



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Informe de Actividades
Profesionales en el Área de
Sistemas Térmicos en el
Sector Automotriz**

INFORME DE ACTIVIDADES PROFESIONALES

Que para obtener el título de

Ingeniera Aeroespacial

P R E S E N T A

Helen Julieta Ledesma Madrid

ASESOR DE INFORME

Dr. César Abraham Luna Estrada



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2026



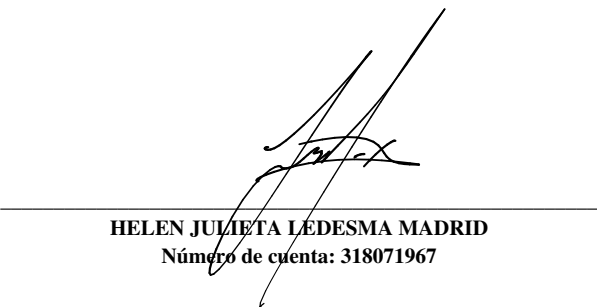
**PROTESTA UNIVERSITARIA DE INTEGRIDAD Y
HONESTIDAD ACADÉMICA Y PROFESIONAL
(Titulación con trabajo escrito)**



De conformidad con lo dispuesto en los artículos 87, fracción V, del Estatuto General, 68, primer párrafo, del Reglamento General de Estudios Universitarios y 26, fracción I, y 35 del Reglamento General de Exámenes, me comprometo en todo tiempo a honrar a la institución y a cumplir con los principios establecidos en el Código de Ética de la Universidad Nacional Autónoma de México, especialmente con los de integridad y honestidad académica.

De acuerdo con lo anterior, manifiesto que el trabajo escrito titulado INFORME DE ACTIVIDADES PROFESIONALES EN EL AREA DE SISTEMAS TERMICOS EN EL SECTOR AUTOMOTRIZ que presenté para obtener el título de INGENIERA AEROESPACIAL es original, de mi autoría y lo realicé con el rigor metodológico exigido por mi Entidad Académica, citando las fuentes de ideas, textos, imágenes, gráficos u otro tipo de obras empleadas para su desarrollo.

En consecuencia, acepto que la falta de cumplimiento de las disposiciones reglamentarias y normativas de la Universidad, en particular las ya referidas en el Código de Ética, llevará a la nulidad de los actos de carácter académico administrativo del proceso de titulación.



HELEN JULIETA LEDESMA MADRID
Número de cuenta: 318071967

Agradecimientos

Quiero agradecer a mi mamá, Blanca Lucelia Madrid Escobedo, por su apoyo y amor constante, por darme la oportunidad de estudiar esta carrera.

A Santiago Vera Arceo por su amor incondicional, por su compañía y apoyo.

A Sami Krazem, por inspirarme a seguir el camino de la Ingeniería Aeroespacial.

Gracias a cada profesor que fue parte de este camino.

Tabla de contenido

Agradecimientos.....	2
1. Introducción.....	4
1.1 Industria Automotriz.....	6
1.2 Ford Motor Company®	7
1.3 Sistemas Térmicos en la Industria Automotriz.....	8
2. Objetivos.....	10
3. Antecedentes Teóricos.....	11
3.1 Transferencia de Calor (Convección).....	11
3.2 Dinámica de Fluidos.....	14
3.3 Métodos numéricos para el análisis de sistemas térmicos.....	17
4. Contexto de la Participación Profesional.....	20
5. Metodología del Proyecto.....	23
6. Resultados.....	26
Conclusiones	28
Referencias.....	30

1. Introducción

En este informe se describe mi experiencia adquirida como ingeniera de programa para sistemas térmicos en Ford Motor Company®. Durante los últimos seis meses en la compañía, trabajé en el área de sistemas térmicos, donde la principal responsabilidad es otorgar el visto bueno y/o aprobar el diseño térmico de los vehículos para producción, garantizando que serán térmicamente robustos, confiables y capaces de ofrecer el desempeño adecuado.

Este puesto se enfoca en dos subsistemas fundamentales del sistema térmico del vehículo: gestión del calor generado por el motor y en el sistema de enfriamiento. En la gestión de calor se busca garantizar que el calor emitido por el motor y el escape no representen un riesgo para otros subsistemas o componentes del vehículo, como lo pueden ser cables, chasis, piso, frenos y demás elementos que podrían comprometer la seguridad de los ocupantes que viajan en el vehículo. Si existiera algún riesgo se tomarán medidas de contención; como se muestra en la Figura 1.1, se coloca un escudo de calor para gestionar el calor en la llanta de refacción. Por otro lado, en el sistema de enfriamiento se debe garantizar que los fluidos del sistema se mantengan dentro del rango de operación óptimo; para ello, se realiza el dimensionamiento de los intercambiadores de calor y el flujo de aire requerido.



Figura 1.1 Ejemplo de gestión de calor, escape con contramedida para la llanta de refacción, se observa un heat shield alrededor de la llanta de refacción protegiéndolo del calor del escape. Fuente: Adaptado de Rough Country (s.f.)

Este informe se enfocará en el subsistema de enfriamiento, un ejemplo se muestra en la Figura 1.2, específicamente en el proceso de validación de los flujos de aire necesarios para el desempeño adecuado del vehículo. Este análisis se encuentra directamente relacionado con el diseño de las parrillas, las cuales deben proteger el sistema de enfriamiento y aportar identidad estética al vehículo. Sin embargo, estas también restringen el flujo de aire, lo que puede afectar el desempeño del subsistema de enfriamiento y térmico, por ello es importante encontrar el balance entre diseño y funcionalidad.

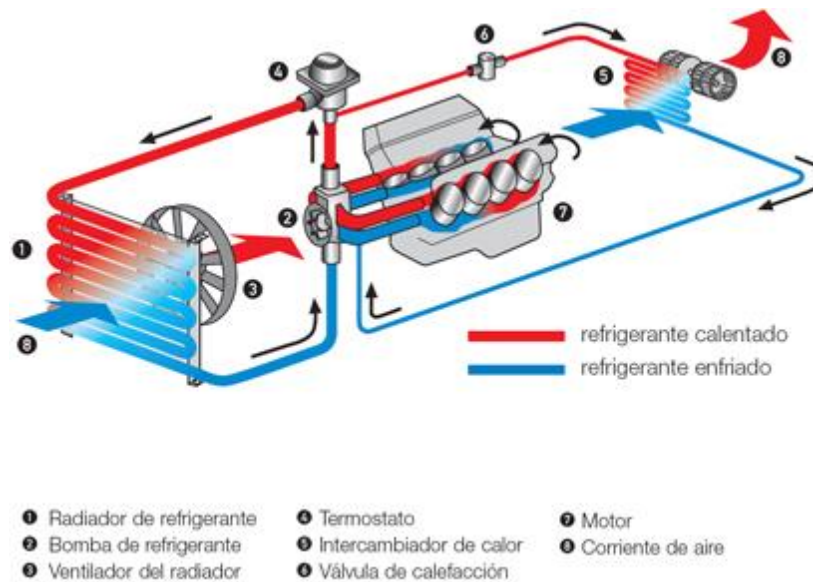


Figura 1.2 Diagrama simplificado del subsistema de enfriamiento para el motor. Fuente: HELLA Tech World (s.f.).

Este rol en el que me he desempeñado involucra actividades multidisciplinarias, ya que se requiere interacción constante con el equipo de diseño, el equipo de CAE y los requerimientos generales del área. Asimismo, además de realizar pruebas y análisis simulados, también debimos llegar a la ejecución y validación física de pruebas.

Para realizar dicha validación del sistema de enfriamiento de inicio a fin, es necesario contar con los conocimientos sólidos en áreas como transferencia de calor, dinámica de fluidos y redacción técnica. Además, se requiere tener la capacidad para analizar y resolver problemas en los que las restricciones de diseño, como las limitaciones de manufactura, representan un reto.

1.1 Industria Automotriz

La industria automotriz inició a finales del siglo XIX cuando Karl Benz diseñó, creó y patentó el Benz Patent-Motorwagen en Alemania en 1886. Este era un vehículo de tres ruedas impulsado por un motor de combustión interna el cual marcó el inicio de una nueva era. En 1888, este automóvil fue capaz de recorrer un trayecto de 194 km de distancia demostrando que este invento no fue solo un juguete tecnológico, si no una herramienta sumamente práctica para el transporte humano. (Sadurní, 2024)

El automóvil fue un artículo de mucho lujo debido a su excesivo costo hasta la llegada de Henry Ford®. En el año de 1913, Ford Motor Company® revolucionó la industria automotriz al introducir la línea de montaje móvil, la cual comenzó al darle vida al Modelo T. Esto logró que los tiempos de fabricación se redujeran enormemente (de 12 horas a 90 minutos por unidad) lo que logró bajar los costos y hacer accesible el automóvil para la persona común de la clase media. (National Geographic, 2022).

En el siglo XX, la industria se expandió globalmente con el surgimiento de grandes empresas en Europa y Asia, consolidando un mercado globalizado que hoy en día es parte de la vida diaria de cerca del 51% de la población (Gajbhiye, 2024).

Esta industria surgió para resolver problemas de la sociedad moderna los cuales van más allá del simple desplazamiento de las personas. Con ella, la gente tuvo la capacidad de trasladarse largas distancias a conveniencia propia, ya que podría no depender de los horarios rígidos de un tren o del cuidado e inconveniencia de transportarse en caballo/carrozas. A su vez, se resolvió el aislamiento de las zonas rurales lo cual permitió que estas comunidades fueran conectadas con las grandes ciudades (Britannica, 2025). Otra aportación de esta industria fue el desarrollo de los vehículos comerciales y camiones lo que permitió el transporte de mercancías lo cual revolucionó el mercado.

En la actualidad, la importancia de este sector es tan grande que es una de las industrias más grandes del mundo, ya que en países como México, puede representar cerca del 3% del PIB total del país y más del 30% de las exportaciones (Serrano, 2020).

1.2 Ford Motor Company®

Fundada en 1903 por Henry Ford® en Dearborn, Michigan. Ford Motor Company® es una de las corporaciones multinacionales más icónicas y antiguas del mundo automotriz la cual sentó las bases de la producción industrial moderna al introducir la línea de montaje móvil para su “Modelo T”, la cual no solo abarató costos e hizo accesible para una gran cantidad de personas el automóvil, si no que creó el estándar mundial para la producción en masa en casi todas las industrias. (Britannica, 2024). La compañía posee dos marcas principales: Ford® (para vehículos de consumo masivo y comerciales) y Lincoln (para venta de vehículos de lujo). Además de que mantiene participaciones en otras empresas y *joint ventures* alrededor del mundo. (Britannica, 2024)

La actividad principal de Ford Motor Company® es el diseño, manufactura, comercialización y servicio de una línea completa de vehículos. Su modelo de negocios ha evolucionado en los últimos años para dividirse en tres unidades bajo el plan “Ford +®”:

- Ford Blue®: Es la unidad enfocada a la optimización y producción de vehículos de combustión interna e híbridos como lo es el Mustang y la F-150.
- Ford Model E®: Esta es la división dedicada a la innovación, diseño y producción de vehículos eléctricos.
- Ford Pro®: Esta se centra en clientes comerciales la cual ofrece flotas de vehículos y servicios para empresas como la Explorer Police o la Transit. (Ford Media Center®, 2023).

La serie de camionetas F-Series ha sido el vehículo más vendido en Estados Unidos durante más de 40 años consecutivos, la cual la convierte en un gran ícono y modelo a seguir para otras empresas de este rubro.

El GTBC “Global Technology and Business Center” de Ford® ubicado en Naucalpan, México, es el centro de ingeniería más grande de Ford® LATAM, dedicado al diseño y el desarrollo de vehículos. Aquí se diseñan y analizan trenes motrices, sistemas térmicos, interiores, exteriores, etc. así como desarrollo de software y validación de productos en sus diversos laboratorios.

1.3 Sistemas Térmicos en la Industria Automotriz

Los sistemas térmicos son fundamentales y se encuentran presentes en todo tipo de industria, desde el espacial hasta el agropecuario. En los sistemas térmicos espaciales se deben considerar los altos gradientes de temperatura, debidas a las condiciones extremas del medio ambiente espacial, para asegurar el óptimo desempeño de cada subsistema (Gilmore, 2002); para ello, se debe asegurar que el satélite se encuentre en todo momento dentro del rango de temperaturas de operación. Manteniendo el rango de temperatura, se garantiza que no existirá ruido térmico en cables o circuitos que podrían afectar subsistemas como el de control o telecomunicaciones poniendo en riesgo la vida útil y/o misión del satélite. (Fortescue et al., 2011)

Algo similar sucede en los sistemas térmicos automotrices, con las correctas medidas de contención para las fuentes calor y diseño del subsistema de enfriamiento, lo que se busca es garantizar la vida útil del vehículo, cumpliendo la misión de mantener seguro a todo aquel ocupante que llegue a usar el vehículo.

En todo vehículo, incluyendo combustión, híbridos y eléctricos se debe hacer el análisis térmico. Sin embargo, este informe se enfocará en los vehículos de combustión ya que se trata de los casos más críticos térmicamente. Todo vehículo de combustión debe tener un escape pero este escape lleva gases que pueden ir de los 800°C a los 1000°C según la sección del escape y tipo de vehículo, esto implica que existen ciertos riesgos como puede ser quemar componentes circundantes al escape, estos pueden ser cables de los frenos, soportes del motor, soportes de la transmisión, líneas de gasolina, etc. que si se exponen a altas temperaturas pondrían en riesgo al usuario.

Por otra parte, el sistema de enfriamiento de un vehículo garantiza que este pueda operar de manera eficiente para entregar la potencia necesaria y lograr tener el desempeño para el que fue diseñado; además, asegura que el sistema de aire acondicionado tendrá la capacidad de funcionar correctamente para mantener cómodo al ocupante. El correcto funcionamiento de este subsistema se logra con el adecuado dimensionamiento, posición y flujo de aire para lograr disipar el calor no

requerido hacia al medio ambiente. En la Figura 1.3, se muestra la representación del análisis de flujo de aire en una parrilla.



Figura 1.3 Representación del flujo del aire a través de una parrilla de un vehículo tipo pick-up. G-Plus Automotive. (s.f.)

Centrándonos en el requerimiento de flujo de aire para el subsistema de enfriamiento se ven involucradas las parrillas, ya que éstas son las que limitarán dicho flujo. En la industria automotriz, las parrillas forman parte de la carrocería y tienen una doble función: por un lado, permiten el paso del flujo de aire necesario para el correcto desempeño del sistema de enfriamiento y, por otro, protegen los componentes de cualquier objeto externo. Asimismo, este elemento tiene relevancia directa en el diseño y la identidad visual del vehículo, ya que su geometría, tamaño y patrón son características únicas de cada Fabricante de Equipo Original (OEM, por sus siglas en inglés), como es el caso de Ford Motor Company®. Por esta razón, el diseño de las parrillas requiere equilibrio entre los requerimientos estéticos y las necesidades térmicas, para garantizar tanto el desempeño funcional como la identidad de la OEM.

2. Objetivos

Describir las actividades realizadas como ingeniera de programa en sistemas térmicos en la industria automotriz. Se busca analizar el proceso de validación del subsistema de enfriamiento, enfocado en la evaluación del diseño de las parrillas, para validar los flujos de aire necesarios y garantizar su correcto desempeño. Asimismo, se busca explicar la relación entre el diseño de las parrillas del vehículo y el rendimiento del sistema de enfriamiento, considerando criterios de transferencia de calor y dinámica de fluidos, para identificar y resolver problemas debidos a restricciones de diseño y manufactura, así como la importancia del trabajo multidisciplinario y la comunicación técnica clara con los equipos involucrados.

Por otra parte, describir la aplicación de los conocimientos adquiridos durante la formación como ingeniera aeroespacial para la solución de problemas reales en la industria automotriz. Además, se busca demostrar el desarrollo de habilidades técnicas, analíticas y de resolución de problemas en el área de sistemas térmicos. Este informe de actividades profesionales tiene como finalidad integrar los conocimientos teóricos y prácticos adquiridos durante la carrera de ingeniería aeroespacial, demostrado en mi desempeño como ingeniera de programa en sistemas térmicos en Ford Motor Company®.

3. Antecedentes Teóricos

Para garantizar el desempeño de un vehículo, es relevante la gestión térmica de sus sistemas. En este capítulo, presentaré los fundamentos de transferencia de calor y la dinámica de fluidos que son necesarios para la validación de las parrillas en un vehículo. Se abordará la ecuación de Newton bajo condiciones convectivas y el uso de herramientas numéricas como el análisis por elementos finitos para sistemas térmicos. El estudio de estos conceptos, junto con la Dinámica de Fluidos, permite ponernos en contexto de por qué la validación de las parrillas y el control del flujo de aire son importantes.

3.1 Transferencia de Calor (Convección)

La transferencia de calor estudia el intercambio de energía térmica entre zonas donde existen gradientes de temperatura, describiendo el paso de energía desde una región de mayor temperatura hacia una de menor temperatura. Esta se enfoca en tasas: cuánto calor se transfiere por unidad de tiempo y cómo depende del material, la geometría y las condiciones de operación. Cuando se dice: “un componente se está calentando”, significa que la energía térmica que entra es mayor que la que sale, y esa diferencia se manifiesta como aumento de temperatura.

La energía se puede transferir hacia una masa dada, o desde ésta, por dos mecanismos: calor Q y trabajo W . Una interacción energética es transferencia de calor si su fuerza impulsora es una diferencia de temperatura. (Cengel, 2011)

Existen tres tipos de modos de transferencia de calor, los cuales se ven representados en la Figura 3.1. Donde el tipo de transferencia de calor más relevante para esta evaluación es la convección y por ello se explicará con más detalle.



Figura 3.1 Principales mecanismos de transferencia de calor: conducción, convección y radiación. Fuente: Concepto (2023).

- 1) *Radiación*: es la energía emitida por la materia en forma de ondas electromagnéticas (o fotones), como resultado de los cambios en las configuraciones electrónicas de los átomos o moléculas. La razón máxima de la radiación que se puede emitir desde una superficie a una temperatura termodinámica T_s es expresada por la ley de Stefan-Boltzmann. (Cengel, 2011)

$$Q_{rad} = \varepsilon \sigma A (T_s^4 - T_{air}^4) \quad (3.1.1)$$

Donde

ε : emisividad [L^0]

σ : constante de Stefan – Boltzmann $5.67 \times 10^{-8} [W/(m^2 K^4)]$

A : área superficial [m^2]

T_s : temperatura de superficie [K]

T_{air} : temperatura del medio [K]

- 2) *Conducción*: es la transferencia de calor de las partículas más energéticas de una sustancia hacia las menos energéticas adyacentes, como resultado de la interacción entre ellas, y es expresada por la ley de Fourier de la conducción del calor. (Cengel, 2011)

$$Q_{cond} = -kA \frac{\delta T}{\delta x} \quad (3.1.2)$$

Donde

k : *coeficiente de conducción* [W/(m K)]

A : *área perpendicular a la dirección de la transferencia de calor* [m²]

$\frac{\delta T}{\delta x}$: *el gradiente de temperatura* [K/m]

- 3) **Convección**: es el modo de transferencia de calor entre una superficie sólida y el líquido o gas adyacente que se encuentra en movimiento y comprende los efectos combinados de la conducción y del fluido en movimiento. La razón de la transferencia de calor por convección se expresa por la **ley de Newton del enfriamiento** como: (Cengel, 2011)

$$Q_{convección} = hA(T_s - T_{\infty}) \quad (3.1.3)$$

Donde:

h : *es el coeficiente de convección* [W/(m² K)]

A : *área efectiva de transferencia de calor* [m²]

T_s : *temperatura promedio de superficie* [K]

T_{∞} : *temperatura del fluido* [K]

Una consideración importante en vehículos ICE (*internal combustion engine*) es que los componentes tienen masa y, por lo tanto, capacidad de almacenar energía térmica. Esta “inercia térmica” explica por qué, al arrancar en frío o al aumentar carga, el sistema no alcanza inmediatamente una temperatura estable. La primera ley de la termodinámica o el balance de energía para cualquier sistema que pasa por cualquier proceso se puede expresar como

$$E_{entrada} - E_{salida} = \Delta E_{sistema} \quad (3.1.4)$$

la ecuación 3.1.4, puede reescribirse en la forma de razones como

Calor generado = Calor almacenado + Calor disipado al ambiente

$$Q = \dot{m}C_p \frac{dT}{dt} + hA(T_s - T_\infty) \quad (3.1.5)$$

donde se considera un sistema de flujo estacionario con una entrada y una salida, la razón de transferencia de masa hacia adentro del volumen de control debe ser igual a la velocidad del flujo de masa hacia afuera de él. Cuando los cambios en las energías cinética y potencial son despreciables, que es el caso más común, y no se tiene interacción de trabajo, el balance de energía para tal sistema de flujo estacionario se reduce a: (Cengel, 2011)

$$Q = \dot{m}C_p \frac{dT}{dt} \quad (3.1.6)$$

Donde

Q: Calor hacia afuera o hacia dentro del volumen de control [W]

m: flujo másico del fluido [kg/s] $\rightarrow \dot{m} = \rho A v$

C_{p fluido}: calor específico del fluido [J/(kg * K)]

$\frac{dT}{dt}$: cambio de la temperatura en el tiempo [K/s]

3.2 Dinámica de Fluidos

La relación entre la dinámica de fluidos y la transferencia de calor existe muy comúnmente en casos de transferencia de calor por convección, donde un fluido en movimiento intercambia energía térmica con una superficie o con otro fluido. Por ello, cuando se diseña un radiador, un intercambiador de calor, o incluso el enfriamiento de componentes electrónicos, no basta con

conocer temperaturas: es importante entender cómo circula el fluido, con qué velocidad, en qué régimen y cómo se forman las capas límite junto a las paredes.

El acoplamiento entre un flujo y la temperatura se describe con las ecuaciones de conservación. La primera es la conservación de masa. Si el flujo puede considerarse incompresible (densidad constante), la continuidad se expresa como (Cengel, 2011)

$$\nabla \cdot \underline{u} = 0 \quad (3.2.1)$$

Donde

$\underline{u}$: vector velocidad del fluido

La ley de enfriamiento de Newton, donde h es el coeficiente convectivo, T_s la temperatura de la superficie y T_∞ la temperatura del fluido fuera de la capa límite. Es importante mencionar y recordar que h no es una propiedad constante del fluido: depende del tipo de flujo, la geometría y las propiedades termofísicas. En convección forzada, aumentar la velocidad implica incrementar h , debido a la turbulencia.

El régimen del flujo se define principalmente por el número de Reynolds, que compara la inercia del fluido con los efectos viscosos. Para flujos externos se puede definirse como (Cengel, 2011)

$$Re_L = \frac{\rho U_\infty L}{\mu} \quad (3.2.2)$$

Donde

ρ : densidad $[Kg/m^3]$

U_{∞} : velocidad del flujo libre $[m/s]$

L : longitud característica $[m]$

μ : viscosidad dinámica $[Pa \cdot s]$

Si el Reynolds es bajo, el flujo tenderá a ser laminar: ordenado, con poca mezcla. En estas condiciones, la transferencia de calor se ve limitada porque el transporte desde o hacia la pared depende en gran medida de la difusión térmica. Cuando el Reynolds es alto, el flujo tenderá a volverse turbulento: aparecen remolinos que mezclan el fluido, transportan energía de manera más efectiva y aumentan el gradiente térmico en la pared; por ello, la transferencia de calor suele incrementarse de forma considerable. Sin embargo, el flujo turbulento también incrementa la fricción, lo que se refleja en mayores pérdidas de presión y/o velocidad.

Para conocer la cantidad de calor transferido por convección se usa el número de Nusselt, definido como (Cengel, 2011)

$$Nu = \frac{hL}{k} \quad (3.2.3)$$

Donde

h : es el coeficiente de convección $[W/(m^2 K)]$

k : es el coeficiente de conducción $[W/(m K)]$

Este número compara la convección contra la conducción, a través de la capa estacionaria. Valores altos de Nusselt indican que el movimiento del fluido está aumentando el intercambio térmico. La dependencia del Nusselt con el flujo y las propiedades suele expresarse mediante correlaciones empíricas basadas también en el número de Prandtl, que compara la difusión de cantidad de movimiento con la difusión térmica. (Cengel, 2011)

$$Pr = \frac{\mu C_p}{k} = \frac{v}{\alpha} \quad (3.2.4)$$

Donde

$$v: \text{viscosidad cinemática [m}^2/\text{s]} \rightarrow \frac{\mu}{\rho}$$

$$\alpha: \text{difusividad térmica [m}^2/\text{s]} \rightarrow \frac{k}{\rho C_p}$$

En convección forzada externa sobre una placa plana, una correlación común para régimen laminar (promedio hasta una longitud L) es $Nu_L = 0.664 Re_L^{1/2} Pr^{1/3}$. Esta expresión muestra que el intercambio de calor aumenta con la raíz cuadrada de Re_L , es decir, si el flujo se acelera aumenta el Reynolds, se reduce el espesor efectivo de la capa límite y aumenta el Nusselt, lo que se traduce en un coeficiente convectivo mayor. (Cengel, 2011)

La importancia de la dinámica de fluidos en la transferencia de calor por convección forzada se explica porque el movimiento del fluido cambia la capa límite y, con eso, define si el calor transfiere principalmente por el arrastre del flujo o por conducción dentro del propio fluido. La velocidad y el régimen del flujo, definidos por el número de Reynolds, controlan la mezcla y el espesor de la capa térmica, lo cual se ve en el número de Nusselt y en el coeficiente convectivo h . Asimismo, h define la tasa de intercambio mediante la ley de enfriamiento de Newton. Se puede decir que la convección forzada es un problema termo-fluidodinámico: comprender el flujo es muy importante para predecir el comportamiento y requerimientos para un intercambiador de calor.

3.3 Métodos numéricos para el análisis de sistemas térmicos

Cuando se busca analizar sistemas complejos, ya sea por su geometría, propiedades de material y/o porque existen una mezcla de inputs que perturban el sistema lo cual hacen el estudio demasiado complejo, usualmente se recurre a la solución por métodos numéricos. Hay diferentes tipos de métodos numéricos los cuales son más usuales para ciertos problemas y fenómenos. Para un análisis

térmico necesitamos preguntarnos qué tipo de transferencia de calor está sucediendo para saber cómo abordar cada caso. De los tres casos, los tipos de análisis más comunes en sistemas aeroespaciales y automotrices son el de conducción y convección. Es relevante mencionar que para el caso de radiación lo más usual es simplificar el sistema tomando como condición de frontera, cualquiera de los otros dos casos, la temperatura resultante para este tercer fenómeno los view factor se usan como condiciones geométricas para incorporar el efecto de la radiación sin resolver la ecuación de transferencia de calor radiativa.

En el caso de conducción es oportuno usar el análisis por elementos finitos. Se parte de interpoladores polinomiales, como lo pueden ser los interpoladores de Lagrange, para después generar unas funciones de forma. En este método se aproxima una ecuación diferencial que representa un fenómeno como una fuente de calor, flujo de calor, flexión, carga axial, etc. usando el método de residuos ponderados en donde se introduce una función de peso que se le impone un valor de cero y se transforma a la forma débil de dicha ecuación diferencial. Usando el método de Galerkin, se usan las funciones de forma como las funciones de peso para transformar el sistema a uno algebraico en donde la ecuación a resolver es:

$$K_T T = Q \quad (3.3.1)$$

K_T : es la matriz de conductividad térmica

T : es el vector nodal de temperaturas

Q : es el vector nodal de calor total suministrado

Para un análisis de un fenómeno de convección, es común abordarlo usando el método de diferencias finitas, debido a la necesidad de modelar fluidos. Tomando el caso más simple el cual es un problema 1D, se parte de la ecuación de convección:

$$u \frac{dT}{dx} = 0 \quad (3.3.2)$$

T : es la temperatura [K]

x : es la dimensión espacial [m]

u : velocidad del flujo [m/s]

Para el análisis por diferencias finitas se parte de las series de Taylor para una expresión similar al término de la parte derecha de la ecuación. A continuación, se muestra el procedimiento para obtener un esquema *upwind* de segundo orden, con aproximaciones, que es el más simple, pero sigue siendo representativo:

$$\frac{d\phi}{dx} \quad (3.3.3)$$

Usando un esquema direccional y de segundo orden considerando un flujo positivo:

$$\phi_{i-1} = \phi_i - \Delta x \frac{d\phi}{dx} + \frac{\Delta x^2 d^2\phi}{2! dx^2} - \frac{\Delta x^3 d^3\phi}{3! dx^3} + O(\Delta x^4) \quad (3.3.4)$$

$$\phi_{i-2} = \phi_i - 2\Delta x \frac{d\phi}{dx} + \frac{2\Delta x^2 d^2\phi}{dx^2} - \frac{4\Delta x^3 d^3\phi}{3 dx^3} + O(\Delta x^4) \quad (3.3.5)$$

Buscando una aproximación de la forma $\frac{d\phi}{dx}|_i \approx A\phi_i + B\phi_{i-1} + C\phi_{i-2}$, e imponiendo que se tenga una aproximación de segundo orden:

$$A = \frac{3}{2\Delta x}; B = -\frac{4}{2\Delta x}; C = \frac{1}{2\Delta x} \quad (3.3.6)$$

Llegando a:

$$\frac{d\phi}{dx}|_i = \frac{3\phi_i - 4\phi_{i-1} + \phi_{i-2}}{2\Delta x^2} + O(\Delta x^2) \quad (3.3.7)$$

Haciendo la similitud con la ecuación de conducción en 1D:

$$\frac{dT}{dx}|_i = u \frac{3T_i - 4T_{i-1} + T_{i-2}}{2\Delta x^2} + O(\Delta x^2) \quad (3.3.8)$$

Esta ecuación es la que se resuelve usando algún método numérico como el método de eliminación de Gauss, *Tri-diagonal matrix method* (TDMA), el método de Jacobi, el de Gauss Seidel, etc.

4. Contexto de la Participación Profesional

Como se mencionó en la introducción, las parrillas representan un elemento importante del sistema de enfriamiento del vehículo, ya que afectan directamente el flujo de aire disponible para los intercambiadores de calor. Durante mi desempeño como ingeniería de programa de sistemas térmicos en Ford Motor Company®, mi proyecto principal consistió en la validación del diseño de las parrillas para vehículos tipo pick-up, asegurando que éstas cumplieran con los requerimientos de flujo de aire necesarios para el correcto desempeño térmico, considerando las restricciones de diseño, manufactura e identidad de la OEM.

En los motores de combustión, siendo este el peor caso de estudio, el sistema de enfriamiento debe operar en un rango de temperatura seguro para el motor que llega a ser entre los 85°C a 118°C en el líquido de anticongelante en el motor, es decir, un rango promedio de 110°C ± 5°C, según criterios y estándares de la industria automotriz. Este rango permite maximizar la eficiencia térmica del motor, controlar la viscosidad del lubricante, mantener las emisiones en rango y prevenir las fallas por sobrecalentamiento (Halderman, J.D., 2020).

En transferencia de calor, la disipación de energía (Q) en un intercambiador de calor como el radiador puede expresarse con la ecuación de balance de energía del fluido que absorbe el calor, en este caso el aire:

$$Q = -\dot{m}_{aire} C_{p_{aire}} (T_{out} - T_{in}) \quad (4.1)$$

donde

Q : la tasa de calor rechazado [W]

$\dot{m}_{aire}$: flujo másico del aire [kg/s]

$C_{p_{aire}}$: calor específico del aire [J/(kg * K)]

T_{out-in} : temperaturas de salida y entrada del aire [K]

Esta expresión indica la cantidad de calor que puede disiparse debido al flujo másico del aire y del incremento de temperatura que el aire experimenta al atravesar el intercambiador.

El flujo másico está directamente relacionado con el flujo y velocidad del aire, de acuerdo con la relación:

$$\dot{m}_{aire} = \rho A_{eff} v \quad (4.2)$$

Donde:

ρ : densidad del aire [kg/m^3]

A_{eff} : área efectiva del paso de aire [m^2]

v : velocidad del aire [m/s]

Las parrillas de los vehículos afectan directamente el área efectiva del paso de aire (A_{eff}) y también generan pérdidas de carga que reducen la velocidad del aire, disminuyendo el flujo másico que llega al radiador.

La transferencia de calor entre el aire y la superficie del radiador ocurre por convección forzada, la cual se describe por la siguiente ecuación.

$$Q = h A (T_{anticongelante} - T_{aire}) \quad (4.3)$$

Donde

h : es el coeficiente de convección del aire [$W/(m^2 K)$]

A : área efectiva de transferencia de calor [m^2]

$T_{anticongelante}$: Temperatura promedio del anticongelante [K]

T_{aire} : Temperatura promedio del aire [K]

El coeficiente convectivo h depende del régimen de flujo y puede expresarse a partir del número de Nusselt:

$$h = \frac{Nu k}{L} \quad (4.4)$$

Donde

Nu : Número de Nusselt [L^0]

k : conductividad térmica del aire [$W/(m K)$]

L : Longitud característica del intercambiador [m]

Así en ambas de estas ecuaciones térmicas, la ecuación de balance de energía y convección, están directamente relacionadas con el flujo de aire. Más flujo de aire no sólo incrementa la cantidad de masa disponible para absorber calor ($\dot{m}C_p$), sino que también eleva el coeficiente convectivo (h), modificando el proceso de enfriamiento y mejorarlo.

Entonces, si el diseño de la parrilla es poco restrictivo y con grandes áreas efectivas lograremos mejorar el proceso de enfriamiento debido a la disponibilidad de flujo másico de aire disponible para absorber calor y un coeficiente convectivo más alto permitiendo intercambio de calor efectivo. Sin embargo, es posible que dicha área representa un reto debido a que no presentará la esencia de la OEM y/o no cumplirá con la función de proteger el sistema enfriamiento siendo entonces inútil dicho diseño.

Por el contrario, si se diseña una parrilla que sólo represente la esencia y personalidad de la OEM resultando en un diseño de parrilla muy restrictivo, el flujo se verá reducido, por tanto, el coeficiente y la masa disponible para absorber calor causando potencialmente no lograr mantener la temperatura del motor dentro del rango de operación óptima para el correcto desempeño del vehículo.

5. Metodología del Proyecto

Para llevar a cabo la evaluación del diseño de las parrillas del vehículo, implementé un proceso de trabajo de tipo iterativo, el cual requirió una comunicación constante y directa con el diseñador responsable del componente. Es importante destacar que dicho diseñador no necesariamente está familiarizado a tan bajo nivel en la ingeniería térmica, para ello estamos nosotros, por lo que una parte importante del proceso consistió en describir los requerimientos técnicos del sistema térmico, claramente para hacerlos comprensibles, lo que permitió una correcta toma de decisiones de diseño. La primera actividad que realicé fue contactarme con el diseñador de la parrilla asignada, con el objetivo de definir juntos los tiempos de entrega funcionales, considerando tanto mis actividades de validación como el cronograma global del proyecto vehicular.

Desde las primeras etapas del proyecto opté por un método de trabajo iterativo, ya que este esquema de trabajo permitió proporcionar retroalimentación continua y oportuna, reduciendo el riesgo de cambios mayores en etapas avanzadas del desarrollo. Este esquema facilitó explorar múltiples alternativas de diseño, buscando siempre equilibrio entre los requerimientos estéticos, aerodinámicos, de manufactura, y las necesidades funcionales para el sistema de enfriamiento. Con este método, cada versión del diseño que recibía era evaluada de manera técnica y posteriormente la regresaba al diseñador con observaciones específicas, lo que permitió realizar ajustes oportunos basados en los resultados de la evaluación y los criterios de desempeño térmico.

El esquema de trabajo descrito tiene una estructura similar a la metodología *Agile*, como se ilustra en la Figura 5.1, en la cual realicé iteraciones sucesivas entre las etapas de diseño, análisis y retroalimentación hasta alcanzar la liberación final del diseño en su etapa pre-prototipo. Este enfoque me permitió detectar de manera temprana posibles problemas entre el diseño y la funcionalidad, así como optimizar los tiempos de evaluación al evitar retrabajos.



Figura 5.1 Representación del flujo de trabajo, método tipo Agile. Elaboración propia mediante ChatGPT (OpenAI, 2024)

Una vez definí el esquema de trabajo, al recibir cada modelo CAD inicié el proceso de validación de este. En esta etapa verifiqué que el archivo correspondiera a la versión correcta del diseño, que pudiera ensamblar adecuadamente dentro del modelo completo del vehículo y que cumpliera con las condiciones necesarias para su análisis térmico. Asimismo, confirmé que la geometría incluyera todos los elementos relevantes para la evaluación del flujo de aire, tales como aberturas y placas. Esta verificación previa fue muy importante para evitar errores de interpretación, retrabajos y evitar retrasos en la entrega del proyecto.

Con el modelo CAD validado, procedí a la etapa de análisis asistido por computadora (CAE). Aunque como ingeniera de programa fui responsable de definir y proporcionar los inputs técnicos requeridos para su ejecución. Para ello, identifiqué el mercado objetivo del vehículo, el tipo de motor - gasolina o diésel - para definir las condiciones del peor caso térmico. Este análisis incluyó la revisión detallada de los países destino del vehículo, considerando como críticos aquellos que presentan las temperaturas ambiente más altas, así como las configuraciones específicas de los sistemas de enfriamiento, tales como el tamaño del radiador, el condensador y la presencia de sistemas ATOC (*air transmission oil coolant*) o WTOC (*water transmission oil coolant*).

A partir de esta información, definí los casos de análisis que debían ser simulados, buscando reducir la cantidad de casos a analizar garantizando la representatividad de los resultados. Posteriormente,

envié al equipo de CAE el modelo CAD previamente verificado, junto con los parámetros de los intercambiadores de calor y las condiciones de frontera necesarias para la ejecución de las simulaciones en ANSYS. Esta etapa fue importante para asegurar que los resultados obtenidos fueran comparables entre iteraciones y útiles para la toma de decisiones de diseño.

Una vez disponibles los resultados de CAE, realicé una revisión para verificar su coherencia con las capacidades físicas y geométricas del vehículo. En esta revisión analicé que el área frontal reportada fuera consistente con la geometría real, así como que las velocidades y flujos de aire se encontraran dentro de rangos físicamente posibles. Posteriormente, comparé estos valores con los correspondientes a la versión del vehículo que se encuentran actualmente en producción, utilizando como referencia datos conocidos y resultados de pruebas físicas previamente realizadas. Cuando los valores obtenidos eran iguales o superiores a los de referencia, consideré que el desempeño térmico del diseño evaluado era adecuado y detuve el proceso iterativo, dado que, como se explicó en el capítulo anterior, el flujo y la velocidad del aire se encuentran directamente relacionados con el rendimiento de los intercambiadores de calor.

En los casos en los que los resultados obtenidos no cumplían con los criterios establecidos, usé dichos valores como input de un modelo de simulación unidimensional desarrollado en Modelica, con el objetivo de evaluar si la temperatura del anticongelante del motor se encontraba dentro del rango de operación. Este modelo unidimensional permite considerar múltiples variables, tales como condiciones ambiente, carga térmica del motor y características de los intercambiadores de calor, las cuales resultan complejas de resolver mediante métodos analíticos. Si los resultados de esta simulación indicaban que la temperatura del anticongelante se mantenía dentro del rango de operación, el proceso iterativo lo detenía en esta etapa.

Por último, cuando los resultados tanto de CAE como del modelo 1D indicaban un desempeño insuficiente, regresaba el diseño con las observaciones y recomendaciones específicas, justificadas con base en los resultados obtenidos. Estos casos daban inicio a una nueva iteración del ciclo para ajustar el diseño de la parrilla hasta alcanzar una solución que cumpliera con los requerimientos térmicos, de diseño y de manufactura establecidos para el vehículo.

6. Resultados

Con el desarrollo del proyecto descrito en los capítulos anteriores, logré cumplir de manera satisfactoria con los objetivos establecidos por la empresa y, más específicamente, por el equipo de sistemas térmicos. A través del proceso de validación del diseño de las parrillas, me fue posible asegurar que el subsistema de enfriamiento del vehículo cumpliera con los requerimientos térmicos para las parrillas definidas durante la etapa de desarrollo logrando una mejora del 5%, permitiendo dar el visto bueno técnico para continuar con las siguientes fases del programa.

El visto bueno del diseño se declara una vez que confirmé, mediante análisis CAE y simulaciones complementarias, que los flujos de aire disponibles a través de la parrilla eran los óptimos para garantizar el desempeño adecuado de los intercambiadores de calor en las condiciones más críticas de operación. Con la validación que ejecuté logré asegurar que con los resultados el sistema de enfriamiento era capaz de mantener la temperatura del anticongelante del motor dentro de su rango de operación óptimo, en todos los modos de operación del vehículo. De esta manera, evité el riesgo de sobrecalentamiento del motor y la degradación anticipada de los componentes debido a la sobreexposición al calor.

Asimismo, el proceso iterativo de retroalimentación con el equipo de diseño me permitió alcanzar un balance adecuado entre los requerimientos funcionales del sistema de enfriamiento y las restricciones de diseño, manufactura y estética del vehículo. Es decir, se logró una solución que no solo cumplió con los criterios térmicos, sino que también cumplió con los requerimientos estéticos del vehículo y de manufactura. Este esquema ayudó a evitar retrabajos en etapas posteriores del desarrollo y a entregar 2 ± 1 días antes de las fechas límite.

Cumplir con los requerimientos de flujo y temperatura de operación para mantener el sistema de enfriamiento del motor, dentro del tiempo establecido es un resultado importante del proyecto, ya que permitió liberar el diseño para su posterior validación en pruebas físicas. Esta etapa es muy importante dentro del proceso, ya que confirma experimentalmente el desempeño térmico del sistema bajo condiciones reales de operación. La correcta ejecución de la validación previa

incrementó la probabilidad de éxito en las pruebas físicas y redujo la necesidad de modificaciones tardías al diseño, lo cual resulta en grandes costos para la OEM.

La importancia del vehículo validado se estima para 40 países aproximadamente, por ello, la relevancia del trabajo realizado y la responsabilidad al desarrollar de un sistema térmicamente robusto y confiable. Al ser un vehículo proyectado para múltiples mercados, con diferentes condiciones climáticas, los resultados obtenidos impactan directamente en la confiabilidad, el desempeño y la seguridad del producto final. Así, este proyecto aportó significativamente tanto al programa vehicular como a mi formación profesional como ingeniera, en la Figura 6.1 una foto del corporativo de Ford Motor Company® en México.



Figura 6.1 Foto del corporativo de Ford Motor Company® en Naucalpan, Estado de México. Fuente: Ford de México (2022).

Conclusiones

Con este proyecto aprendí a enfrentar problemas reales de la industria automotriz, en los cuales las soluciones no dependen únicamente de un análisis teórico, sino de la capacidad para integrar criterios técnicos, restricciones de diseño, manufactura, tiempos de desarrollo, trabajo multidisciplinario entre equipos.

Uno de los aprendizajes fue la aplicación de los principios de transferencia de calor y dinámica de fluidos al validar el desempeño térmico de las parrillas para un vehículo tipo pick-up. En especial, consolidé de manera detallada la relación entre el flujo de aire, la convección y la capacidad de rechazo de calor de los intercambiadores, así como la importancia que los componentes aparentemente estéticos, como lo son las parrillas, tienen en el funcionamiento del sistema de enfriamiento. También, desarrollé habilidades para interpretar resultados de simulaciones CAE y compararlos con modelos unidimensionales y datos físicos de referencia, reforzando mi capacidad como ingeniera aeroespacial.

Mi formación como ingeniera aeroespacial fue muy importante para el desarrollo de este proyecto y fue una ventaja competitiva para entrar al equipo de sistemas térmicos. La ingeniería aeroespacial se caracteriza por el análisis detallado de sistemas complejos, pues nos enfrentamos a condiciones extremas y, por tanto, a la necesidad de garantizar alta confiabilidad y seguridad, criterios que son aplicables directamente al desarrollo de vehículos.

Los aprendidos en materias como transferencia de calor, dinámica de fluidos, así como temas vistos en lo largo de mi formación, como los son: el análisis térmico, validación por simulación e identificar los casos más críticos de estudio, fueron importantes para el análisis del subsistema de enfriamiento en el vehículo. Este tipo de análisis es similar en el diseño térmico de satélites, vehículos de lanzamiento y aeronaves, donde el control de la temperatura es crítico para garantizar el funcionamiento de los sistemas. La diferencia entre ambas industrias se puede notar en el resultado final del producto, sin embargo, la capacidad de analizar y tomar decisiones al mismo nivel de detalle es aplicable en ambas industrias.

Esta experiencia me ayudó a crecer profesionalmente y reconocer la versatilidad de la ingeniería aeroespacial, su capacidad de aportar valor en sectores distintos al espacial y la facilidad de adaptación de un ingeniero aeroespacial. Con este proyecto fue necesario adaptarme a una industria y sistema diferente, como lo son los vehículos, colaborar con equipos multidisciplinarios y proponer soluciones viables ante restricciones reales de diseño y manufactura. Esto me ayudó a desarrollar habilidades relevantes para desempeñarme como ingeniera, tales como el criterio técnico, la capacidad de análisis y la toma de decisiones.

El proyecto reforzó mis habilidades técnicas como ingeniera y confirmó la adaptabilidad y versatilidad de la ingeniería aeroespacial, capaz de generar soluciones de relevancia en diferentes industrias. Mi experiencia en el sector automotriz reforzó mi criterio como ingeniera, amplió mi campo de aplicación profesional y me ayudó a reconocer la capacidad de aplicación como profesionista en cualquier industria, ya sea espacial, automotriz o hasta la agropecuaria.

Referencias

- **Britannica, T. Editors of Encyclopaedia.** (2025). *Automotive industry*. Encyclopedia Britannica. Recuperado de <https://www.britannica.com/technology/automotive-industry>
- **National Geographic.** (2022). *Henry Ford, la revolución de la industria del automóvil*. Historia National Geographic. Recuperado de https://historia.nationalgeographic.com.es/a/henry-ford-revolucion-industria-automovil_17863
- **Sadurní, J. M.** (2024). *Bertha Benz, la pionera del automóvil*. Historia National Geographic. Recuperado de https://historia.nationalgeographic.com.es/a/bertha-benz-pionera-automovil_15291
- **Serrano, C.** (2020). *Sector automotriz: retos y oportunidades*. BBVA Research. Recuperado de https://www.bbvaresearch.com/wp-content/uploads/2020/02/200227_ArtPrensa_CarlosSerrano.pdf
- **Gajbhiye, S.** (2024). *51% of all humans rely on car commutes every day*. Earth. Recuperado de https://www.earth.com/news/51-percent-of-the-world-relies-on-car-commutes-every-day/?utm_source=chatgpt.com
- **Ford Media Center®.** (2023). *Ford+ Plan*. Ford Motor Company Media®. Recuperado de <https://media.ford.com/content/fordmedia/fna/us/en/news/2022/03/02/ford-accelerating-transformation.html>
- **Britannica, T. Editors of Encyclopaedia.** (2024). *Ford Motor Company®*. Encyclopedia Britannica. Recuperado de <https://www.britannica.com/topic/Ford-Motor-Company>
- **Cengel, Y. A., & Ghajar, A. J.** (2011). *Transferencia de calor y masa (4.ª ed.)*. McGraw-Hill Education.
- **Halderman, J. D.** (2020). *Automotive Technology: Principles, Diagnosis, and Service (6th ed.)*. Pearson.
- **Thomas J.R. Hughes.** (1987). *The Finite Element Method*. Prentice-Hall, Inc.
- **Tannehill.** (1984). *Computational Fluid Mechanics and Heat Transfer*. Hemisphere Pub. Corp

- **Fortescue, P., Swinerd, G., & Stark, J.** (2011). *Spacecraft Systems Engineering (4th ed.)*. John Wiley & Sons.
- **Gilmore, D. G. (Ed.)**. (2002). *Spacecraft Thermal Control Handbook, Volume I: Fundamental Technologies*. Aerospace Press.