacto (casos b-d). Para los tres casos el porcentaje de contacto es de 65%.

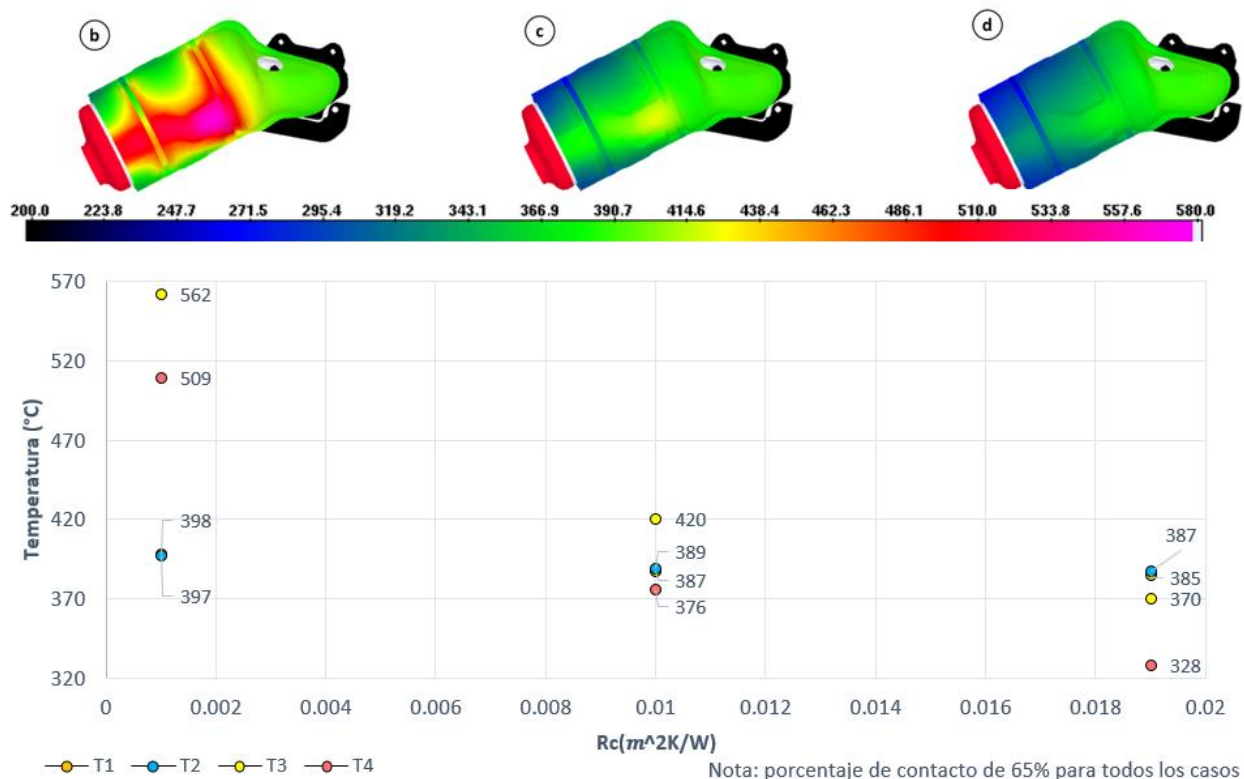


Figura 28 Etapa de preparación: perfiles de temperatura obtenidos en TAItherm al variar la resistencia térmica de contacto.

A partir de la figura 28, podemos observar la disminución de la temperatura del escudo térmico al incrementar la resistencia térmica de contacto. El caso d, con la mayor resistencia térmica, muestra un perfil más frío que el caso c y mucho más frío que el caso b.

En la tabla 3, se muestra un resumen de los resultados de la prueba física y los resultados de las simulaciones a-d.

Tabla 3 Etapa de preparación: temperaturas obtenidas en TAItherm al variar el porcentaje de contacto y la resistencia térmica de contacto

Caso	Nombre	CFD o Prueba	R_c	L_c	% contacto	T1	T2	T3	T4	Promedio
a	Condición Inicial	CFD	0.001	Proyección en eje X	100	401	404	575	528	477
b	Primera iteración	CFD	0.001	Proyección en eje X	65	398	397	562	509	467
c	Segunda iteración	CFD	0.01	Proyección en eje X	65	387	389	420	376	393
d	Tercera iteración	CFD	0.019	Proyección en eje X	65	385	387	370	328	368
e	Prueba física	Prueba	NA	NA	NA	448	402	423	373	412

Como puede verse en la tabla 3, la segunda iteración con valores de 65% de contacto y con la resistencia térmica de $0.01 \frac{m^2K}{W}$, generan temperaturas cercanas a las obtenidas en la prueba física para los termopares tres y cuatro, que son los más sensibles a la conducción al estar en las zonas de depresión donde el escudo término se apoya directamente sobre el catalizador. Para esta misma iteración puede observarse que se cuenta con una predicción cercana en el segundo

termopar, sin embargo, para el primer termopar no se puede decir lo mismo. Esto puede verse con mayor facilidad en la tabla 4, donde se muestra la diferencia entre la segunda iteración y la prueba física en porcentajes de error.

Tabla 4 Etapa de preparación: comparación entre los resultados de la segunda iteración y la prueba física para las temperaturas del catalizador

Caso	Nombre	CFD o Prueba	Rc	Lc	% contacto	T1	T2	T3	T4	Promedio
c	Segunda iteración	CFD	0.01	Proyección en eje X	65	387	389	420	376	393
e	Prueba física	Prueba	NA	NA	NA	448	402	423	373	412
% de error						-14%	-3%	-1%	1%	-4%

En la figura 29, podemos advertir pliegues en la zona del primer y segundo termopar que no existen en el modelo, el claro existente en el CAD entre la cara interna del escudo térmico del catalizador y el catalizador no está presente en el vehículo. Al observar temperaturas incluso más elevadas en estas zonas que en las que de acuerdo con el CAD están en contacto, se concluye que el perfil de temperaturas ya captura de manera correcta la conducción.

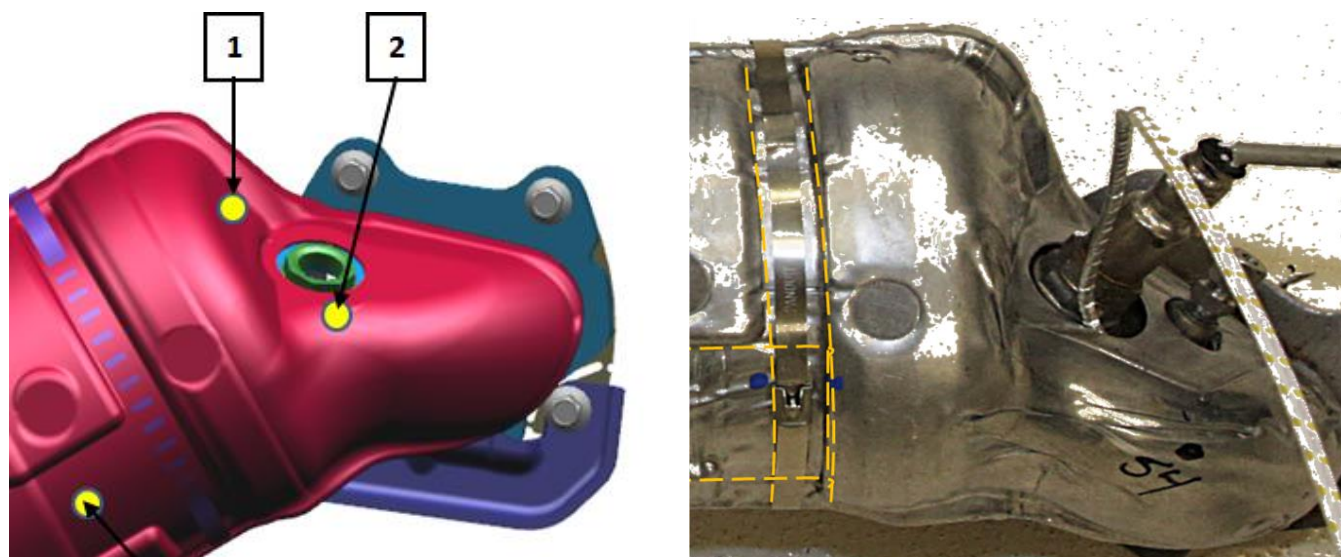


Figura 29 Zona de pliegues encontrados en las ubicaciones uno y dos de los termopares

Sabemos que el valor de resistencia térmica de $0.01 \frac{m^2 K}{W}$, es el que logra representar de una mejor manera lo ocurrido en la prueba, con excepción de las zonas en las que se encuentran los pliegues. Este valor es únicamente válido para los valores de longitud característica forzada que se determinaron usando la proyección en X, es decir, en esta etapa no hemos encontrado la resistencia térmica de contacto y no conocemos la longitud característica forzada. Pero contamos con un perfil de temperatura que servirá para calcular la convección usada en las etapas A y B.

4.2 Etapa A: resistencia térmica de contacto del escudo térmico del catalizador

Usando el perfil de temperatura del catalizador obtenido en TAItherm. En la etapa de preparación, como fuente de calor, se realizó lo siguiente:

- 1) Se obtuvo la nube de puntos de h y T a partir de STAR-CCM+
- 2) Con la nube de puntos de h y T se corrió la simulación en TAItherm, ahora sin la necesidad de asignar una longitud característica forzada, se recalculó el perfil de temperaturas del escudo del catalizador partiendo del valor de resistencia térmica de contacto de $0.01 \frac{m^2 K}{W}$ encontrado en la etapa de preparación.
- 3) Se modificó manualmente la resistencia térmica de contacto en TAItherm hasta lograr que la distribución de temperaturas coincidiera con la de los termopares agregados al escudo del catalizador.

En la figura 30 puede observarse la variación del perfil de temperatura, al modificar la resistencia térmica de contacto para los casos f-i. En el caso f se comienza con la resistencia térmica de contacto encontrada en la etapa de preparación y que corresponde a $0.01 \frac{m^2 K}{W}$; para los casos g-i se modifica con el fin de encontrar un resultado que coincida con la prueba física. Para todos los casos la separación de las zonas de contacto para las depresiones del escudo y el porcentaje de contacto para éstas se conservó en 65%.

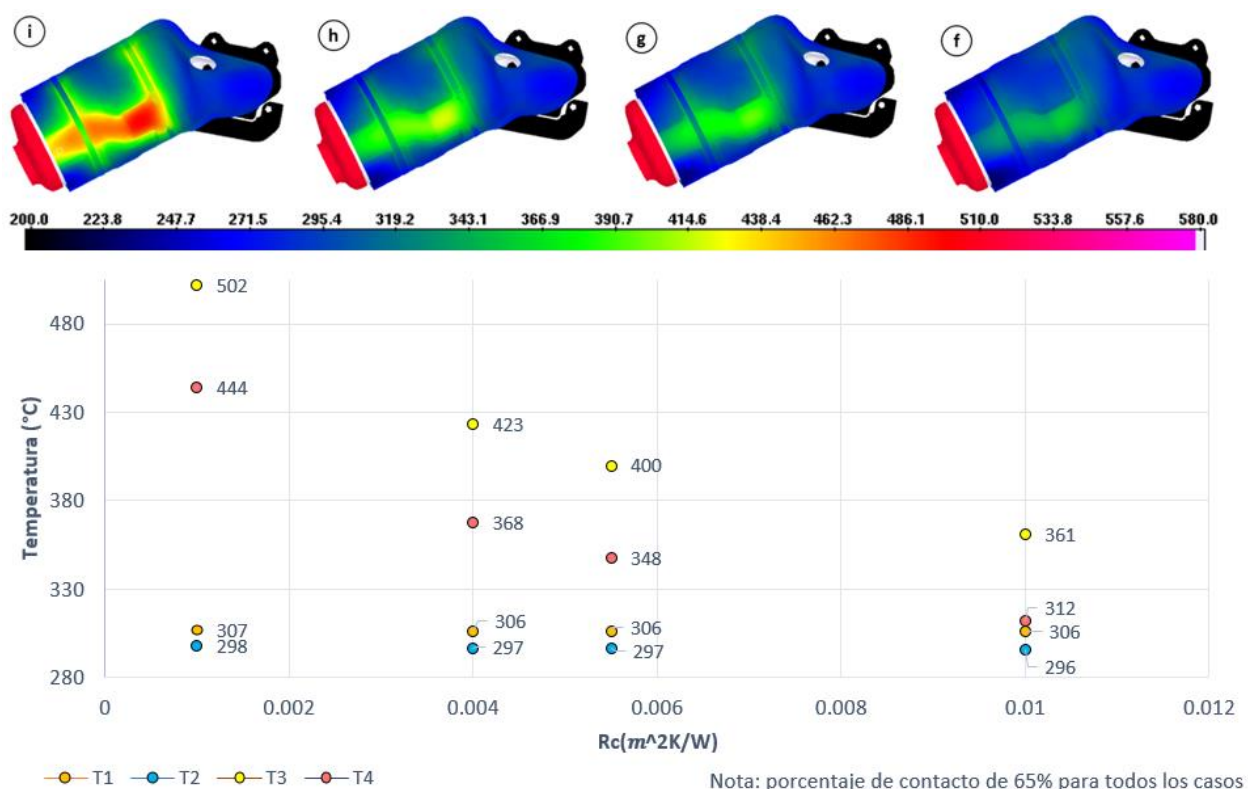


Figura 30 Etapa A: perfiles de temperatura obtenidos en TAItherm al variar la resistencia térmica de contacto

En la tabla 5, a manera de resumen, se muestran los registros de temperaturas de la prueba física, así como las obtenidas en CFD, para los cuatro casos simulados en la figura 30.

Tabla 5 Etapa A: temperaturas obtenidas en TAItherm al variar la resistencia térmica de contacto

Caso	Nombre	CFD o Prueba	Rc	Lc	% contacto	T1	T2	T3	T4	Promedio
f	Condición inicial	CFD	0.01	NA, (h y T)	65	306	296	361	312	319
g	Primera iteración	CFD	0.0055	NA, (h y T)	65	306	297	400	348	338
h	Segunda iteración	CFD	0.004	NA, (h y T)	65	306	297	423	368	349
i	Tercera iteración	CFD	0.001	NA, (h y T)	65	307	298	502	444	388
e	Prueba física	Prueba	NA	NA	NA	448	402	423	373	412

Como puede verse en la tabla 5, los valores de 65% de contacto, junto con la resistencia térmica de $0.004 \frac{m^2 K}{W}$ (caso h), generan valores de temperatura que correlacionan muy bien con los obtenidos en la prueba física para los termopares tres y cuatro, que son los más sensibles a la conducción al estar en la zona en la que el escudo término se apoya directamente sobre el catalizador. Para esta misma iteración puede observarse que se cuenta con una predicción lejana para el primer y segundo termopar.

Esto puede verse con mayor facilidad en la tabla 6, donde se muestra la diferencia entre la segunda iteración y la prueba física en porcentajes de error.

Tabla 6 Etapa A: comparación entre los resultados de la segunda iteración y la prueba física para las temperaturas del catalizador

Caso	Nombre	CFD o Prueba	Rc	Lc	% contacto	T1	T2	T3	T4	Promedio
h	Segunda iteración	CFD	0.004	NA, (h y T)	65	306	297	423	368	349
e	Prueba física	Prueba	NA	NA	NA	448	402	423	373	412
% de error						-32%	-26%	0%	-1%	-15%

En la etapa de preparación ya se había identificado una correlación pobre para las primeras dos ubicaciones de los termopares y se habían detectado pliegues existentes en la prueba que hacía que las temperaturas arrojadas fueran más altas, por lo tanto, se llevó a cabo una simulación en la que se representaba la posible conducción en los pliegues para comprobar si la predicción de la segunda iteración (caso h) mejoraba para esta zona. En la figura 31 puede verse, de lado derecho, la zona a la que se le agregó conducción para representar lo ocurrido en la prueba.

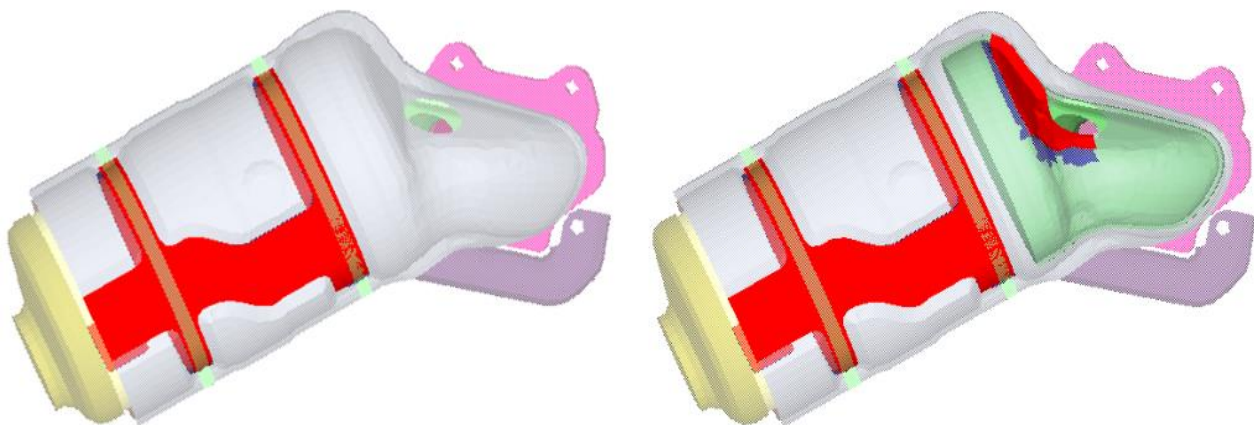


Figura 31 De lado izquierdo se muestra la asignación de contacto del caso h y de lado derecho se muestra la asignación de regiones con pliegues observados en la fotografía de la figura 21

A continuación, en la figura 32, se muestra la comparativa del perfil de temperaturas del caso h y del caso j. La única modificación fue el contacto agregado en la zona de pliegues para el caso j.

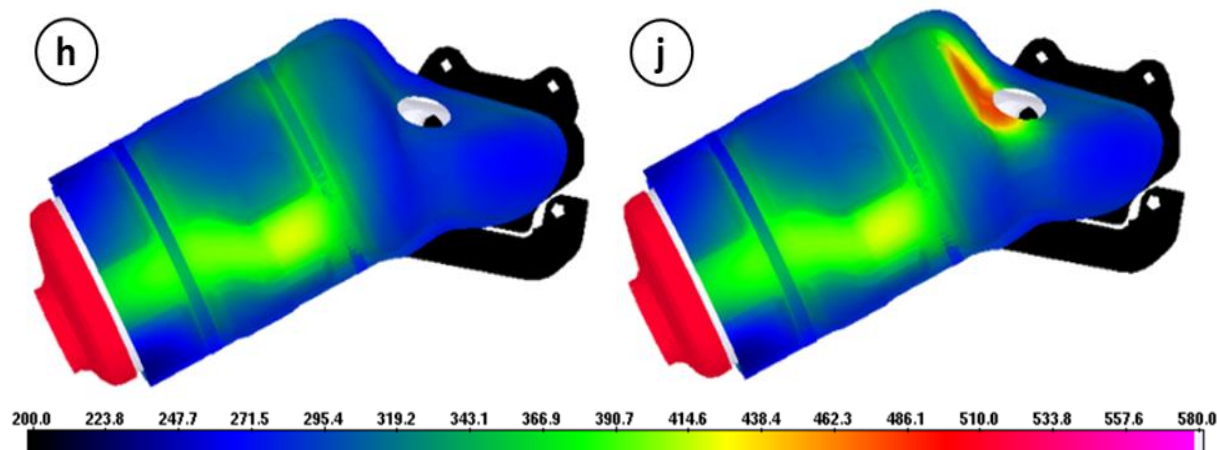


Figura 32 Etapa A: el caso j muestra el mapa de temperaturas obtenido en TAItherm al incluir el contacto por pliegues identificado en la fotografía del catalizador

Las temperaturas obtenidas para las simulaciones de la figura 32 se muestran en la tabla 7, para todas las ubicaciones, al capturar los pliegues, los valores son cercanos a los de la prueba física.

Tabla 7 Etapa A: temperaturas obtenidas en TAItherm al incluir el contacto por pliegues en la simulación

Caso	Nombre	CFD o Prueba	Rc	Lc	% contacto	Pliegues	T1	T2	T3	T4	Promedio
h	Segunda iteración	CFD	0.004	NA, (h y T)	65	No	306	297	423	368	349
j	Segunda iteración con pliegues	CFD	0.004	NA, (h y T)	65	Sí	436	396	423	368	406
e	Prueba física	Prueba	NA	NA	NA	Sí	448	402	423	373	412

Como se muestra en la tabla 8, el porcentaje de error pasó de -15% a -1% al capturar los pliegues.

Tabla 8 Etapa A: comparación entre los resultados de la segunda iteración con pliegues y la prueba física para las temperaturas del catalizador

Caso	Nombre	CFD o Prueba	Rc	Lc	% contacto	Pliegues	T1	T2	T3	T4	Promedio	
j	Segunda iteración con pliegues	CFD	0.004	NA, (h y T)	65	Sí	436	396	423	368	406	
e	Prueba física	Prueba	NA	NA	NA	Sí	448	402	423	373	412	
	% de error							-3%	-1%	0%	-1%	-1%

En la etapa A se logró obtener el valor de resistencia térmica de contacto de $0.004 \frac{m^2 K}{W}$, que a diferencia del valor obtenido en la etapa inicial de $0.01 \frac{m^2 K}{W}$, no está en función de la longitud característica forzada requerida por TAItherm cuando se importa la convección en términos de V y T. Al no estar en función de un valor definido por el usuario y al haber arrojado una excelente correlación con los valores de pruebas físicas, se determina que este valor representa el fenómeno físico de conducción entre el escudo térmico multicapa del catalizador y el catalizador.

Este valor de resistencia térmica de contacto de $0.004 \frac{m^2 K}{W}$ es un valor válido para usarse en simulaciones de programas vehiculares futuros en los que se tengan escudos térmicos montados sobre el catalizador, con las mismas propiedades físicas.

La temperatura máxima del escudo térmico del catalizador que se solía reportar previo a este análisis era de $580^\circ C$ y con estos nuevos parámetros de simulación pasó a $482^\circ C$ considerando los pliegues. El efecto de estos cambios en la correlación del soporte de la batería será analizado más adelante.

4.3 Etapa B: longitud característica forzada del escudo térmico del catalizador

- 1) Con la finalidad de obtener la longitud característica forzada correcta se recurre de nuevo a la nube de puntos de V y T en CFD-ACE+.
- 2) En TAItherm se utilizó el valor de resistencia térmica de contacto encontrada en la etapa A, que corresponde a $0.004 \frac{m^2 K}{W}$
- 3) Se modifica manualmente la longitud característica forzada del escudo térmico de catalizador en TAItherm hasta lograr que la distribución de temperaturas coincida con la obtenida mediante h y T, proveniente de STAR-CCM+.

El escudo térmico del catalizador se encuentra dividido en dos regiones: en la que existe un claro que separa el escudo térmico del catalizador y la de contacto directo, por esta razón se deben asignar dos valores de longitud característica forzada. En un principio se asignaron los valores de 297mm para el catalizador y 172 mm para las depresiones, por ser la proyección de la parte en el eje X, y debido a que el flujo va predominantemente en esa dirección. En la figura 33 se muestra la variación en las temperaturas del escudo térmico del catalizador al modificar la longitud característica forzada. Los demás parámetros se mantienen constantes de acuerdo a los valores que se han identificado en las etapas anteriores: porcentaje de contacto de 65% y resistencia térmica de $0.004 \frac{m^2 K}{W}$.

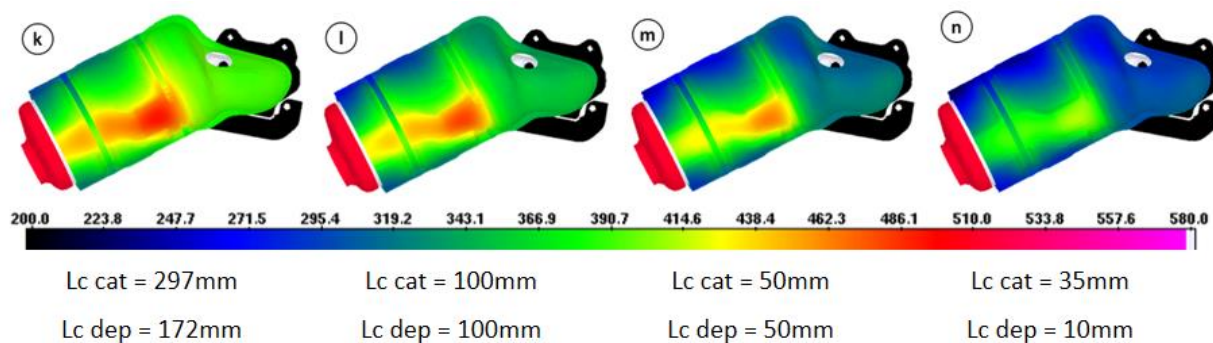


Figura 33 Etapa B: perfiles de temperatura obtenidos en TAItherm al variar la longitud característica forzada

Como se observa en la figura 33, hay una gran sensibilidad de la temperatura del escudo térmico ante la variación de la longitud característica forzada. En la tabla 9, se muestra el resultado del caso n, cuyos valores de longitud característica forzada son de 35mm y 10mm. Estos valores logran generar un perfil de temperatura muy parecido al obtenido a través de h y T, en la etapa A, para la misma resistencia térmica de contacto de $0.004 \frac{m^2 K}{W}$ (caso h).

Tabla 9 Etapa B: comparativa de temperaturas obtenidas en TAItherm para los casos h y n

Caso	Nombre	CFD o Prueba	Rc	Lc	% contacto	Pliegues	T1	T2	T3	T4	Promedio
h	Segunda iteración	CFD	0.004	NA, (h y T)	65	No	306	297	423	368	349
n	Tercera iteración	CFD	0.004	35mm y 10mm	65	No	304	293	411	369	344

De la misma manera que en la etapa A, se procedió a representar los pliegues del escudo térmico para verificar la correlación en las cuatro ubicaciones de los termopares. Los perfiles de temperatura son mostrados en la figura 34, la única modificación fue el contacto agregado en la zona de pliegues para el caso ñ.

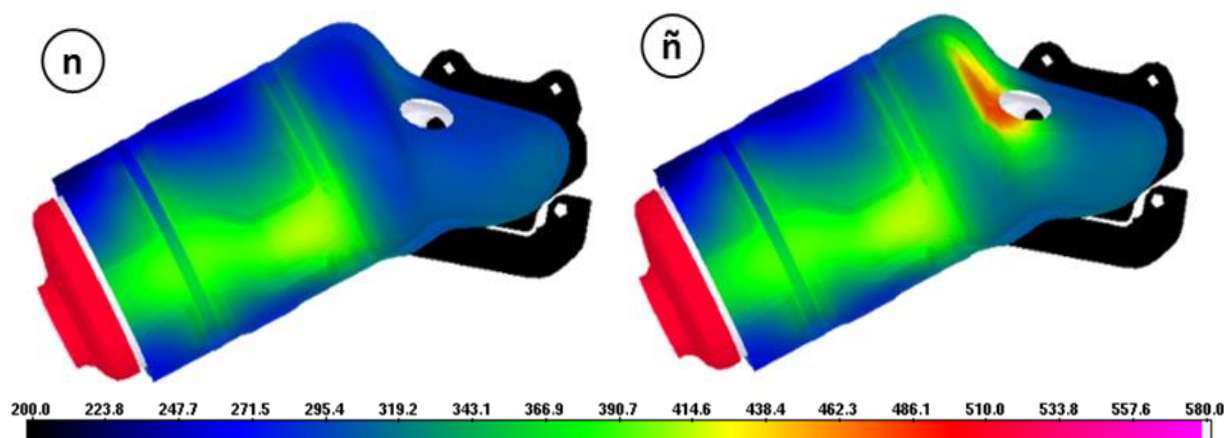


Figura 34 Etapa B: temperaturas obtenidas en TAItherm al incluir el contacto por pliegues en la simulación

Las temperaturas obtenidas para las simulaciones de la figura 34 se muestran en la tabla 10. Para todas las ubicaciones, al capturar los pliegues, los valores son cercanos a los de la prueba física.

Tabla 10 Etapa B: temperaturas obtenidas en TAItherm al incluir el contacto por pliegues en la simulación

Caso	Nombre	CFD o Prueba	Rc	Lc	% contacto	Pliegues	T1	T2	T3	T4	Promedio
n	Tercera iteración	CFD	0.004	35mm y 10mm	65	No	304	293	411	369	344
ñ	Tercera iteración con pliegues	CFD	0.004	35mm y 10mm	65	Sí	433	400	411	369	403
e	Prueba física	Prueba	NA	NA	NA	Sí	448	402	423	373	412

Como se muestra en la tabla 11, el porcentaje de error es de -2% al capturar los pliegues.

Tabla 11 Comparación entre los resultados de la tercera iteración con pliegues y la prueba física para las temperaturas del catalizador

Caso	Nombre	CFD o Prueba	Rc	Lc	% contacto	Pliegues	T1	T2	T3	T4	Promedio
ñ	Tercera iteración con pliegues	CFD	0.004	35mm y 10mm	65	Sí	433	400	411	369	403
e	Prueba física	Prueba	NA	NA	NA	Sí	448	402	423	373	412
% de error							-3%	0%	-3%	-1%	-2%

En la tabla 12 pueden observarse los valores obtenidos a través de las dos nubes de puntos (h y T y V y T) con y sin la representación de los pliegues en la zona de los termopares uno y dos. Como se observa en la tabla, al capturar los pliegues la correlación con la prueba física es muy buena para ambas nubes de puntos.

Tabla 12 Etapa A vs B: Comparativa de las temperaturas obtenidas en las etapas A y B antes y después de incluir los pliegues

Caso	Nombre	CFD o Prueba	Rc	Lc	% contacto	Pliegues	T1	T2	T3	T4	Promedio
h	Segunda iteración	CFD	0.004	NA, (h y T)	65	No	306	297	423	368	349
j	Segunda iteración con pliegues	CFD	0.004	NA, (h y T)	65	Sí	436	396	423	368	406
n	Tercera iteración	CFD	0.004	35mm y 10mm	65	No	304	293	411	369	344
ñ	Tercera iteración con pliegues	CFD	0.004	35mm y 10mm	65	Sí	433	400	411	369	403
e	Prueba física	Prueba	NA	NA	NA	Sí	448	402	423	373	412

En la figura 35 se puede observar que a partir de las dos nubes de puntos pudieron lograrse buenos resultados de correlación cuando se incluyen los pliegues. El porcentaje de error para h y T es de -1.5% y para V y T es de -2.2%.

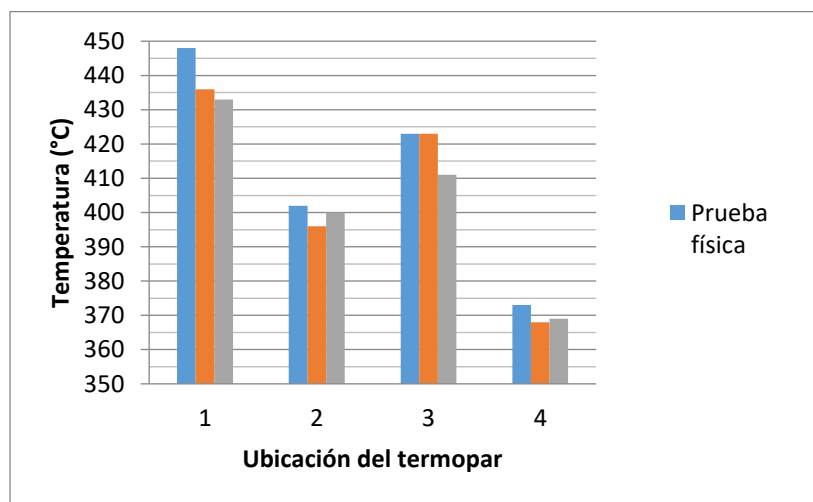


Figura 35 Comparativa de las temperaturas obtenidas en las etapas A y B, incluyendo los pliegues durante la simulación

En esta etapa se logró representar el perfil de temperatura del catalizador y se encontraron los valores de 35mm y 10mm para el **parámetro de simulación de longitud característica forzada**, sin embargo, la manera de encontrar estos valores fue a prueba y error y estos valores

encontrados servirán únicamente para esta geometría del escudo del catalizador. Es posible incrementar ligeramente la longitud característica forzada para lograr mejorar aún más la correlación para V y T, sin embargo, los resultados son suficientemente buenos considerando que en la simulación inicial se contaba con un error promedio de 17% para el escudo térmico del catalizador (ver tabla 2).

A partir de los valores de longitud característica forzada encontrados de 35 y 10mm se puede ver lo alejado que se estaba al usar los valores de 297 y 172mm, correspondientes a la proyección en X. Un análisis visual del flujo que rodea el catalizador no permite determinar la longitud característica forzada de una manera correcta, los vehículos contienen partes con geometrías complejas y el flujo difícilmente se mueve sobre el eje X, por lo que la asignación manual de la longitud característica forzada es imprecisa.

El uso de la nube de h y T con la correcta asignación de la resistencia térmica de contacto, arroja excelentes resultados y su uso no requiere de análisis subjetivo ni de la comprensión del flujo que rodea a los componentes. Buscar la implementación de h y T en CFD-ACE+ mejoraría radicalmente la correlación y evitaría la creación de un modelo de STAR-CCM+ usado únicamente para poder exportar la convección.

4.4 Etapa C: longitud característica forzada del soporte de la batería

4.4.1 Convección que rodea al soporte de la batería

A partir de las dos diferentes nubes de puntos, V y T de CFD-ACE+ y h Y T de STAR-CCM+, y del análisis de la conducción se tienen dos simulaciones de TAITherm, que representan perfectamente la temperatura del escudo térmico del catalizador. Como siguiente paso se procede a analizar el soporte de la batería.

- 1) En esta etapa se estudió la convección alrededor del soporte de la batería para las dos nubes de puntos. En las figuras 36 a 39 pueden verse los perfiles de temperatura y velocidad para CFD-ACE+ y STAR-CCM+, en su vista frontal y superior.

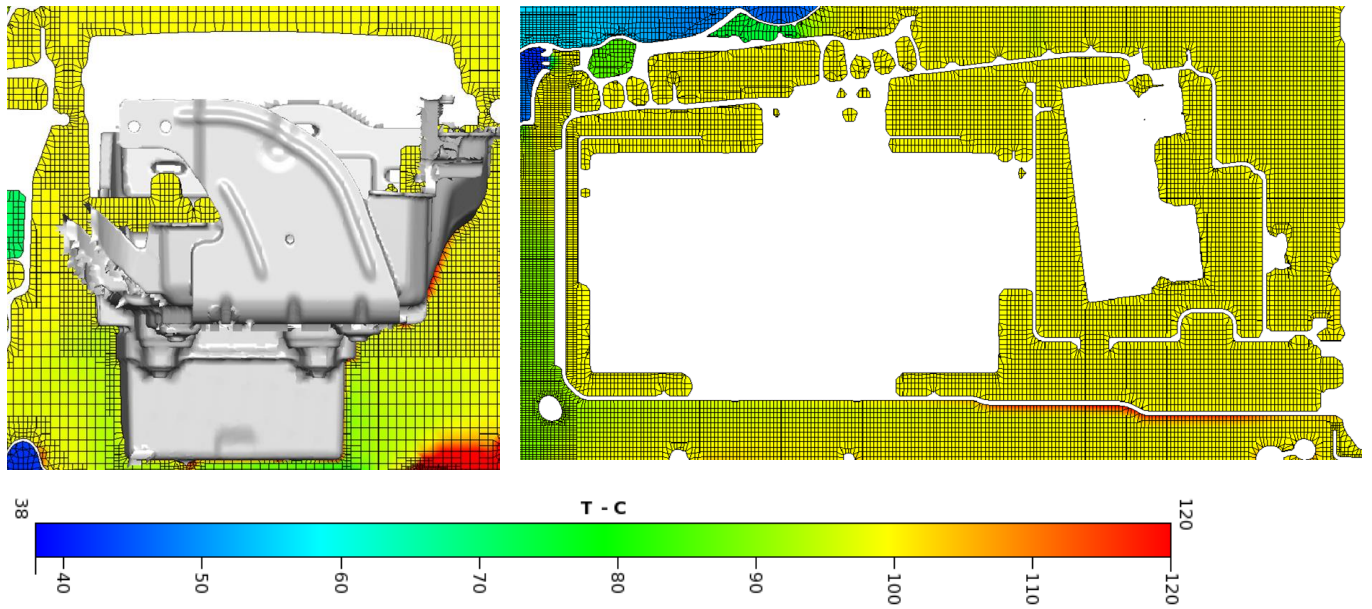


Figura 36 Vista frontal (a la izquierdo) y superior (a la derecha) del perfil de temperatura en el soporte de la batería para la convección en CFD-ACE+

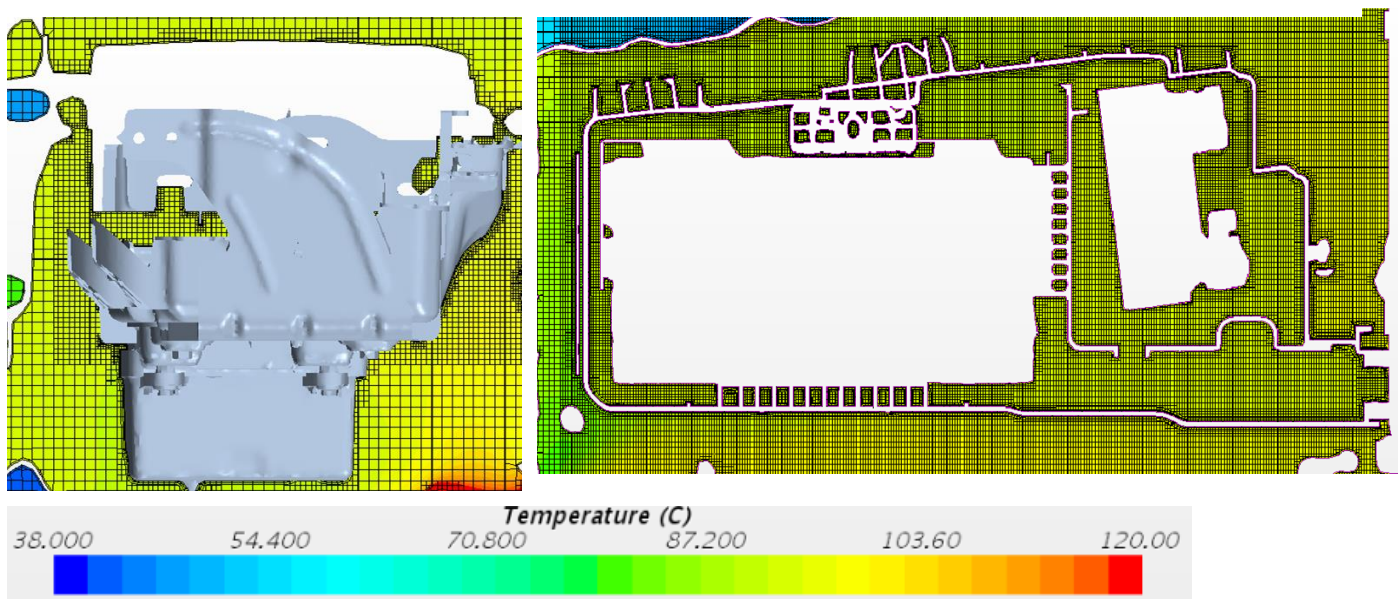


Figura 37 Vista frontal (a la izquierdo) y superior (a la derecha) del perfil de temperatura en el soporte de la batería para la convección en STAR-CCM+

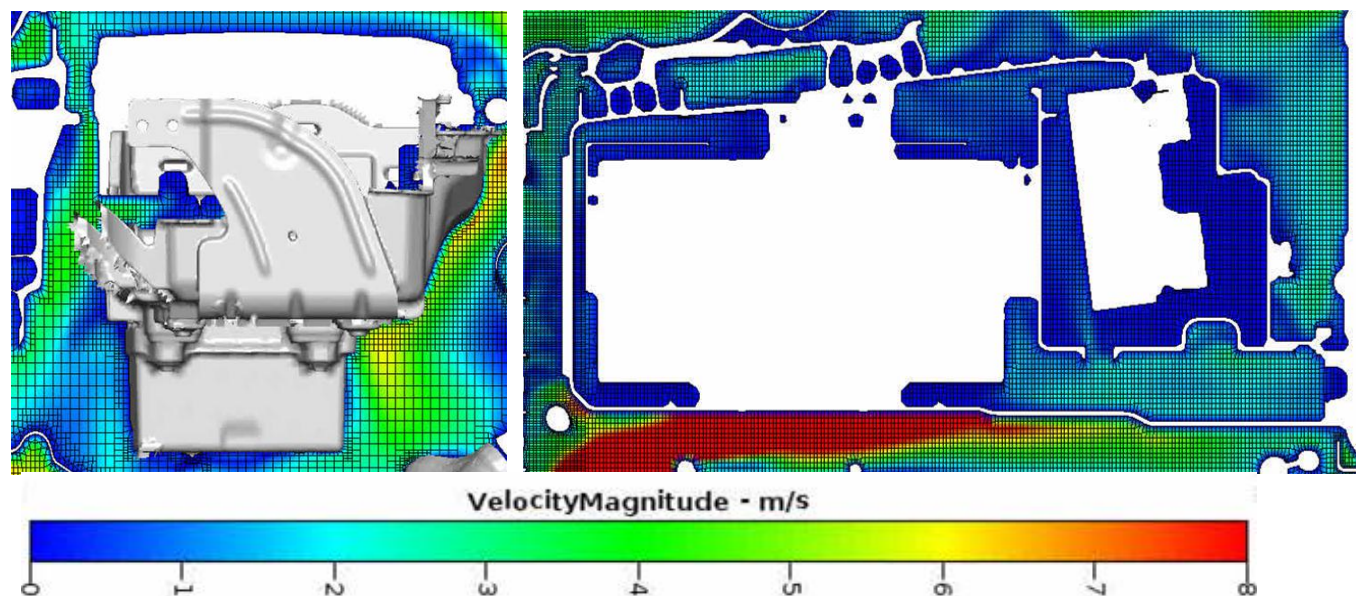


Figura 38 Vista frontal (a la izquierda) y superior (a la derecha) del perfil de velocidad en el soporte de la batería para la convección en CFD-ACE+

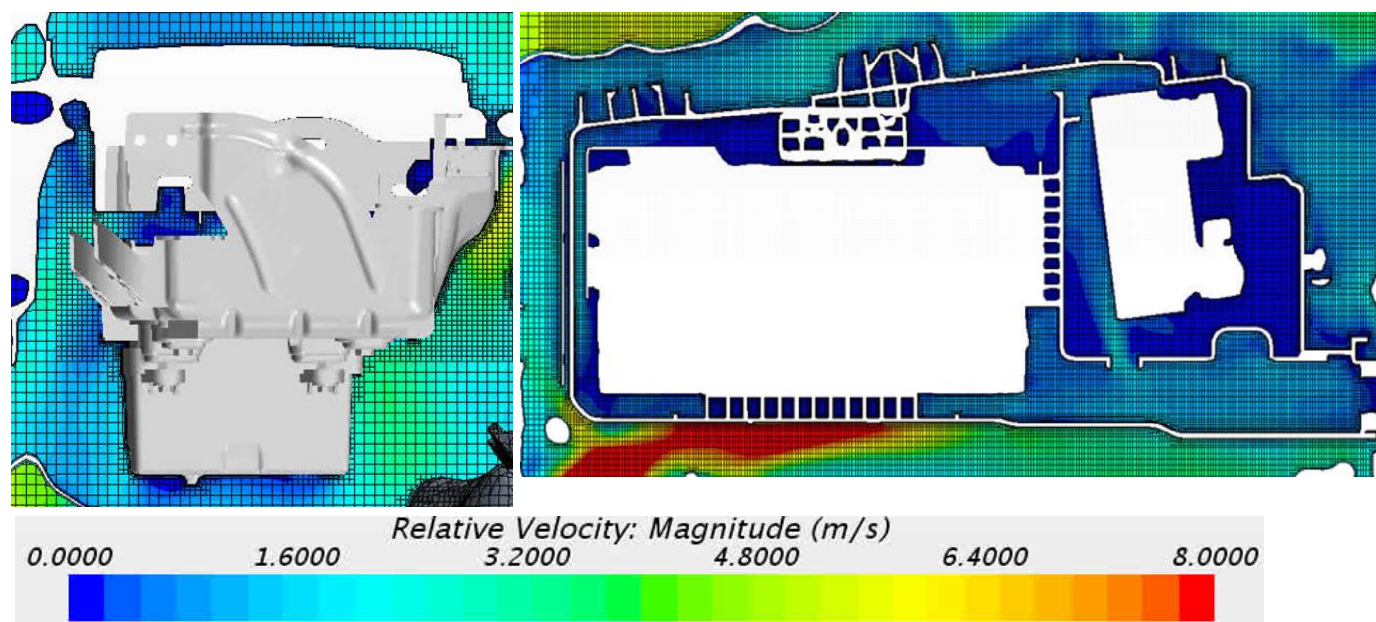


Figura 39 Vista frontal (a la izquierda) y superior (a la derecha) del perfil de velocidad en el soporte de la batería para la convección en STAR-CCM+

Como puede observarse en las figuras 36 a la 39, existen ligeras diferencias entre las temperaturas calculadas a través de CFD-ACE+ y STAR-CCM+. En la pared del soporte de la batería en CFD-ACE+ pueden verse temperaturas más altas debido a que la radiación está incluida en la simulación, a diferencia de STAR-CCM+.

- 2) Para los dos modelos de TAITherm en los que ya se captura correctamente el catalizador se comparan los diferentes perfiles de temperatura para el soporte de la batería y se analiza la correlación con los datos de prueba disponibles.

4.4.2 Soporte de la batería mediante h y T de STAR-CCM+

En la figura 40 se pueden ver las temperaturas obtenidas en el soporte la batería en la prueba física, así como en la simulación al usar la nube de puntos de h y T , es decir para el caso j.

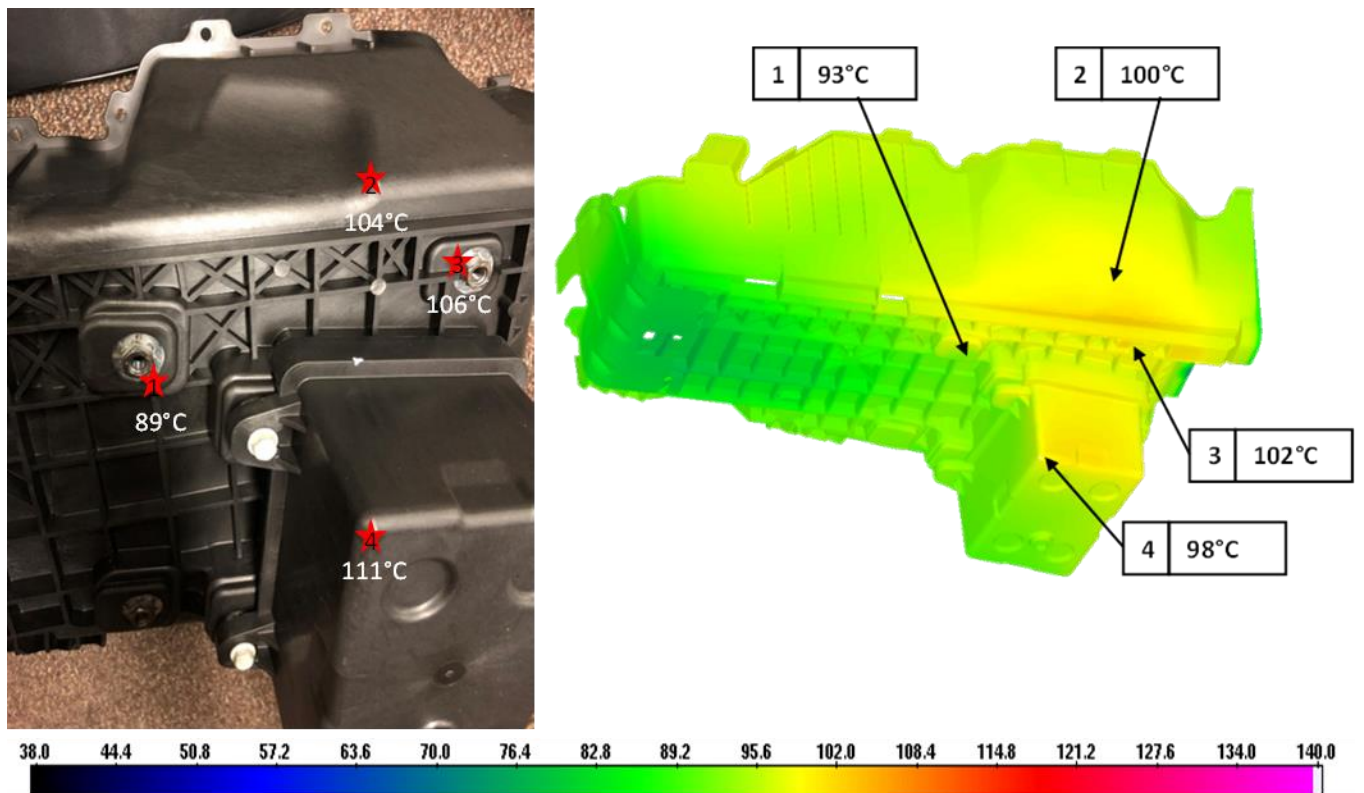


Figura 40 Comparativa de las temperaturas del soporte de la batería obtenidas en la prueba física y las generadas CFD a través de h y T

La información de la figura 40 puede verse en la tabla 13, que muestra los datos del reporte inicial de CFD para el soporte de la batería, las temperaturas de la simulación de CFD con la corrección de parámetros para h y T , y los datos de la prueba física. A partir de esta información podemos advertir que los resultados se acercan a la prueba física.

Tabla 13 Comparativa de las temperaturas del soporte de la batería obtenidas en la prueba física, las reportadas inicialmente en CFD y las generadas a través de h y T

Caso	Nombre	CFD o Prueba	Rc	Lc	% contacto	Pliegues	T1s	T2s	T3s	T4s	Promedio
a	Condición Inicial	CFD	0.001	Proyección en eje X	100	No	139	120	145	133	134
j	Segunda iteración con pliegues	CFD	0.004	NA, (h y T)	65	Sí	93	100	102	98	98
e	Prueba física	Prueba	NA	NA	NA	Sí	89	104	106	111	103

En las tablas 14 y 15 podemos observar que el porcentaje de error promedio pasó de 32% a -4%, es decir, la temperatura inicialmente reportada mediante las simulaciones del soporte de la batería se sobreestimó en un 32%; el delta de temperatura máximo para el primer termopar era de 50°C. Con el ajuste de parámetros de simulación, el correcto valor de resistencia térmica de contacto para el escudo térmico del catalizador y remover el ruido causado por la longitud característica forzada logramos un porcentaje de error de -4%, es decir, se está subestimando la temperatura, pero con un porcentaje de error menor y un delta de temperatura máximo de 13°C para el cuarto termopar.

Tabla 14 Comparativa de las temperaturas del soporte de la batería obtenidas en la prueba física y las reportadas inicialmente en CFD

Caso	Nombre	CFD o Prueba	Rc	Lc	% contacto	Pliegues	T1s	T2s	T3s	T4s	Promedio
a	Condición Inicial	CFD	0.001	Proyección en eje X	100	No	139	120	145	133	134
e	Prueba física	Prueba	NA	NA	NA	Sí	89	104	106	111	103
% de error							56%	15%	37%	20%	32%

Tabla 15 Comparativa de las temperaturas del soporte de la batería obtenidas en la prueba física y las generadas a través de h y T con la correcta selección de parámetros de simulación

Caso	Nombre	CFD o Prueba	Rc	Lc catalizador	% contacto	Pliegues	Lc soporte	T1s	T2s	T3s	T4s	Promedio
j	Segunda iteración con pliegues	CFD	0.004	NA, (h y T)	65	Sí	NA, (h y T)	93	100	102	98	98
e	Prueba física	Prueba	NA	NA	NA	Sí	NA	89	104	106	111	103
% de error								4%	-4%	-4%	-12%	-4%

4.4.3 Soporte de la batería mediante V y T de CFD-ACE+

En la figura 41 se pueden ver las temperaturas obtenidas en el soporte de la batería en la prueba física, así como en la simulación al usar la nube de puntos de V y T, es decir para el caso ñ.

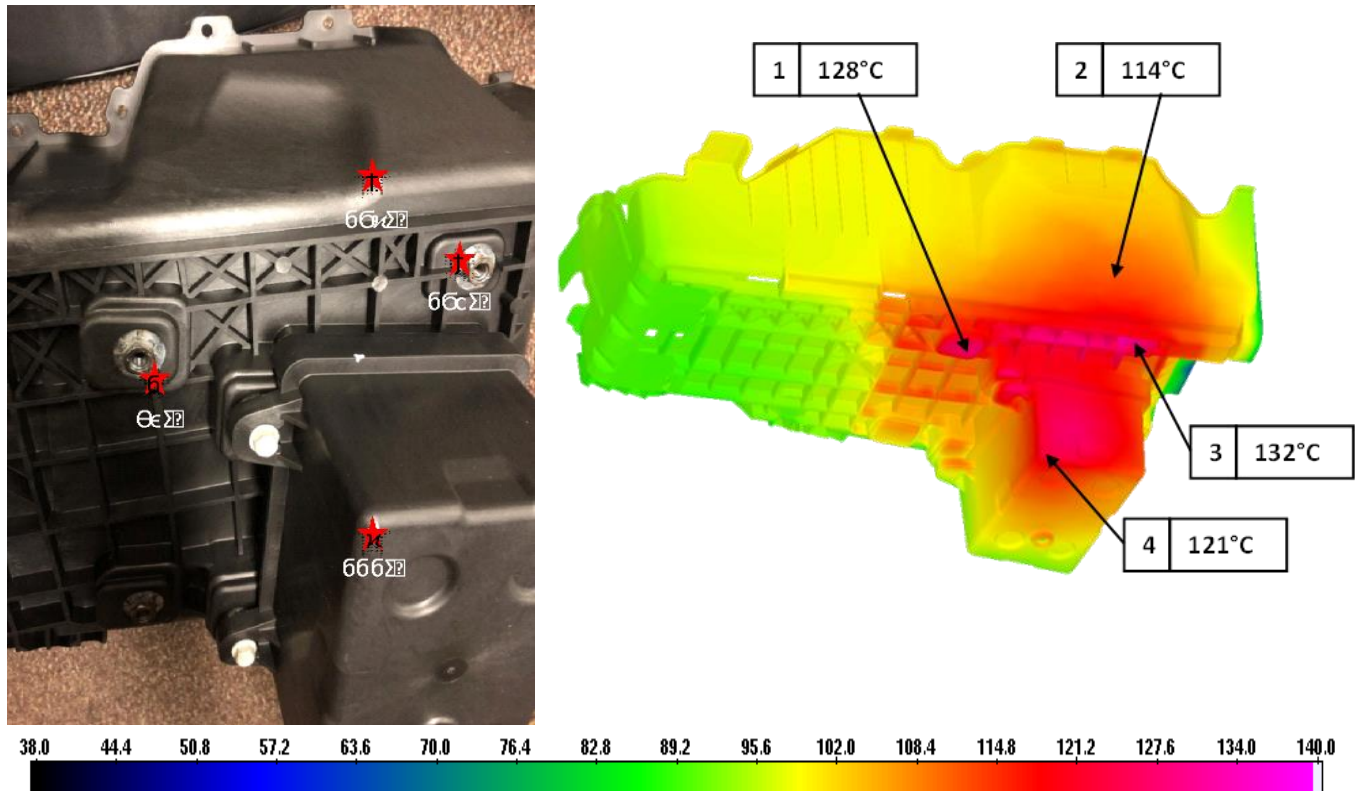


Figura 41 Comparativa de las temperaturas del soporte de la batería obtenidas en la prueba física y las generadas CFD a través de V y T capturando los pliegues

La información de la figura 41 puede verse en la tabla 16, que muestra los datos del reporte inicial de CFD para el soporte de la batería, las temperaturas de la simulación de CFD con la corrección de parámetros para V y T, y los datos de la prueba física. A partir de esta información podemos advertir que los resultados se acercan más que los de la simulación original, sin embargo, siguen mostrando temperaturas más elevadas que las de la prueba física.

Tabla 16 Comparativa de las temperaturas del soporte de la batería obtenidas en la prueba física, las reportadas inicialmente en CFD y las generadas a través de V y T

Caso	Nombre	CFD o Prueba	Rc	Lc	% contacto	Pliegues	T1s	T2s	T3s	T4s	Promedio
a	Condición Inicial	CFD	0.001	Proyección en eje X	100	No	139	120	145	133	134
ñ	Tercera iteración con pliegues	CFD	0.004	35mm y 10mm	65	Sí	128	114	132	121	124
e	Prueba física	Prueba	NA	NA	NA	Sí	89	104	106	111	103

En las tablas 17 y 18 podemos observar que el porcentaje de error promedio pasó de 32% a 22%, es decir, la temperatura inicialmente reportada mediante las simulaciones del soporte de la batería se sobreestimó en un 32%, el delta de temperatura máximo para el primer termopar era de 50°C. Con el ajuste de parámetros de simulación para el catalizador y el correcto valor de resistencia térmica de contacto para el escudo térmico del catalizador logramos un porcentaje de

error de 22%, es decir, se sigue sobrestimado la temperatura, pero con un porcentaje de error menor y un delta de temperatura máximo de 39°C para el primer termopar.

Tabla 17 Comparativa de las temperaturas del soporte de la batería obtenidas en la prueba física y las reportadas inicialmente en CFD

Caso	Nombre	CFD o Prueba	Rc	Lc	% contacto	Pliegues	T1s	T2s	T3s	T4s	Promedio
a	Condición Inicial	CFD	0.001	Proyección en eje X	100	No	139	120	145	133	134
e	Prueba física	Prueba	NA	NA	NA	Sí	89	104	106	111	103
% de error							56%	15%	37%	20%	32%

Tabla 18 Comparativa de las temperaturas del soporte de la batería obtenidas en la prueba física y las generadas a través de V y T con la correcta selección de parámetros de simulación para el catalizador

Caso	Nombre	CFD o Prueba	Rc	Lc	% contacto	Pliegues	T1s	T2s	T3s	T4s	Promedio
ñ	Tercera iteración con pliegues	CFD	0.004	35mm y 10mm	65	Sí	128	114	132	121	124
e	Prueba física	Prueba	NA	NA	NA	Sí	89	104	106	111	103
% de error							44%	10%	25%	9%	22%

- 3) Como fue discutido previamente, la definición de la longitud característica forzada del soporte de la batería se hizo bajo el supuesto de que el flujo se mueve idealmente de adelante hacia atrás del vehículo. Como pudo demostrarse con el escudo térmico del catalizador es incorrecto asumir esto. Con la finalidad de obtener la longitud característica forzada correcta para el soporte de la batería se recurre de nuevo a la nube de puntos de V y T, y se modifica manualmente la longitud característica forzada del soporte de la batería en TAITherm, hasta lograr que la distribución de temperaturas coincida con la de los termopares agregados al soporte de la batería.

En la figura 42 se muestra el perfil de temperaturas del soporte de la batería, variando de manera arbitraria la longitud característica forzada para V y T. Los valores de longitud característica forzada corresponden a la parte superior en donde se ubica la batería del vehículo y la inferior, en la que se ubica una segunda batería auxiliar.

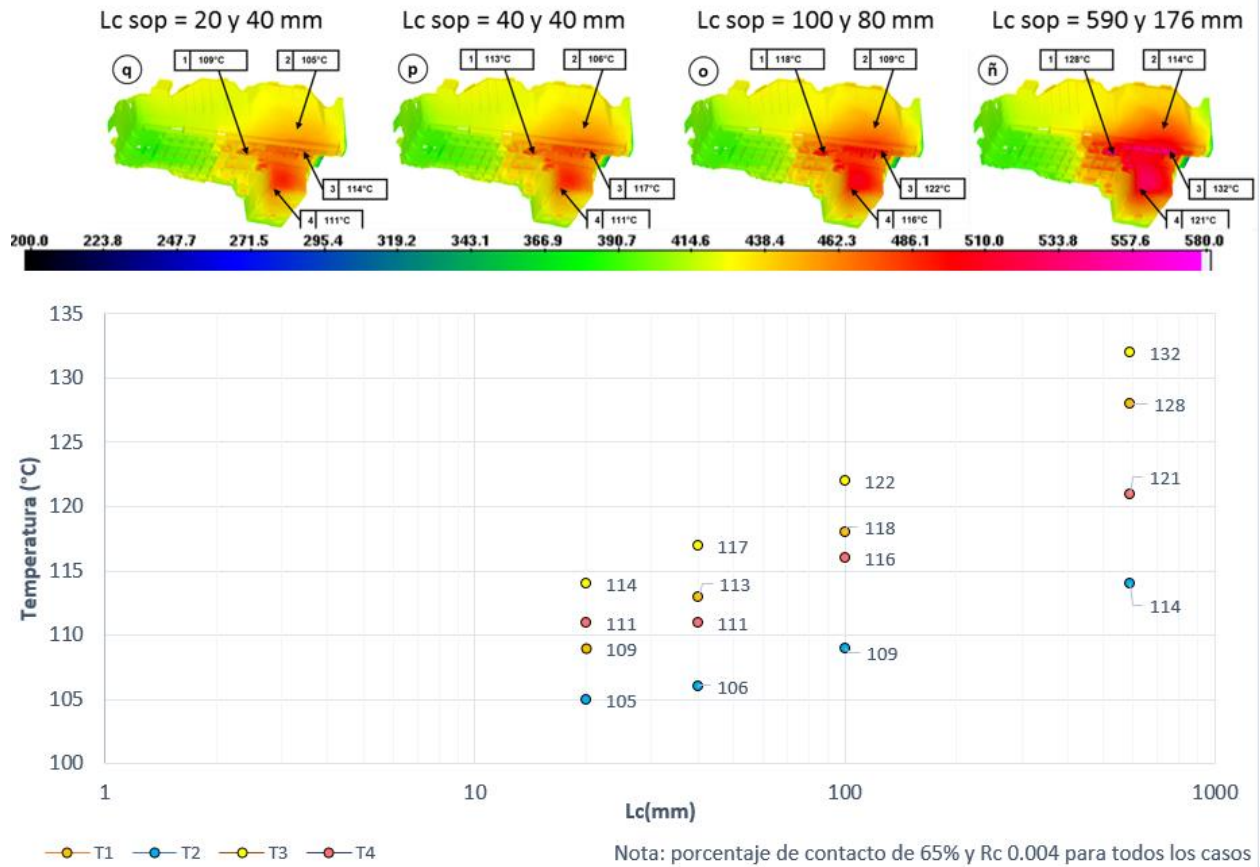


Figura 42 Etapa C: temperaturas obtenidas en TAItherm al variar la longitud característica forzada del soporte de la batería

A partir de los mapas de temperatura mostrados en la figura 42, se puede observar la sensibilidad que se tiene al variar la longitud característica forzada. En la tabla 19 se puede ver que los valores de longitud característica forzada de 20 y 40mm son los que permiten tener un perfil de temperatura más parecido al encontrado en las pruebas.

Tabla 19 Comparativa de las temperaturas del soporte de la batería obtenidas en la prueba física, y las reportadas en CFD a través de V y T con los valores de longitud característica forzada iniciales y los encontrados

Caso	Nombre	CFD o Prueba	Rc	Lc catalizador	% contacto	Pliegues	Lc soporte	T1s	T2s	T3s	T4s	Promedio
ñ	Condición inicial	CFD	0.004	35mm y 10mm	65	Sí	590 y 176 mm	128	114	132	121	124
q	Tercera iteracion	CFD	0.004	35mm y 10mm	65	Sí	20 y 40 mm	109	105	114	111	110
e	Prueba física	Prueba	NA	NA	NA	Sí	NA	89	104	106	111	103

En las tablas 20 y 21 puede observarse que con el ajuste de longitud característica forzada del soporte de la batería el porcentaje de error promedio pasó de 22% a 8%.

Tabla 20 Comparativa de las temperaturas del soporte de la batería obtenidas en la prueba física y las reportadas en CFD a través de V y T con los valores de longitud característica forzada iniciales

Caso	Nombre	CFD o Prueba	Rc	Lc catalizador	% contacto	Pliegues	Lc soporte	T1s	T2s	T3s	T4s	Promedio
ñ	Condición inicial	CFD	0.004	35mm y 10mm	65	Sí	590 y 176 mm	128	114	132	121	124
e	Prueba física	Prueba	NA	NA	NA	Sí	NA	89	104	106	111	103
% de error								44%	10%	25%	9%	22%

Tabla 21 Comparativa de las temperaturas del soporte de la batería obtenidas en la prueba física y las reportadas en CFD a través de V y T con los valores de longitud característica forzada encontrados

Caso	Nombre	CFD o Prueba	Rc	Lc catalizador	% contacto	Pliegues	Lc soporte	T1s	T2s	T3s	T4s	Promedio
q	Tercera iteracion	CFD	0.004	35mm y 10mm	65	Sí	20 y 40 mm	109	105	114	111	110
e	Prueba física	Prueba	NA	NA	NA	Sí	NA	89	104	106	111	103
% de error								22%	1%	8%	0%	8%

Con el uso de V y T se logró pasar de un porcentaje de error de 32%, que se tenía en las simulaciones iniciales a un 8%. A pesar de que se sigue subestimando la temperatura, la toma de decisión respecto a la necesidad del escudo térmico lograría ser la correcta debido a que con estas temperaturas la indicación sería que no se requiere el escudo térmico del soporte de la batería.

En la tabla 22 se muestran las temperaturas para las cuatro ubicaciones de los termopares del soporte de la batería, se reportan los provenientes de la prueba física, los de la simulación con h y T del caso j y los de la simulación con V y T del caso q, que corresponden a las simulaciones cuyas correlaciones fueron las mejores.

Tabla 22 Comparativa de las temperaturas del soporte de la batería obtenidas mediante la prueba física y a través de CFD con el uso de los parámetros de simulación correctos para V y T y para h y T.

Caso	Nombre	CFD o Prueba	Rc	Lc catalizador	% contacto	Pliegues	Lc soporte	T1s	T2s	T3s	T4s	Promedio
j	Segunda iteración con pliegues	CFD	0.004	NA, (h y T)	65	Sí	NA, (h y T)	93	100	102	98	98
q	Tercera iteracion	CFD	0.004	35mm y 10mm	65	Sí	20 y 40 mm	109	105	114	111	110
e	Prueba física	Prueba	NA	NA	NA	Sí	NA	89	104	106	111	103

La información de la tabla 22 también se presenta de manera gráfica en la figura 43.

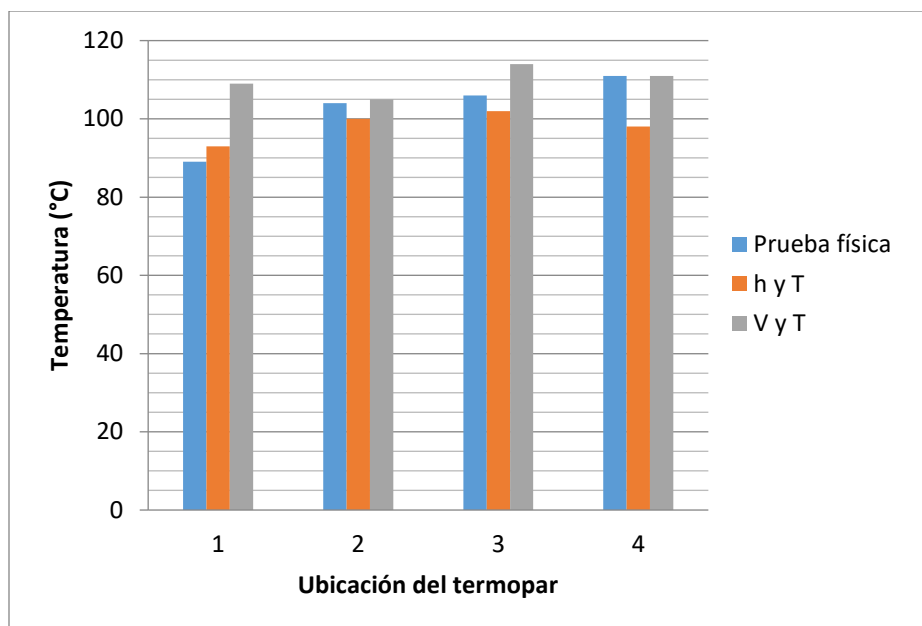


Figura 43 Comparativa de las temperaturas del soporte de la batería obtenidas mediante la prueba física y a través de CFD con el uso de los parámetros de simulación correctos para V y T y para h y T.

En las tablas 23 y 24 se muestran los errores con ambos métodos de convección al usar los parámetros de simulación correctos. Como puede observarse, el mayor error se encuentra en el primer termopar y corresponde a 22%, con un delta de temperatura de 20°C. Este error podría estar relacionado con que el primer termopar del soporte de la batería se encuentra ubicado en una protuberancia del soporte de la batería, al que correspondería otra longitud característica forzada.

Tabla 23 Comparativa de las temperaturas del soporte de la batería obtenidas mediante la prueba física y a través de CFD con el uso de los parámetros de simulación correctos para h y T.

Caso	Nombre	CFD o Prueba	Rc	Lc catalizador	% contacto	Pliegues	Lc soporte	T1s	T2s	T3s	T4s	Promedio
j	Segunda iteración con pliegues	CFD	0.004	NA. (h y T)	65	Sí	NA. (h y T)	93	100	102	98	98
e	Prueba física	Prueba	NA	NA	NA	Sí	NA	89	104	106	111	103
% de error								4%	-4%	-4%	-12%	-4%

Tabla 24 Comparativa de las temperaturas del soporte de la batería obtenidas mediante la prueba física y a través de CFD con el uso de los parámetros de simulación correctos para V y T.

Caso	Nombre	CFD o Prueba	Rc	Lc catalizador	% contacto	Pliegues	Lc soporte	T1s	T2s	T3s	T4s	Promedio
q	Tercera iteración	CFD	0.004	35mm y 10mm	65	Sí	20 y 40 mm	109	105	114	111	110
e	Prueba física	Prueba	NA	NA	NA	Sí	NA	89	104	106	111	103
% de error								22%	1%	8%	0%	8%

Capítulo 5

Conclusiones

Se logró desarrollar un método para estimar la resistencia térmica de contacto y la longitud característica forzada para los componentes del caso de estudio, esto se logró a partir de datos experimentales y simulaciones. Fue necesario estudiar primero el fenómeno de conducción entre el catalizador y el escudo térmico multicapa que lo cubre, con el fin de representar correctamente la conducción entre ellos y por lo tanto la radiación emitida por el escudo del catalizador al soporte de la batería. En segundo lugar, se estudió el fenómeno de convección alrededor del catalizador y del soporte de la batería, y se identificó el efecto de la longitud característica forzada en la falta de correlación.

Para estudiar la conducción entre el catalizador y su escudo térmico se analizó el efecto de la variación de la resistencia térmica de contacto en la temperatura superficial del escudo del catalizador, y a través de su correcta determinación y del uso de la convección en términos de h y T su error logró pasar de un 22% a un 1%. El valor de resistencia térmica de contacto encontrado de $0.004 \frac{m^2K}{W}$ también será válido para simulaciones de proyectos de vehículos futuros, en los que se cuente con un escudo térmico de las mismas características. Si la configuración del escudo térmico cambia se deberá seguir la metodología propuesta para encontrar su valor.

Al estudiar la convección que rodea el catalizador y el soporte de la batería, se encontraron los valores de longitud característica forzada válidos para estos componentes. Se comprobó que la asignación de sus valores a partir de la observación del flujo de aire que rodea a los componentes o de la proyección de los componentes en eje x , es causa de la falta de correlación, por lo que se debe seguir trabajando en un método que no requiera de este proceso, ya que los vehículos contienen partes con geometrías complejas y el flujo difícilmente se mueve sobre el eje X .

Las simulaciones del soporte de la batería con el uso de la convección en formato h y T , que no requiere la asignación de una longitud característica forzada y por lo tanto de un análisis subjetivo ni de la comprensión del flujo que rodea a los componentes, arrojaron excelentes resultados. El error para el soporte de la batería pasó de 32% a 4%. La ligera subestimación que existe todavía puede estar relacionada con la ausencia del cálculo de la radiación en STAR-CCM+.

Buscar lograr exportar la convección para CFD-ACE+ en formato h y T en lugar de V y T tendría un impacto positivo en la correlación, ya que se eliminaría el error causado al asignar la longitud característica forzada en TAITherm. Además, para esta metodología, se evitaría la creación de un modelo adicional en STAR-CCM+ que es usado únicamente para poder exportar la convección a TAITherm en formato h y T .

A partir de los resultados de esta investigación se encontró que el escudo térmico para el soporte de la batería no es necesario; la indicación de incluirlo por parte del equipo de CFD fue incorrecta. Los números iniciales arrojados en las simulaciones fueron consecuencia del uso de parámetros de simulación incorrectos y de la falta de experiencia del equipo para modelar correctamente las condiciones vehiculares. Con el uso de las metodologías propuestas, las decisiones en futuros programas vehiculares serán más acertadas y tendrán un impacto positivo en términos de tiempos, costos y credibilidad de los resultados que CFD provee.

Con este estudio no se pretende eliminar las pruebas físicas, es necesario seguir mejorando la correlación en las simulaciones para lograrlo. Por ahora, lo que se obtuvo son parámetros más adecuados de simulación que permiten resultados más representativos de lo que ocurrirá en las pruebas físicas desde etapas más tempranas del desarrollo de un vehículo.

Capítulo 6

Sugerencias para trabajos futuros

La subestimación de las temperaturas del soporte de la batería a partir de la convección en formato h y T pudiera estar relacionada con la ausencia del cálculo de la radiación en STAR-CCM+. En este trabajo no se investiga el efecto del modelado de ésta, pero es materia de investigaciones futuras.

La posibilidad de exportar la convección en formato h y T en CFD-ACE+ para erradicar la asignación de la longitud característica forzada es también objeto de estudio.

Pudiera extenderse la investigación modelando térmicamente en STAR-CCM+ para cuantificar las diferencias del modelado en TAITherm.

Referencias bibliográficas

- 1) Albers, J., (2009). *Heat tolerance of automotive lead-acid batteries*. doi 10.1016/j.jpowsour.2008.12.105
- 2) Al Alonzo G., Gutiérrez T., Jiménez B., (2015) *Computational Fluid Dynamics in Turbulent Flow Applications*. Doi 10.5772/63831
- 3) Bell, K. Overall heat transfer coefficient. Doi: 10.1615/AtoZ.o.overall_heat_transfer_coefficient
- 4) Boettcher C. (2016). *Simulation of a passenger car cabin using a coupled GT-SUITE-TAITherm simulation model* (Tesis de Maestría). Universität Stuttgart, Alemania.
- 5) Brodbeck C. (2017). *Coupled Thermal Simulations for Industrial Development*. Germany: Fraunhofer Center for Manufacturing Innovation
- 6) Cengel, Y. (2007). *Heat and Mass Transfer: A Practical Approach*. India: McGraw-Hill
- 7) Comsol Multiphysics (2018). Recuperado de <https://www.comsol.com/multiphysics/navier-stokes-equations>
- 8) Ganji D.D., Sabzehmeidani Y. y Sedighiamiri A. (2018). *Nonlinear Systems in Heat Transfer*. Recuperado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128120248000035>
- 9) Hasselström A. y Eskil Nilsson E. (2012). *Thermal Contact Conductance in Bolted Joints* (Tesis de Maestría). Recuperado de <http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/159027.pdf>
- 10) Henry, M., Merlis, T., (2018). *The Role of the Nonlinearity of the Stefan–Boltzmann Law on the Structure of Radiatively Forced Temperature Change*. Recuperado de <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-17-0603.1>
- 11) Instituto de Física del Plasma (2018). Recuperado de <http://www.lfp.uba.ar/es/notas%20de%20cursos/notasestructuraljuliogratton/04Dinamica.pdf>
- 12) Kurganov, V.A. (2011). *Heat transfer coefficient*. doi: 10.1615/AtoZ.h.heat_transfer_coefficient
- 13) León, M., (2012). *Fluid and Thermodynamic Underhood Simulations* (Tesis de Maestría). Chalmers University, Suecia.

- 14) Levenspiel, O. (1984). *Engineering Flow and Heat Exchange*. Recuperado de https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-4615-6907-7_9
- 15) Lam, S., Shuaib N., Hasini H., y Shuaib N., (2012). Computational fluid dynamics investigation on the use of Heat shields for thermal management in a car underhood. *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*, volumen 6, 785-796. doi: <http://dx.doi.org/10.15282/ijame.6.2012.10.0064>
- 16) Lidar J. (2018). *Thermal Analysis of Engine Bay in Star-CCM+* (Tesis de Maestría). Chalmers University, Suecia.
- 17) Mantelli, M. y Yovanovich, M. (2002). Thermal Contact Resistance. En D. Gilmore (Ed.), *Spacecraft Thermal Control Handbook* (pp. 599-603). California, Estados Unidos de América: The Aerospace Press.
- 18) Marshall, et al. (2019). *Thermal Management of Vehicle Cabins, External Surfaces, and Onboard Electronics: An Overview*. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.eng.2019.02.009>
- 19) Martynenko, Oleg G., Polijakov, A.F. (2011). *Free Convection*. doi: 10.1615/AtoZ.f.free_convection
- 20) Moreira, T., Colmanetti, A., Tibiriçá, C., (2019). *Heat transfer coefficient: a review of measurement techniques*. Doi: 10.1007/s40430-019-1763-2
- 21) Moukalled, F., Mangani, L., y Darwish, M. (2016) *The Finite Volume Method in Computational Fluid Dynamics*. Suiza: Springer
- 22) Narendra B. K. (2015). *Thermal Contact Resistance: Experiments and Simulation* (Tesis de Maestría). Chalmers University, Suecia.
- 23) Pérez Grande, M. (2000). *Influencia de la geometría del contacto en la resistencia térmica de contacto* (Tesis Doctoral). Recuperado de <http://oa.upm.es/370/1/01200005.pdf>
- 24) Polijakov, A.F. (2011) Mixed (combined) convection. doi: 10.1615/AtoZ.m.mixed_combined_convection
- 25) Popielas, F., Ramkumar, R., Digregorio, A., Boogemans, M. et al. (2004). CAE Approach for Thermal-Acoustical Protective Shields - Part 2. *SAE Technical Paper*, volume (2004-01-2970), 10. Doi:10.4271/2004-01-2970.
- 26) Rajadurai, S. y S, A. (2019). *Heat Shield Insulation for Thermal Challenges in Automotive Exhaust System*, SAE Technical Paper 2019-28-2539, 2019, <https://doi.org/10.4271/2019-28-2539>.

- 27) Rohsenow W., Hartnett J., y Cho Y. (1998). *Handbook of Heat Transfer*. EUA: McGraw-Hill.
- 28) Srinivasan, K., Woronowycz, G., Zabat M., Tripp, J. (2005). An Efficient Procedure for Vehicle Thermal Protection Development. *SAE Technical Paper, volume* (2005-01-1904), 5. Doi: 10.4271/2005-01-1904.
- 29) Srinivasan, K., Yuan W., Wang Z., Sun R. (2004). Vehicle thermal management simulation using a rapid omni-tree based adaptive cartesian mesh generation methodology. 2004 ASME Heat Transfer/Fluids Engineering Summer Conference, <https://cfcd.ku.edu/papers/ASME2004HTFED-56748.pdf>
- 30) ThermoAnalytics. *Guía de usuario del software TAITherm* versión 12.5.2 pag. 185
- 31) Torres, J., Sierra, A., Peña, D., Uribe, I., y Estupiñan, H. (2014). Velocidad de corrosión de una aleación base plomo en una solución de ácido sulfúrico a diferentes temperaturas. *Matéria vol.19 no.2*. doi: 10.1590/S1517-70762014000200012
- 32) Wendt, J. F. (Ed.). (1992). *Computational Fluid Dynamics*. Berlín, Alemania: Editorial A von Karman Institute Book
- 33) White F. (2003). *Fluid Mechanics. Mc Graw Hill, quinta edición*. 172 y 238
- 34) Zika-Beyerlein, B., Köstler, S., Friedow, T. (2005). FE Analysis of Multi Layer Composite Shielding Systems. *SAE Technical Paper, volumen* (2005-01-1765), 3-4. Doi:10.4271/2005-01-1765.