



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**Proceso de diseño, validación y  
análisis de elongación del sistema de  
escape de un vehículo.**

**INFORME DE ACTIVIDADES PROFESIONALES**

Que para obtener el título de

**Ingeniero Mecánico**

**P R E S E N T A**

Pedro García Zarco

**ASESOR DE INFORME**

Marco Antonio Reyes Huesca



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2016

# Índice

## Contenido

Pág.

Dedicatoria.....	4
I. Antecedentes.....	5
II. Objetivo.....	7
III. Resumen.....	8
Capítulo 1. Ford Motor Company©.....	9
1.1 Historia.....	11
1.2 Misión.....	11
1.3 Valores.....	12
1.4 Principios guía.....	12
1.5 Visión.....	12
1.6 Los 4 pilares.....	13
1.7 Descripción del puesto.....	14
Capítulo 2. Sistemas de escape en la industria automotriz.....	16
2.1 Función del sistema de escape.....	16
2.2 Componentes del sistema de escape.....	16
2.2.1 Múltiple de escape.....	17
2.2.2 Ducto flexible.....	18
2.2.3 Convertidor catalítico.....	18
2.2.4 Resonador.....	19
2.2.5 Ducto intermedio.....	19
2.2.6 Silenciador.....	20
2.3 Análisis de flujo dinámico por computadora.....	21
2.4 Vibraciones.....	21
2.5 Desempeño estructural.....	22
2.5.1 Localización óptima de los ganchos.....	23
2.5.2 Frecuencia natural.....	24
2.5.3 Análisis de gravedad.....	25
2.5.4 Análisis de rotación del tren motriz.....	26
2.5.5 Road Load Data Acquisition (Adquisición de datos de cargas del camino).....	27
2.5.6 Análisis de fatiga.....	29
2.5.7 Pruebas de correlación.....	29
Capítulo 3. Metodología, validación y análisis de cálculos.....	31
3.1 Diseño.....	32
3.2 CAE.....	32
3.3 Validación de durabilidad.....	33
3.4 Validación de temperaturas.....	37

3.5 Cálculos de primera aproximación.....	39
3.5.1 Elongación y esfuerzos térmicos.....	39
Conclusiones.....	42
Bibliografía / Mesografía.....	44

# Dedicatoria

Este es el inicio de un compromiso conmigo mismo, con mi universidad, con mi familia, con la sociedad y con mi país para dar lo mejor de mis habilidades y capacidades como ingeniero mecánico y ser humano con el fin de aportar soluciones a los diversos problemas de la actualidad sea donde sea que termine ejerciendo mi profesión.

No hubiera podido llegar solo hasta este momento, por lo cual quiero agradecer a mis padres por soportar junto conmigo la ardua batalla que es convertirse en ingeniero, a los profesores que tienen fe en las generaciones venideras, aquellos que aman su manera de transmitir sus conocimientos y te contagian el amor por el conocimiento, a mis hermanos de amistad: Alan, Lázaro, Víctor y Eugenio con los cuales los problemas se resuelven como pasatiempos, ellos son un gran complemento en mi vida. A toda la familia de parte de mi madre y padre; gracias por creer en mí, siempre estaré con ustedes.

Esta dedicatoria es sumamente escueta, no tengo palabras para agradecer a todas las personas que conozco y que conocí, de todos aprendí algo y puede que unas ni me recuerden y otras que sí, lo que les quiero decir es que todas estas personas de alguna manera agregaron algo en mi sin darse cuenta, colaboraron en diseñar, construir, y calibrar la gran máquina que hoy está completa y lista para arrancar.

Por último me gustaría mencionar que la Facultad de Ingeniería UNAM provee una sólida formación ingenieril a sus alumnos, sin embargo es obligación del alumno mismo el expandir sus conocimientos de la lengua inglesa y el manejo de programas computacionales requeridos en las empresas. El aprendizaje de la lengua inglesa debe de ser reforzada, ya que hoy en día es una llave universal para poder ingresar en el ámbito laboral. De la misma manera hace falta fomentar una vinculación más fuerte con la industria, el acercamiento de los estudiantes de otras universidades con la industria les permite a los alumnos generar redes de comunicación que les brinda la posibilidad de saber cuáles son los requerimientos del campo laboral y prepararse con las herramientas necesarias para ser candidatos altamente competitivos.

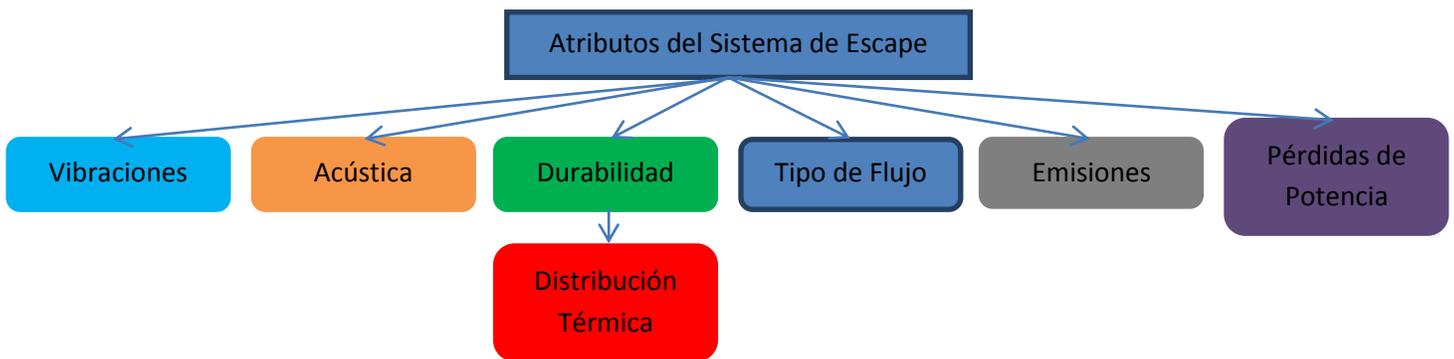
PD:

- El equilibrio es un principio fundamental, no todo es estudiar para llegar a ser el mejor ingeniero.
- Todo fluye.
- Hermana, tú eres 200% más capaz que yo en todo, solo decídete.

## I. Antecedentes.

Los sistemas de escapes de vehículos tienen como propósito dirigir los gases de combustión del motor hacia una zona segura, lejos de la cabina de los pasajeros y reducir-oxidar los gases nocivos.

Para diseñar estos sistemas, se han clasificado varios atributos con base en la experiencia para agrupar todas las variables de una manera sencilla, dichos atributos son: vibraciones, acústica o ruido, durabilidad, distribución térmica, tipo de flujo, pérdidas de potencia, emisiones e interfaces con la estructura del vehículo y el medio ambiente, en la Fig. 1, se muestra el resumen de los atributos.



**Fig. 1. Resumen de los atributos de un sistema de escape**

Las vibraciones son transmitidas desde el tren motriz al escape y del escape a la estructura del vehículo. Para reducir las vibraciones desde el tren motriz por lo general se emplea un acoplamiento o ducto flexible y para reducir las vibraciones transmitidas a la estructura se utilizan aisladores de hule.

El ruido y pérdidas de potencia se deben a la turbulencia de los gases de escape, toda curva y ductos internos son perturbaciones que contribuyen a pérdidas de presión a la vez derivando en pérdidas de potencia.

Debido a las altas temperaturas de los gases de escape, la durabilidad del sistema y el medio ambiente son afectados. La durabilidad es afectada en cuanto a las propiedades de los materiales y los esfuerzos térmicos, que combinados con los esfuerzos estructurales producen una distribución de esfuerzos mayor y por afectación del medio ambiente se tienen la estructura del vehículo y sistemas cercanos como las líneas y tanque de combustible.

Todos los atributos del sistema de escape son utilizados para asegurar que la vida útil de este cumple con los requisitos y reglas de diseño de la compañía, por lo tanto, el área de ingeniería de diseño es la responsable de validar las pruebas numéricas y físicas con las cuales se establece el diseño final del sistema.

Ford Motor Company© programó el lanzamiento de un nuevo modelo del vehículo Transit©, dicho modelo en comparación con el pasado presento cambios dimensionales y de su tren motriz por lo cual el sistema de escape tuvo que ser rediseñado. Como ingeniero de diseño, se trabajó conjuntamente con proveedores realizando simulaciones numéricas y pruebas físicas que validaran la durabilidad y distribución térmica del sistema para permitir su adecuada adaptación al tren motriz y las nuevas dimensiones, asegurando que el vehículo en su conjunto sea útil y seguro para cualquier usuario.

## II. Objetivo.

Este trabajo tiene como objetivo presentar el proceso de diseño y validación de la distribución de temperaturas y durabilidad de un sistema de escape mediante simulaciones de cargas estáticas de fuerzas G, axiales y pares de fuerza, correlacionando simulaciones numéricas con pruebas físicas y finalmente cálculos de elongación y esfuerzos térmicos de diferentes componentes del sistema. Dichas actividades las llevé a cabo como ingeniero de diseño sustentando que se he adquirido los conocimientos, habilidades técnicas y el aprendizaje de las herramientas de análisis y resolución de problemas a través de un año de trabajar profesionalmente en la industria automotriz.

### III. Resumen.

En el primer capítulo de este trabajo se tratarán los antecedentes de Ford Motor Company© y su presencia en la industria automotriz tanto en México como en el mundo aunado con las funciones que lleva a cabo un ingeniero de diseño mediante una descripción de sus roles y responsabilidades y una breve descripción del proyecto en el que se colaboró.

En un segundo capítulo se relacionan los sistemas de escape en la ingeniería automotriz, se detalla las partes que componen un sistema de escape, sus diferentes funciones, las simulaciones numéricas y pruebas físicas que se realizan al diseñarlos.

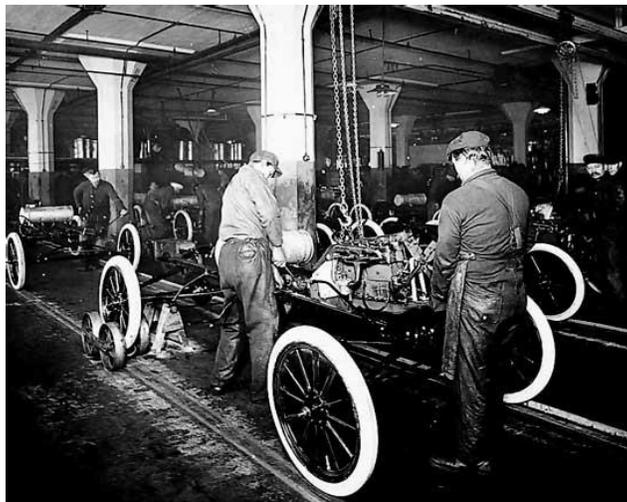
El tercer capítulo conjunta el caso práctico donde se abordarán las actividades de validación que se realizaron durante el diseño de un sistema de escape prototipo para un vehículo Ford Transit©. Se resumen los análisis realizados del sistema de escape y su respectiva finalidad. Cabe mencionar que por confidencialidad de la compañía, no se muestran los resultados oficiales.

# Capítulo 1. Ford Motor Company©.

## 1.1 Historia.

Es una empresa multinacional estadounidense fabricante de automóviles, sus instalaciones principales se encuentran en Dearborn, Michigan, Estados Unidos de Norteamérica. Fue fundada el 16 de junio de 1903 por Henry Ford.

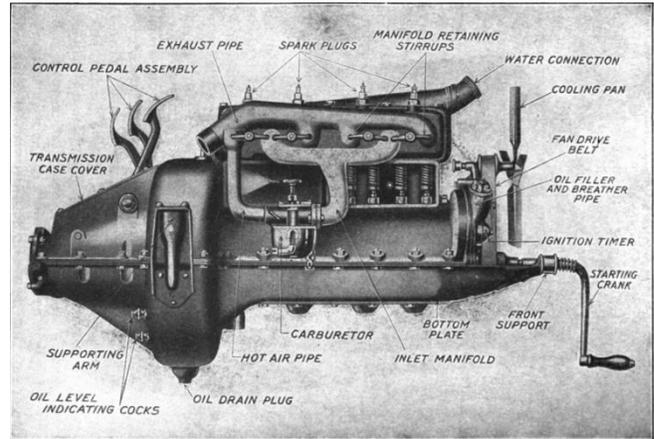
El visionario Henry Ford hace realidad la primera línea de producción en serie que se observa en la Fig.2, en la cual se construyó el modelo T en 1908, como se muestra en la Fig. 3. Dicha línea cambió de manera radical la producción automotriz, y de la industria en general. La finalidad de esta fue construir autos para las masas, sin embargo para que esto fuera posible, se tuvieron que realizar optimizaciones de tiempos y costos.



**Fig.2. Línea de producción del modelo Ford T en el año 1908**  
(<http://www.biografiasyvidas.com/monografia/ford/fotos4.htm>)



(a)



(b)

**Fig. 3. (a) Modelo T y (b) la estructura básica de su motor**  
 (<http://social.ford.es/ford-111-an%CC%83os-de-juventud/>)  
 ([https://en.wikipedia.org/wiki/Ford\\_Model\\_T\\_engine](https://en.wikipedia.org/wiki/Ford_Model_T_engine))

Actualmente, Ford tiene plantas de ensamble en los 5 continentes, 56 plantas en total alrededor del mundo.

En México lleva 90 años de operación, lo cual la consolida como la armadora pionera de la industria automotriz en México.

En la república se cuenta con tres plantas, una en Hermosillo donde se fabrican los vehículos Fusion© y MKZ©, la segunda planta se encuentra en Chihuahua donde se manufacturan los motores 2.0L y 2.5L y la tercera y última planta de manufactura y estampado de Cuautitlán, en la que he laborado un año y donde en la actualidad se fabrica el vehículo Fiesta©.

En 1962 se inició la construcción del complejo Cuautitlán, el cual incluyó las plantas de fundición, motores, centro de ingeniería de producto, laboratorios de control de calidad y una pista de pruebas.

El complejo fue inaugurado el 4 de noviembre de 1964. 1970 fue un gran año ya que se dio el inicio de operaciones de sus plantas de ensamble en Cuautitlán.

Las operaciones fundamentales de la planta van desde el estampado y construcción de carrocerías, pintura de los vehículos, ensamble final, como se muestra en la Fig. 4, pre entrega y el embarque de vehículos.

El vehículo Fiesta© comenzó a producirse en el 2010 en esta planta, año en el que se hizo una remodelación y adaptación de la planta.



**Fig. 4. Planta Ford de ensamble y estampado de Cuautitlán**

## 1.2 Misión.

Nuestra misión es mejorar continuamente nuestros productos y servicios a fin de satisfacer las necesidades de nuestros clientes, lo que nos permite prosperar como negocio y proporcionar utilidades razonables a nuestros accionistas quienes son propietarios de nuestro negocio.

## 1.3 Valores.

La manera como cumplimos con ella es tan importante como la misión misma. Los siguientes valores básicos son fundamentales para el éxito de la compañía.

- Gente - Nuestra gente es la fuente de nuestra fuerza. Ellos proporcionan nuestra inteligencia corporativa y determinan nuestra reputación y vitalidad. El involucramiento y el trabajo en equipo son la esencia de nuestros valores humanos.
- Productos - Nuestros productos son el resultado final de nuestros esfuerzos, y deben ser los mejores para servir a nuestros clientes en todo el mundo. Así como nuestros productos son vistos, así somos vistos nosotros.

- Utilidades - Las utilidades son la medida final de cuán eficientes somos al proveer a nuestros clientes con los mejores productos para satisfacer sus necesidades. Las utilidades son necesarias para sobrevivir y crecer.
- Los concesionarios y los proveedores son nuestros socios - La compañía debe mantener relaciones de mutuo beneficio con distribuidores, proveedores y con nuestros demás asociados comerciales.
- La integridad nunca es comprometida - La conducta de nuestra compañía alrededor del mundo debe seguirse de una manera que sea socialmente responsable, requiriendo respeto por su integridad y por sus contribuciones positivas a la sociedad. Nuestras puertas están abiertas para hombres y mujeres de la misma manera sin discriminación y sin considerar origen étnico o creencias personales.

## 1.4 Principios guía.

- La calidad es lo primero - Para lograr la satisfacción de nuestros clientes, la calidad de nuestros productos y servicios debe ser nuestra prioridad número uno.
- Los clientes son el centro de todo lo que hacemos - Nuestro trabajo debe estar hecho pensando en nuestros clientes, proporcionando mejores productos y servicios que nuestra competencia.
- El mejoramiento continuo es esencial para nuestro éxito - Debemos esforzarnos por la excelencia en todo lo que hacemos: en nuestros productos, en su seguridad y valor, y en nuestros servicios, nuestras relaciones humanas, nuestra competitividad y nuestra rentabilidad.
- El involucramiento del personal es nuestra forma de vida - Somos un equipo. Debemos tratarnos unos a otros con confianza y respeto.

## 1.5 Visión.

Una buena compañía ofrece excelentes productos y servicios, una gran empresa además, se preocupa por hacer nuestro mundo un mejor lugar donde vivir. “William Clay Ford JR.”

## 1.6 Los 4 pilares.

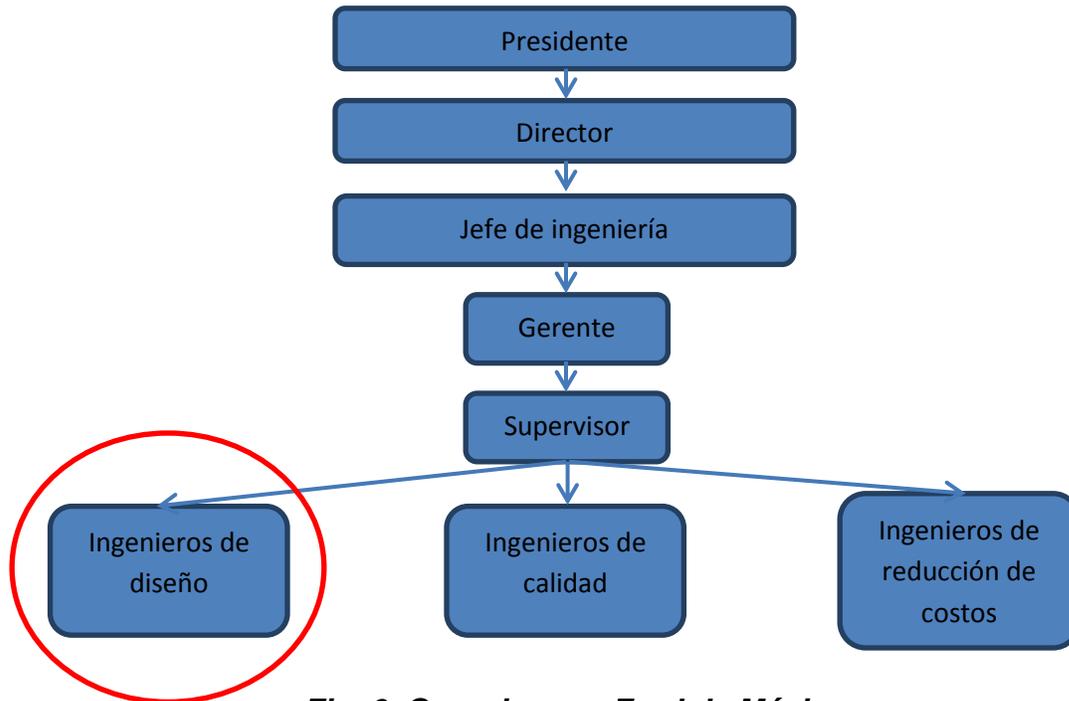


**Fig. 5. Los 4 Pilares Ford**

Ford se rige por cuatro pilares (Fig.5), como estrategia global del desarrollo del producto, dichos pilares son la base para tomar decisiones enfocadas en una mejora continua de los productos. Los cuatro pilares son:

1. Calidad
2. Ecología
3. Seguridad
4. Inteligencia

## 1.7 Descripción del puesto.



**Fig. 6. Organigrama Ford de México**

Como ingeniero de diseño, soy responsable de diseñar los componentes y sistemas que cumplan con los requerimientos establecidos por Ford Motor Company© que son: alta calidad, bajo peso, económicos y fáciles de manufacturar.

Mi puesto indica entregar diseños mediante soluciones ingenieriles factibles, produciendo diseños de primera clase, validándolos mediante prototipos, hacer estudios de mercado para establecer los objetivos, elegir adecuadamente los colores y materiales para encontrar la apariencia requerida.

Este trabajo presenta la parte en la que colaboré en el proceso de diseño del sistema de escape, el cual consta de la validación de algunas simulaciones y pruebas por computadora de fuerzas de reacción de los componentes del sistema, así como los cálculos de primera aproximación de las elongaciones térmicas y sus esfuerzos térmicos presentes en el sistema de escape cuyos resultados servirán en la toma de decisiones pertinentes a fin de modificar el diseño del sistema de escape prototipo del vehículo Ford Transit© que se muestra en la Fig. 7.



**Fig. 7. Ford Transit©.**

La del proyecto en la que participé al diseñar el sistema de escape consistió en dos etapas: en una primera se validaron simulaciones por computadora de análisis estático a diferentes parte fuerzas G en los tres ejes y correlación de simulaciones numéricas con pruebas físicas. La otra etapa consistió en calcular una primera aproximación de las elongaciones térmicas y los esfuerzos, para tener una primera referencia del crecimiento total del sistema de escape y de este modo saber si se requería realizar cambios de materiales y ruteo del sistema.

Debido a que el modelo Ford Transit© en el que participé no es un diseño totalmente nuevo, el sistema de escape sobre el cual se trabajó es un formato de los modelos Ford Transit© anteriores, por lo que los puntos donde se localizan los ganchos y gran parte del ruteo del ducto intermedio ya se encontraban predefinidos.

## Capítulo 2. Sistemas de escape en la industria automotriz.

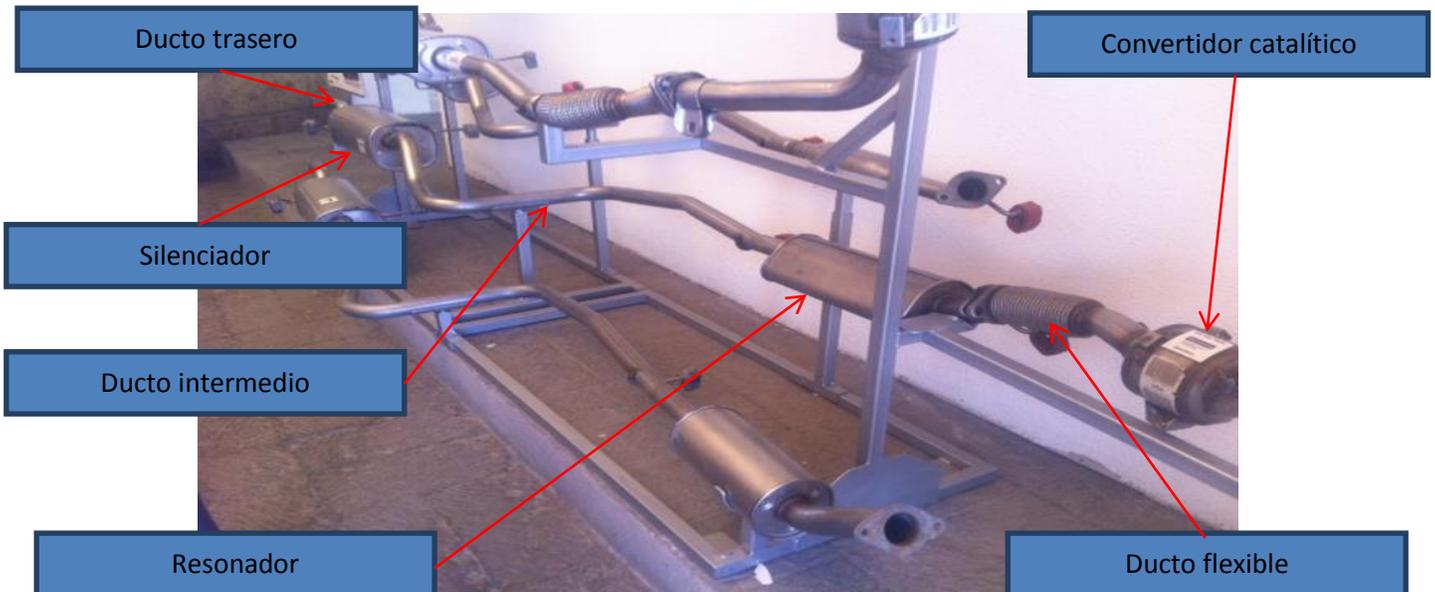
### 2.1 Función del sistema de escape.

El sistema de escape de un vehículo tiene como funciones: transportar los gases de escape desde el motor hasta una posición segura del vehículo, reduciéndolos y oxidándolos en vapor de agua, dióxido de carbono, nitrógeno y oxígeno, reduce el sonido y enfría dichos gases. El diseño del sistema debe de coincidir con el flujo de los gases de escape del motor, resistir a la corrosión interna y resistir a la corrosión externa debido a la presencia de agua y a las sales del camino.

### 2.2 Componentes del sistema de escape.

Los componentes generales de un sistema de escape se muestran en la Fig. 8, estos son:

- Múltiple de escape
- Ducto flexible
- Convertidor(es) catalítico(s)
- Resonador(es)
- Ducto intermedio
- Silenciador(es)
- Ducto trasero



**Fig. 8. Componentes del sistema de escape**

Casi todos los sistemas de escape tienen escudos térmicos (heat shields), que sirven para proteger a los componentes cercanos al sistema de escape, también tienen soportes o ganchos a lo largo del sistema para sostenerse debajo del vehículo, dichos soportes se acoplan con un anillo de hule al sistema de escape. A continuación se describen cada uno de los componentes que forman el sistema.

## 2.2.1 Múltiple de escape.

El múltiple de escape que se observa en la Fig. 9, conecta todos los cilindros del motor al sistema de escape, por lo general este componente está hecho de hierro fundido para soportar las altas temperaturas que se llegan a alcanzar. La contrapresión (presión ejercida en contra de la dirección del flujo de los gases de escape), se reduce haciendo al múltiple de paredes continuas sin ningún doblez puntiagudo; este es uno de los factores que debe ser tomado en consideración cuando se diseña y se manufactura este componente.



**Fig. 9. Múltiple de escape.**

## 2.2.2 Ducto flexible.

Este componente mostrado en la Fig. 10, tiene como función principal el aislar, adaptarse al movimiento y a las diferentes cargas que transmiten el motor y la transmisión al resto del sistema de escape, prolongando su vida útil al disminuir los esfuerzos que tiene que resistir.



*Fig. 10. Ducto flexible.*

## 2.2.3 Convertidor catalítico.

El propósito de un convertidor catalítico como el mostrado en la Fig. 11, es reducir y oxidar gases dañinos presentes en los gases de escape en productos no nocivos como vapor de agua, dióxido de carbono, nitrógeno y oxígeno. Los principales materiales utilizados en estos convertidores catalíticos consisten en depósitos de platino, paladio y rodio, sin embargo se está buscando la posibilidad de utilizar elementos más económicos.

El material catalítico se emplea como un fino recubrimiento en un panel o gránulos cerámicos o de acero inoxidable respectivamente. Los gases pasan a través del panel o

de los gránulos donde se busca tener contacto con mayor superficie posible para que las reacciones químicas se lleven a cabo.

El desempeño de un catalizador recae en la producción correcta de productos finales de los gases de escape. Los vehículos modernos logran realizar esta operación utilizando control de lazo cerrado con sensores colocados después del múltiple de escape y después del catalizador.



**Fig. 11. Convertidor catalítico (panal cerámico).**

## 2.2.4 Resonador.

El propósito de este componente es eliminar ciertas frecuencias de sonido que perjudiquen al oído humano y que cumplan con normas gubernamentales de los diferentes mercados de ventas.

## 2.2.5 Ducto intermedio.

Este ducto mostrado en la Fig.12, es catalogado único en cada vehículo ya que está diseñado con base en el empaquetamiento debajo del vehículo. Los principales obstáculos por los que no se realiza un ducto intermedio en línea recta son por dos

principales sistemas; el tanque de gasolina y las líneas de combustible. Se debe de tener sumo cuidado de cumplir con las distancias entre el sistema de escape y los sistemas de combustible debido a las altas temperaturas que alcanzan los componentes del sistema de escape, ya que podrían provocar la fuga e ignición de combustible.



**Fig. 12. Ensamble de resonador y ducto Intermedio (Unión).**

## 2.2.6 Silenciador.

El silenciador mostrado en la Fig.13, reduce la presión acústica de los gases de escape y los descarga al medio ambiente con un sonido mínimo. Existen dos tipos de silenciadores: el silenciador absorbente, el cual utiliza fibra de vidrio o estropajo de acero para absorber el sonido y el silenciador deflector, el cual utiliza una serie de deflectores para crear cámaras. En los silenciadores tipo deflectores, los gases de escape son transferidos por ductos perforados donde el sonido se absorbe. Los silenciadores son diseñados con una amplia área superficial para que el calor se irradie a la atmósfera.



**Fig. 13. Silenciador en línea de ensamble.**

A continuación se muestra un resumen de los diferentes análisis a los que se someten los sistemas de escape en general, independientemente de la compañía automotriz, cabe mencionar que los datos que se muestran son meramente ilustrativos y fueron obtenidos de la bibliografía señalada.

## 2.3 Análisis de flujo dinámico por computadora.

Este tipo de estudio es útil para evaluar las caídas de presión en el múltiple de escape, la energía disipada en forma de calor y el flujo másico. El análisis térmico es aprovechado para calcular una aproximación de los esfuerzos térmicos inducidos. La guía para trazar la ruta del tubo intermedio es a través de los valores obtenidos de contrapresión, la cual también ayuda a predecir la caída de presión en uniones muy importantes como los convertidores catalíticos, silenciadores y resonadores.

## 2.4 Vibraciones.

El estudio de ruidos, vibraciones y rechinidos es otro estudio que ayuda a determinar la rigidez del aislador de hule. El sistema de escape en la parte fría (llamada así por que las

temperaturas son más bajas que en el múltiple de escape) es considerado un miembro libre colgante.

Durante la fuerza de excitación la respuesta de desplazamiento de la unidad de escape interfiere con componentes cercanos, por lo que estos estudios ayudan a mantener las tolerancias mínimas requeridas entre partes cercanas a la vecindad de la ruta de escape.

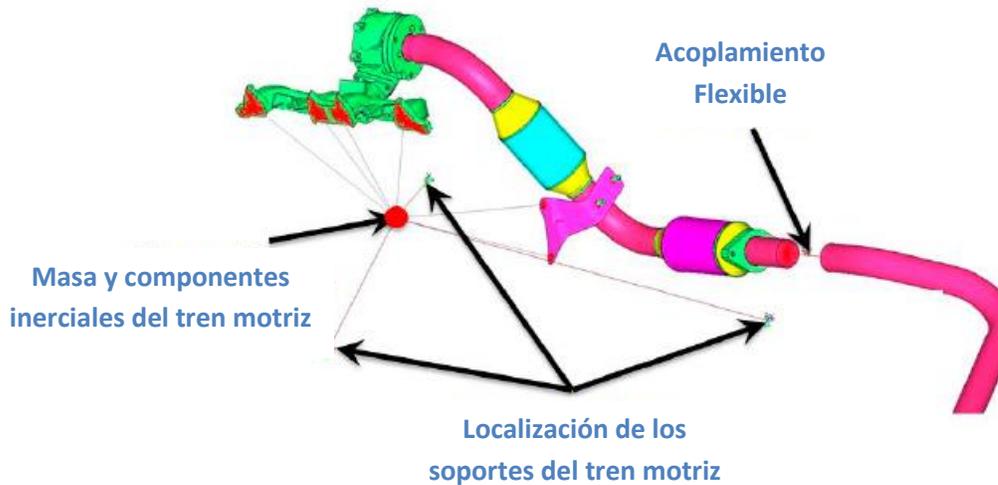
## 2.5 Desempeño estructural.

El estudio del desempeño estructural sirve para decidir los materiales y diseño del sistema acorde a las fallas que se pudieran presentar, estas simulaciones tienen la finalidad de representar la vida útil del sistema.

Para efectuar las simulaciones de desempeño estructural, es necesario el modelo de elemento finito del sistema de escape, el cual es una descripción simplificada (debido a su complejidad), del sistema real para simular ciertos aspectos de su comportamiento.

Cabe mencionar que la generación de la malla es un procedimiento importante para subdividir la geometría sólida en elementos lo más cercano al modelo real, debido a que la malla burda es conocida por arrojar resultados con mínima precisión aunque por otra parte podría ahorrarse tiempo de cómputo y espacio de memoria.

El modelo de análisis incluye la representación de elemento finito del sistema de escape que se observa en la Fig.14, una masa de cuerpo rígido e inercia del tren motriz y una representación flexible de los soportes del tren motriz, los cuales se suponen como tierras o elementos fijos, la masa del motor se agrupa su centro de gravedad y es conectada al múltiple de escape y al soporte de la transmisión usando elementos rígidos, los aisladores de los ganchos son representados también como elementos rígidos con elementos resorte longitud cero utilizando su rigidez medida para definir el sistema de coordenadas local. Los puntos de los ganchos y los soportes del tren motriz son considerados como un elemento fijo para su análisis. Las propiedades materiales del sistema son definidas por el módulo de Young, la relación de Poisson y densidad.

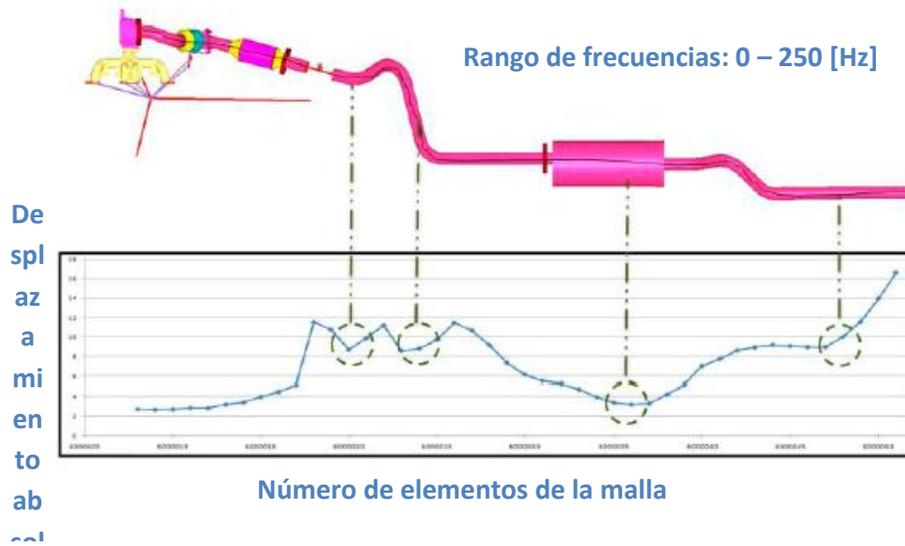


**Fig. 14. Representación del sistema de escape (Arunpreya, K, 2012).**

### 2.5.1 Localización óptima de los ganchos.

Este es uno de los primeros pasos para evaluar el desempeño estructural de un sistema de escape, la localización óptima se elige con base en el desplazamiento de los eigen vectores a la frecuencia de interés, por ejemplo [0-250 Hz]. Se aplica un análisis modal para extraer los eigen vectores verticales en todos los lugares de la red señalados en intervalos regulares del sistema de escape. Los eigen vectores obtenidos son normalizados para cada frecuencia y después sumados para cada punto de la red. Este desplazamiento acumulativo es graficado para cada punto de la red.

Los picos son llamados puntos nodales y los puntos valle son llamados puntos anti nodales, los puntos anti nodales son los lugares donde se presenta poco desplazamiento a las frecuencias de interés y por lo tanto el lugar indicado para colocar un gancho, el resultado se muestra en la Fig. 15.



**Fig. 15. Localización de los ganchos (Arunpreya, K, 2012).**

## 2.5.2 Frecuencia natural.

Este análisis tiene como finalidad evadir la resonancia de la frecuencia natural de la estructura.

La resonancia es causada por la interacción entre las propiedades elásticas e inerciales de los materiales dentro de la estructura, la resonancia es una de las causas más frecuentes que contribuyen a problemas relacionados con ruidos y vibraciones.

El análisis modal es aplicado para extraer las formas y las frecuencias naturales del sistema de escape. El modelo de elemento finito de este paso es modelado con la posición correcta de los ganchos definida anteriormente.

Como se mencionó anteriormente para evitar la resonancia, la fuerza de excitación no debe de ser cercana a la frecuencia natural de la estructura, en este caso, la fuente de excitación es el motor operando en una condición de ralentí.

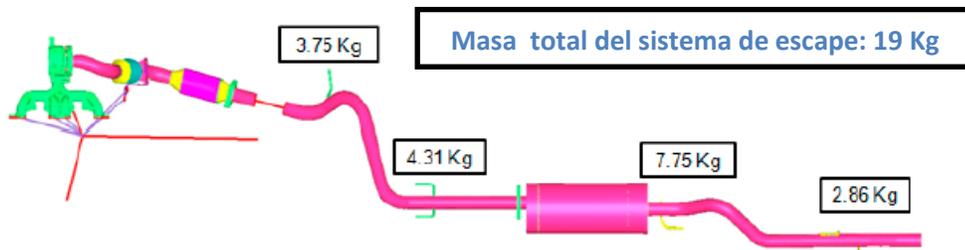
En la Tabla.1 se muestra como ninguna frecuencia del sistema de escape cae dentro de la zona de frecuencias que se debían evitar del motor en ralentí.

**Tabla. 1. Frecuencias naturales obtenidas del sistema de escape.**

Rango de frecuencia del motor en ralentí	
Mode #	Frequency (Hz)
1	6.7
2	7.8
11	15
12	18.4
13	24.1
14	24.8
15	40.9
16	42.9
17	49.7

### 2.5.3 Análisis de gravedad.

El propósito de este análisis es determinar cuanta masa es soportada por cada gancho como se muestra en la Fig.16, para corregir la distribución de la masa de todo el sistema en todos los ganchos. El modelo utilizado es el mismo que en el estudio de frecuencias naturales. En este caso se aplica una fuerza G en las coordenadas globales del vehículo en dirección negativa del eje z y se obtiene la fuerza de reacción en cada gancho y en los puntos de los soportes del tren motriz, las cargas de reacción son emparejadas con la masa total del sistema de escape, por lo que es necesario representar las diferentes partes del sistema de escape lo más cercano a la realidad.



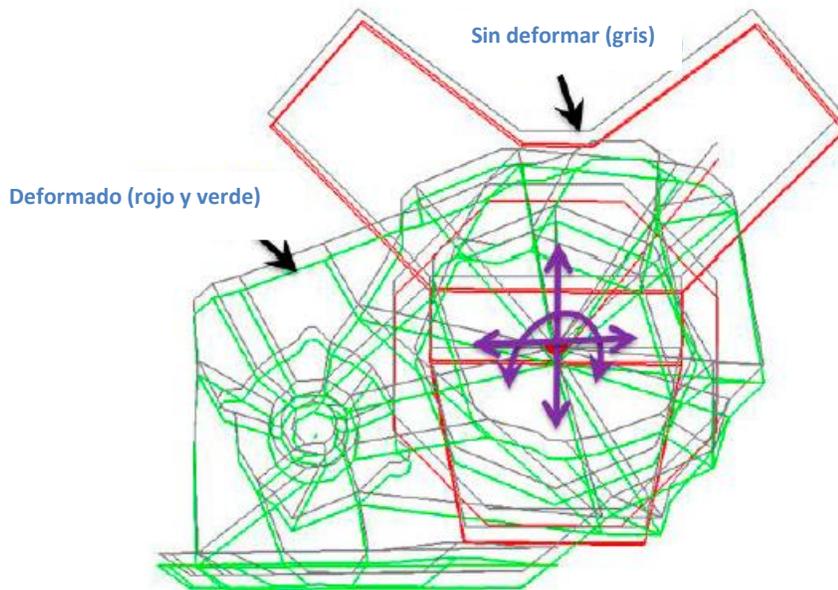
**Fig. 16. Masa soportada por cada gancho (Arunpreya, K, 2012).**

## 2.5.4 Análisis de rotación del tren motriz.

Con este estudio se determina como se transfieren cargas al sistema de escape debido al movimiento rotativo del tren motriz en ralentí o en actividad.

Para cualquier sistema de escape, las cargas son transferidas desde dos fuentes posibles: cargas transferidas desde el cuerpo a través de los ganchos y cargas transferidas desde el motor. Para evaluar las interferencias potenciales entre el tren motriz y los demás componentes del motor, este es representado como un cuerpo rígido como se muestra en la Fig. 17; el par y el movimiento rotativo del motor es aplicado para calcular el movimiento de los soportes del este, cabe mencionar que el par varía dependiendo del escenario al que se someta el vehículo.

El desplazamiento de los soportes desde su posición original actúa como un desplazamiento forzado del sistema de escape cuasi estático conectado desde el múltiple obteniéndose los esfuerzos resultantes para después compararlos con el esfuerzo de cedencia del material para determinar si se necesita o no una mejora de diseño, como podrías ser un cambio de material, en la Tabla. 2, se muestran los resultados de los análisis tabulados.



**Fig. 17. Representación del motor en el análisis de rotación (Arunpreya, K, 2012).**

**Tabla. 2. Esfuerzos Von Mises obtenidos del análisis de rotación.**

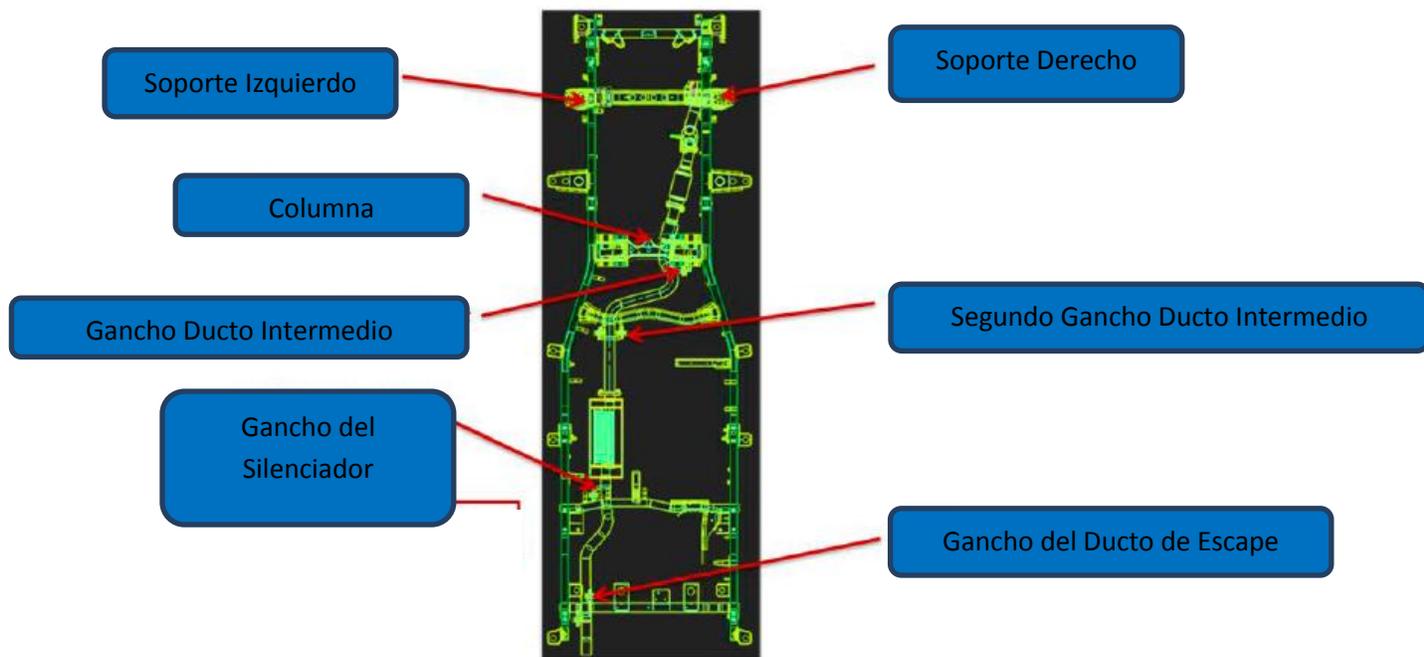
No.	Caso de Carga	Esfuerzo Von Mises [Mpa]
1	Posición estática	0
2	Par máximo del motor hacia adelante	73.2
3	Par máximo del motor hacia atrás	43.9
4	Par máximo y aceleración del motor hacia adelante	90.2
5	Par máximo del motor hacia adelante y vuelta hacia la izquierda	75.8
6	Par máximo del motor hacia adelante y vuelta hacia la derecha	70.6
7	Par máximo del motor hacia adelante con bache	124
8	Par máximo del motor hacia adelante con tope	44.9
9	Par máximo y aceleración del motor hacia atrás	53
10	Carga vertical hacia arriba	137
11	Carga vertical hacia abajo	207
12	Carga lateral izquierda	129
13	Carga lateral derecha	102

## 2.5.5 Road Load Data Acquisition (Adquisición de datos de cargas del camino).

En muchos casos, el diseñador tiende a liberar sus diseños con estándares por arriba de las especificaciones debido a que en etapas tempranas del diseño no se cuenta con datos de cargas provocadas por el camino, las partes prototipo finalmente son montadas en vehículos prueba para efectuar cargas dinámicas que después se capturan para estudiar el diseño del sistema de escape con más detalle utilizando la adquisición de datos de cargas del camino (RLDA – Road Load Data Acquisition).

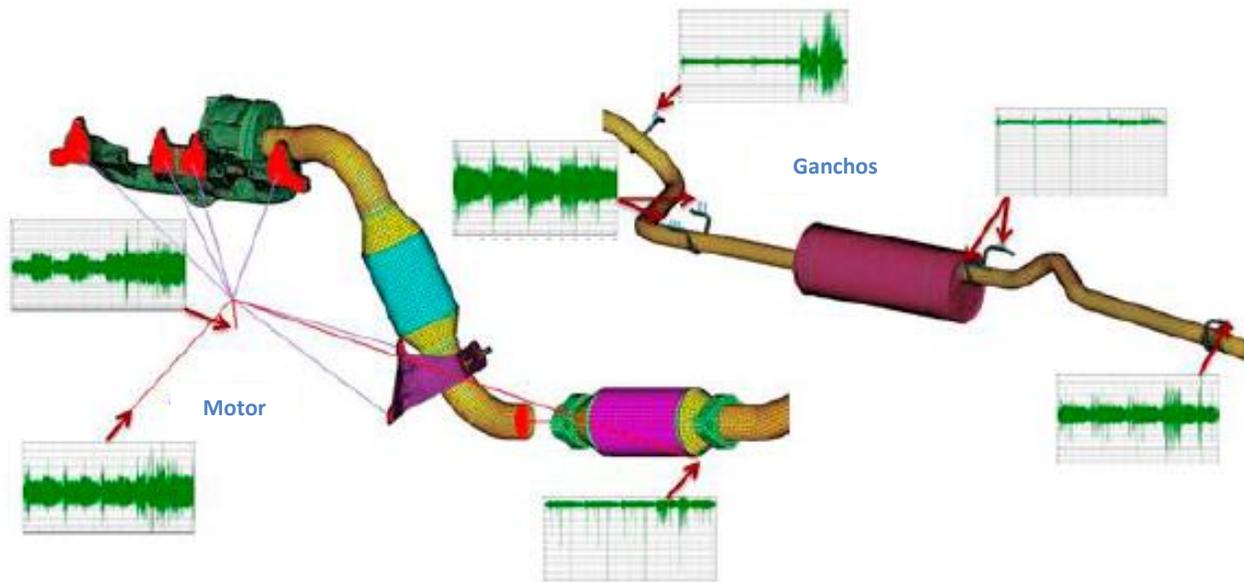
Esta adquisición se utiliza para capturar el historial de cargas mecánicas en eventos de manejo que son determinantes para la durabilidad del sistema de escape. Los movimientos y las deformaciones del chasis que son resultado de las irregularidades del camino, pasan al sistema de escape por medio de los aisladores de hule. Los movimientos del motor son transferidos por medio de conexiones fijas entre el bloque del motor y el múltiple de escape como resultado de efectos inerciales dentro del motor así como efectos de la aspereza del camino, en resumen, los movimientos de dicho motor y el chasis constituyen la carga mecánica, mientras que la diversidad de la superficie del camino y diferentes estilos de manejo derivan en historiales de cargas mecánicas multi-axiales.

Todos los datos que se adquieren mediante sensores de desplazamiento (acelerómetros) y medidores de deformación se disponen para caracterizar las cargas mecánicas actuantes en el sistema de escape en diferentes puntos del sistema de escape como se ve en la Fig. 18.



**Fig. 18. Localización de los acelerómetros para RLDA (Arunpreya, K, 2012).**

Muchos de los datos obtenidos en el RLDA son filtrados para limpiar posibles inconsistencias y después calcular factores de escala para cada canal individual de los sensores y realizar cálculos de fatiga y reproducir señales como se muestra en la Fig.19. Después de que los datos son filtrados se utilizan para someter el modelo de elemento finito del sistema para determinar la respuesta dinámica de la estructura bajo la acción de cargas dependientes del tiempo.



**Fig. 19. Señales de entrada de aceleración en los puntos clave del sistema de escape (Arunpreya, K, 2012).**

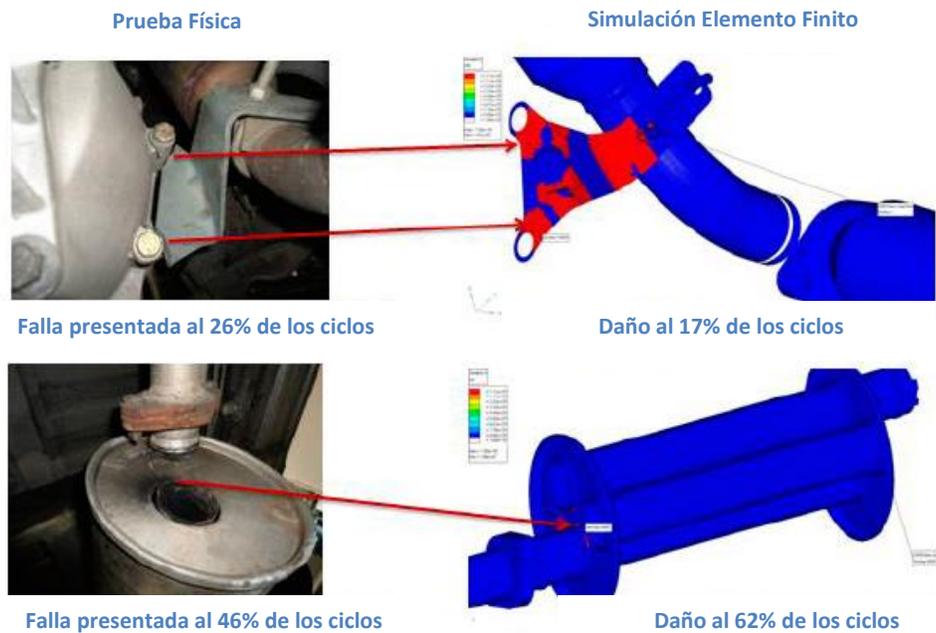
## 2.5.6 Análisis de fatiga.

La base de todo análisis de fatiga es la respuesta de los componentes a los esfuerzos o deformaciones debido a las cargas aplicadas. En el dominio del tiempo esto se expresa como una señal de tiempo. La fatiga ocurre a través de ciclos de esfuerzo.

El aspecto más importante de estas pruebas son los rangos de esfuerzos en los ciclos y los resultados de efecto secundario del esfuerzo principal de los ciclos. Cada ciclo induce una cierta cantidad de daño por fatiga. El daño total causado por la señal temporal es obtenido sumando el daño de cada ciclo individual. El daño causado por cada ciclo es calculado con referencia en la curva fatiga – vida. Dicha curva muestra el número de ciclos de la falla, para un rango de esfuerzos dado.

## 2.5.7 Pruebas de correlación.

Generalmente, estas pruebas son las últimas en realizarse, en estas se busca la correlación entre las simulaciones del método de elemento finito con los puntos de falla obtenidos en los análisis de fatiga y en pruebas de durabilidad. De esta manera se da la confiabilidad que el diseño prototipo podrá cumplir con las especificaciones y ser un producto útil, en la Fig. 20, se muestra un ejemplo.



**Fig. 20. Correlación entre pruebas físicas y el método de elemento finito (Arunpreya, K, 2012).**

En la figura anterior se observa la comparación entre los resultados de las simulaciones numéricas de elemento finito y las fallas encontradas en el banco de pruebas en el análisis de fatiga con piezas prototipo. Las cargas para producir la fatiga son fuerzas axiales y pares de fuerzas dependiendo de la localización de los componentes y la fuente que emite las cargas. El porcentaje mostrado de los ciclos en el que las piezas fallan son similares por lo que las simulaciones son aproximaciones válidas y de menor costo, sin embargo, debido a la experiencia, siempre se ha tenido mayor confiabilidad de las pruebas físicas.

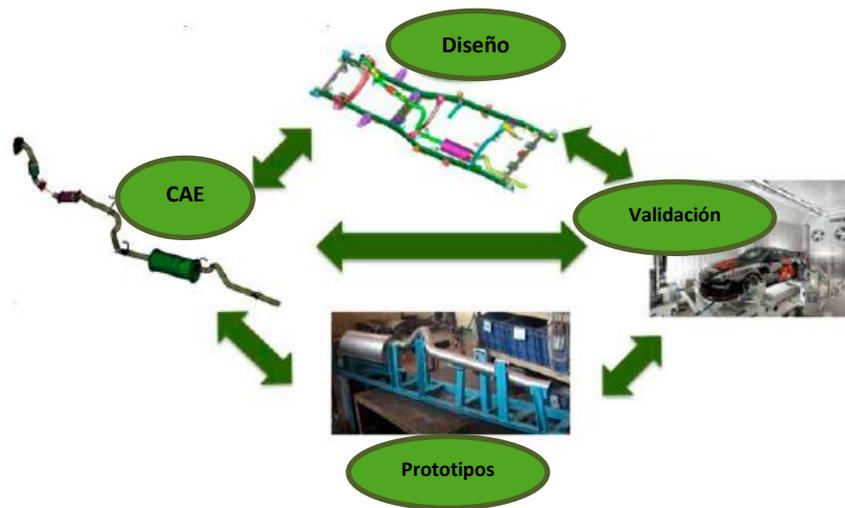
## Capítulo 3. Metodología, validación y análisis de cálculos.

Como se pudo observar en el capítulo anterior, un sistema de escape moderno consta de varias componentes como el múltiple de escape, el acoplamiento flexible o también llamado ducto flexible, el convertidor catalítico, ductos intermedios y el silenciador. Todas estas están integradas y sirven para cumplir requerimientos funcionales tales como disminuir el ruido causado por la alta presión de los gases que salen del motor, reducir y oxidar los gases tóxicos.

El proceso de diseño de sistemas de escape se generaliza en las siguientes etapas:

- Ingenieros de diseño, con base en especificaciones señaladas por el equipo de tecnología o ventas conceptualiza y evalúa las diferentes ideas haciendo que los sistemas de escapes puedan convertirse en un producto tangible en un acercamiento sistemático.
- El equipo de CAE (Ingeniería Añadida por Computadora) evalúa los conceptos a través de simulaciones numéricas.
- Dependiendo de los resultados de las validaciones numéricas, se elige uno de los conceptos para proceder a la construcción de prototipos.
- Las partes prototipo son sometidas a pruebas físicas para ser validadas y correlacionadas con las simulaciones asegurándose que el diseño cumple con los requerimientos establecidos.

Una vez que las partes cumplan con los criterios de prueba, estarán listas para llevarse a línea de producción. Si la parte llegará a fallar, los equipos de diseño necesitan realizar iteraciones en el proceso de la Fig. 21, hasta que el diseño quede completamente terminado.



**Fig. 21. Proceso de diseño de sistemas de escape (Arunpreya, K, 2012).**

### 3.1 Diseño.

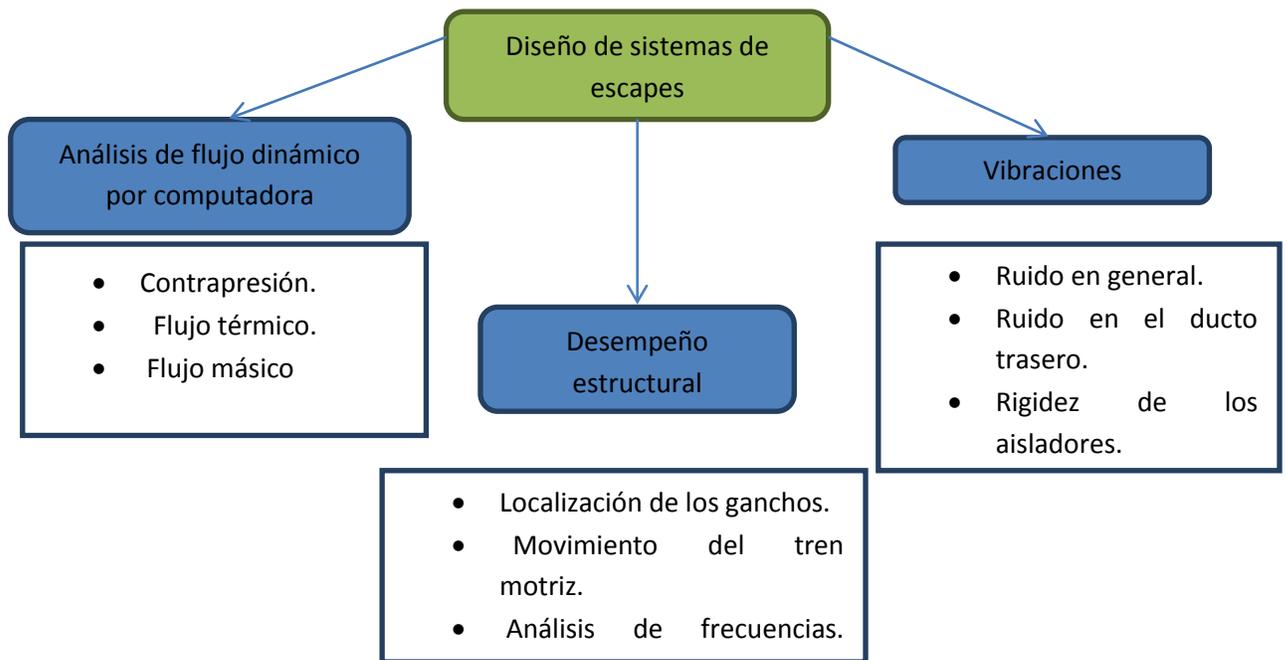
El área de ingeniería de diseño estableció las especificaciones que debe de cumplir cada componente que forma parte del vehículo en cuanto a dimensiones, materiales y funcionalidad. Los ingenieros de diseño de sistemas de escape siguen reglas de diseño, procedimientos establecidos de la empresa, múltiples pruebas y también buscamos cumplir con normativas de seguridad y ambientales principalmente.

Esta área sigue teniendo participación activa, aun cuando el producto ya se encuentre en producción, debido a que el vehículo es mejorado con el tiempo disminuyendo peso y reduciendo costos.

### 3.2 CAE.

Esta área se destaca debido a que su tarea es entregar el producto a nuevo nivel de excelencia. Los cálculos de flujo y vibraciones son la base para llegar a esta excelencia en la Fig. 22 se muestran los diferentes análisis que se realizan.

El ruteo de un sistema de escape es diseñado con base en los estudios de las caídas de presión, la restricción del flujo y empaquetamiento. Las vibraciones características del motor y las vibraciones producidas por el camino, que son transmitidas a las llantas; se consideran valores de entrada para el diseño de la junta flexible o tubo flexible, de la rigidez de los aisladores y la posición de los ganchos en todo el sistema de escape.



**Fig. 22. Análisis presentes de sistemas de escape.**

### 3.3 Validación de durabilidad.

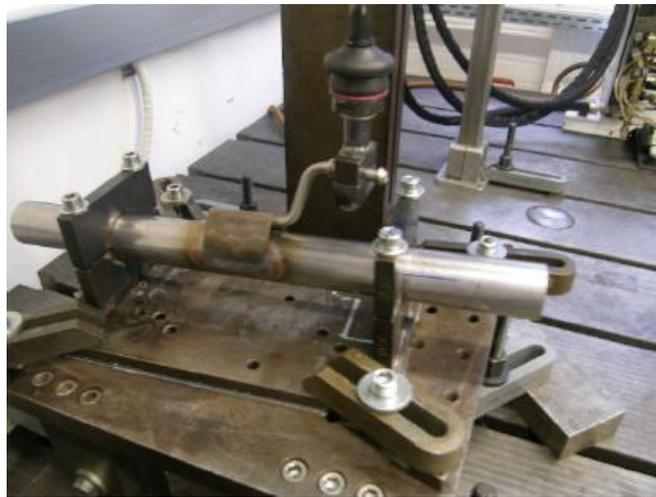
Los resultados de la prueba estática en la simulación numérica mostraron que ninguno de los componentes del sistema de escape fallaría debido a que los márgenes se encuentran por encima del objetivo de dichos componentes asegurando que el ducto intermedio soportará cargas de 5G en la dirección x positiva, y positiva y z negativa, sin comprometer el desempeño del sistema, ver Tabla 3.

**Tabla 3. Resultados del análisis estático.**

Criterio 5G (X,Y,-Z)	
Componentes	Resultado vs Objetivo
Ducto intermedio	24.84%
Soporte del ducto intermedio	45.88%
Ducto trasero del resonador	53.39%
Ducto frontal del resonador	85.71%
Soporte del ducto de salida del silenciador	66.36%

El margen más alto lo tuvo el ducto frontal del resonador con 85.71% por arriba del objetivo por lo que se puede decir que este componente se decidió ser validado sin ser sometido a pruebas físicas, sin embargo el ducto intermedio obtuvo un margen del 24.84% lo cual derivó en ser elegido para ser sometido a pruebas físicas mediante RLDA para ser validado.

La validación del ducto intermedio se realizó mediante el uso de los parámetros RLDA que se obtuvieron de los modelos anteriores del vehículo como se muestra en la Fig. 23, con una pieza “piloto”. En esta imagen se muestra una parte del ducto intermedio donde se localiza un soporte y gancho sometido a una carga axial hasta llegar a la fatiga para caracterizar su comportamiento.

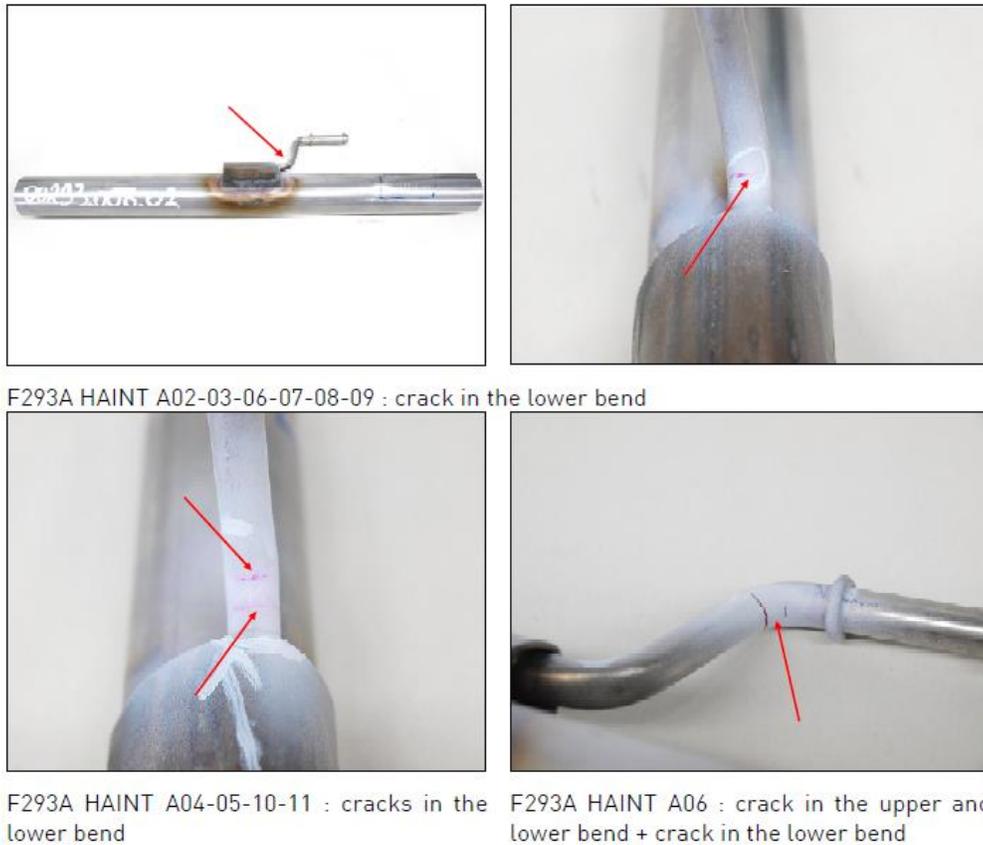


**Fig. 23. Validación del soporte del ducto intermedio mediante RLDA.**

Estas pruebas sirvieron para poder correlacionar las posibles fallas debidas a fuerzas axiales en los componentes mediante simulaciones numéricas y piezas piloto manufacturadas para proseguir con la producción en línea de prototipos, algunos resultados de las pruebas de la pieza piloto se muestran en la siguiente Tabla. 4 e imágenes (Fig. 24- 27).

**Tabla 4. Resultados de las pruebas RLDA.**

RLDA – Fuerzas Axiales	
Componentes	Resultado vs Objetivo
Ducto trasero del silenciador	3.60%
Gancho del ducto intermedio	4.40%
Ducto de salida interno	50%
Soporte y gancho del silenciador	195.60%
Soporte y gancho del ducto trasero	332.40%



**Fig. 24. Falla en el gancho del ducto intermedio.**

Como se puede apreciar en la Fig. 24, la falla se presenta en el doblar del gancho. El valor que se obtuvo fue de 4.40% N por arriba del objetivo con lo cual se puede determinar que el componente cumple con los requerimientos funcionales.



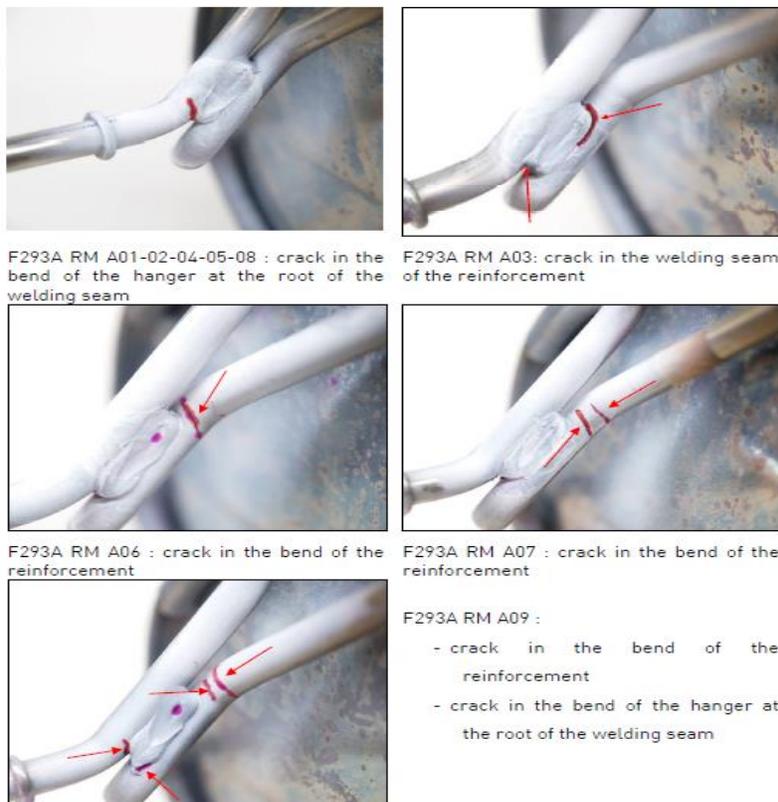
**Fig. 25. Falla en el gancho del ducto trasero.**

De la misma manera que en el gancho del ducto intermedio, se observó que la fractura se encuentra en el doblar del gancho y adicionalmente en la zona corrugada que tiene contacto con el aislador de hule, sin embargo la falla ocurrió con un margen del 332.40% por arriba del objetivo.



**Fig. 26. Falla en el ducto de salida interno.**

En este caso la fractura se encontró en la parte interna del ducto de salida del resonador con un margen del 50% por arriba del objetivo, lo cual indica que aún en una condición crítica el componente soportará como límite, cargas 50% más grandes que el objetivo funcionando correctamente.



**Fig. 27. Falla en el gancho del silenciador.**

Como se muestra en la figura anterior, es de suma importancia someter a diferentes pruebas las uniones soldadas ya que son zonas consideradas críticas en muchas aplicaciones ingenieriles, esta unión cumplió el objetivo con un margen de 195.60% por lo tanto se concluyó que cumple con los requerimientos.

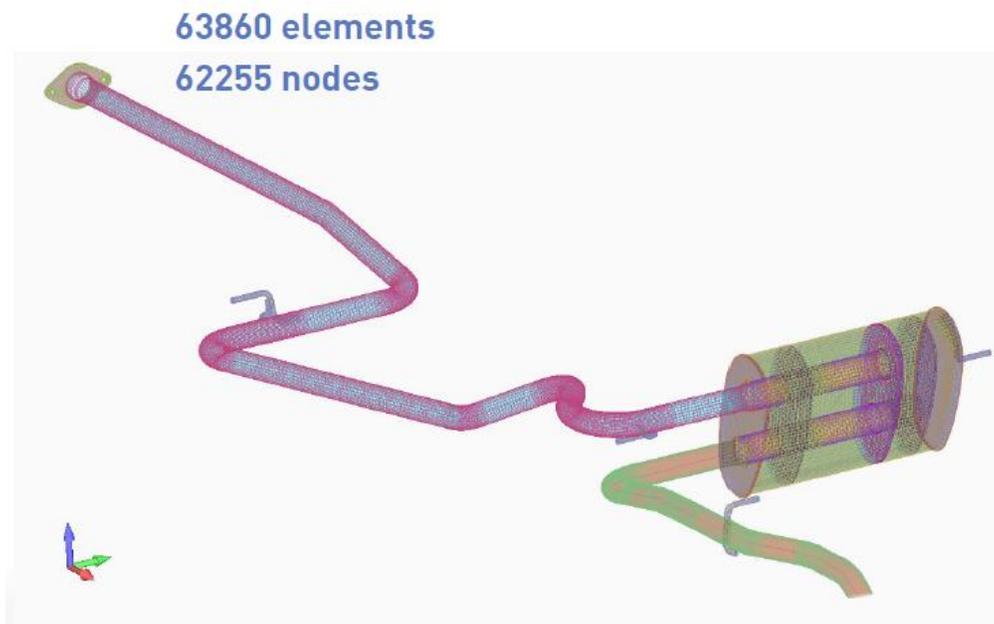
Al determinar que estos componentes pasaron las pruebas RLDA con un margen por arriba del objetivo, se validó que el sistema de escape prototipo cumplía con las normas, reglas de diseño y objetivos de la empresa, dando como siguiente paso, la construcción de los escapes prototipo.

Durante la etapa de las pruebas en un escape piloto se fungió como mediador entre el proveedor y el área de CAE para elegir los componentes a los cuales se les sometería al estudio considerando principalmente el historial de calidad del proveedor de sistemas de escape. Se tomó la decisión de optimizar tiempo y costos de análisis al someter los componentes directamente al banco de pruebas sin ser previamente analizados mediante simulaciones numéricas.

### 3.4 Validación de temperaturas.

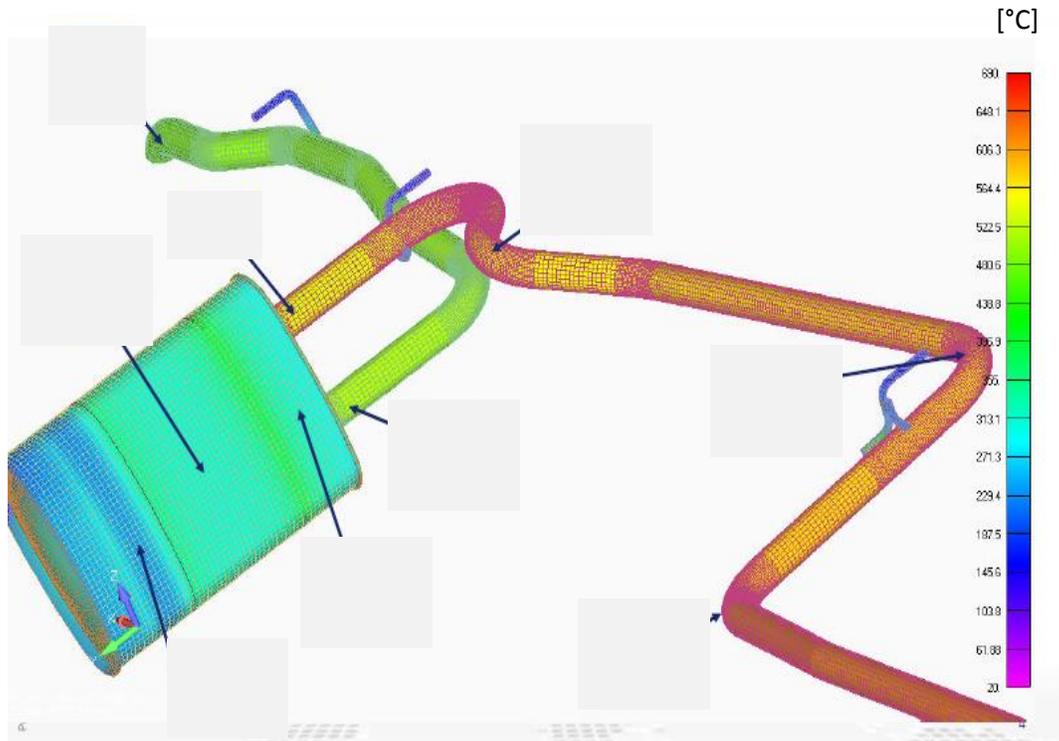
Las temperaturas críticas que alcanzan los componentes fueron determinadas por el equipo de CAE y proveedores, estas fueron utilizadas para poder realizar los cálculos aproximados de la expansión térmica y los esfuerzos térmicos. Las temperaturas oficiales no son mostradas por confidencialidad.

El software que se utilizó para la simulación numérica fue Abaqus 6.12.4



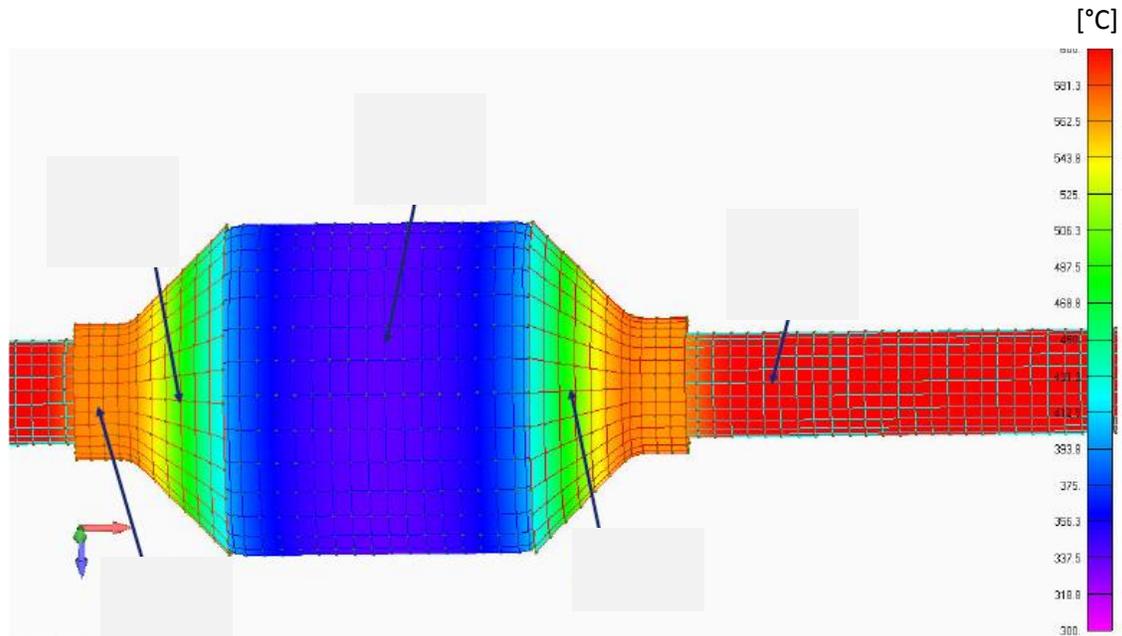
**Fig. 28. Número de elementos y nodos utilizados en la simulación.**

En la figura anterior se muestran el número de elementos y nodos utilizados en el mallado.



**Fig. 29. Distribución de temperaturas en el ducto trasero, intermedio y silenciador.**

Las temperaturas más altas se encontraron en los dobleces del ducto intermedio seguido por el ducto trasero, las temperaturas mínimas se encontraron en la superficie del silenciador.



**Fig. 30. Distribución de temperaturas en el convertidor catalítico.**

Las temperaturas en el convertidor catalítico demuestran un aumento a la salida del mismo, principalmente porque el convertidor catalítico es una obstrucción al paso del flujo de los gases, en la zona donde se encuentra el panel con los materiales catalizadores la temperatura fue menor.

De manera general, los componentes del sistema se encontraron dentro de los márgenes propuestos por los requerimientos de ingeniería así que se validó por cumplir con los objetivos esperados, por lo tanto no fue necesario un cambio de material pero si el uso de escudos térmicos tanto en el convertidor catalítico debido a que se encuentra debajo de la cabina de los pasajeros y en el ducto trasero que se encuentra debajo de la llanta de refacción, en ambos casos se requirió una protección contra las temperaturas que alcanzaron dichos componentes.

## 3.5 Cálculos de primera aproximación.

### 3.5.1 Elongación y esfuerzos térmicos

Para tener una primera aproximación analítica del efecto que causaría la temperatura sobre los escudos térmicos soldados al sistema de escape y la elongación total del mismo, se solicitó realizar los cálculos de los esfuerzos térmicos a los cuales sería sometido el sistema de escape debido a las temperaturas a las que trabajará.

La expansión térmica uniaxial del sistema de escape se calculó con la siguiente fórmula:

$$\Delta L = \alpha L_0 \Delta T$$

Donde:

$\alpha$  – Coeficiente de expansión térmico lineal [**m/m · °C**]

$L_0$  – Longitud inicial del componente del sistema de escape [**m**]

$\Delta T$  - Cambio de temperatura de los componentes [**°C**]

La temperatura ambiente se consideró de 21 [°C], se midieron las longitudes de los componentes a analizar, los cuales fueron: el convertidor catalítico, el ducto de escape y sus respectivos escudos térmicos. Los coeficientes de expansión térmica corresponden a los materiales de las piezas prototipo.

A continuación se muestra un ejemplo de cálculo:

En el convertidor la temperatura promedio de la superficie es: 464 [°C]

La longitud inicial del convertidor catalítico es: 0.8677 [m]

El coeficiente de expansión térmico es: 11.6 E-06 [m/m · °C]

El cambio de longitud del convertidor catalítico es:

$$\Delta L = \alpha L_0 (T_H - 21^\circ C)$$

$$\Delta L = (0.8677 \text{ [m]}) \cdot (11.6 \text{ E-06 [m/m} \cdot \text{°C]}) \cdot (464^\circ C - 21^\circ C) = 0.0044 \text{ m} = 4.4 \text{ mm}$$

Los esfuerzos térmicos se calcularon con base en el valor del módulo de elasticidad de los materiales de los que están hechos los componentes a las temperaturas en las que se encontrará a las condiciones críticas mencionadas anteriormente.

Se utilizó la ley de Hooke:

$$\sigma = E \varepsilon$$

Se consideró el cambio de las propiedades mecánicas de los materiales debido al incremento de temperaturas del material, por lo que se obtuvieron los módulos de elasticidad de los materiales a distintas temperaturas.

$$\sigma = E_T \left( \frac{\Delta L}{L_0} \right)$$

Por ejemplo, el esfuerzo presente en el convertidor catalítico es:

$$E_{464^{\circ}C} = 138 \text{ [MPa]}$$

$$\left(\frac{\Delta L}{L_0}\right) = 0.00507$$

$$\sigma = 138 \text{ [MPa]}(0.00507) = 0.7 \text{ [MPa]}$$

A continuación se muestran los cálculos de los esfuerzos térmicos para el catalizador, ducto de escape y sus respectivos escudos térmicos.

**Tabla 5. Cálculo aproximado de esfuerzos térmicos.**

Material convertidor catalítico : 439ss				E [Pa] (464°C)	Material escudo del convertidor : 441ss				E [Pa] (464°C)
a [m/m°C]	1.16E-05			1.38E+08	a [m/m°C]	1.08E-05			2.61E+08
L <sub>0</sub> Catalizador [m]	Tc [°C]	ΔL [m]	ε	σ = εE	L <sub>0</sub> Escudo [m]	Tc [°C]	ΔL [m]	ε	σ = εE
0.8677	464	0.00446	0.005138	7.09E+05	0.25	464	0.001196	0.004784	1.25E+06
Material ducto trasero : 409ss				E [Pa] (449°C)	Material escudo trasero : 441ss				E [Pa] (449°C)
a [m/m°C]	1.19E-05			1.36E+08	a [m/m°C]	1.08E-05			2.61E+08
L <sub>0</sub> Ducto trasero [m]	Tc [°C]	ΔL [m]	ε	σ = εE	L <sub>0</sub> Escudo [m]	Tc [°C]	ΔL [m]	ε	σ = εE
0.969	449	0.004935	0.005093	6.93E+05	0.33	449	0.001525	0.004622	1.21E+06

El uso de los resultados aproximados de los esfuerzos térmicos sistema quedó como referencia para una siguiente etapa aún en proceso después de la construcción de vehículos prototipo, por lo que la finalidad de mostrar dichos cálculos es meramente ilustrativa de los métodos analíticos sencillos que se utilizan para resolver un problema.

**Tabla 6. Cálculo aproximado de la elongación del sistema de escape.**

Componente	Material	α [m/(m·°C)]	Lo [m]	T [°C]	ΔL [mm]
Silenciador	409ss	1.19E-05	0.5216	475	2.82
Resonador	439ss	1.16E-05	0.501	475	2.64
Catalizador	439ss	1.16E-05	0.8677	464	4.46
Ducto Trasero	409ss	1.19E-05	0.969	449	4.93
Crecimiento Total					14.85

# Conclusiones.

La validación que se realizó mediante correlación con datos RLDA saltando la validación mediante simulación por computadora tuvo como finalidad el ahorro de costos y tiempo, debido a que el diseño aquí presentado es derivado del sistema de escape de un modelo anterior el cual ya había sido validado para otro tren motriz y dimensiones, este tipo de situaciones son un ejemplo de las decisiones que se toman para dirigir el proceso de diseño. Como se observó en los resultados de las simulaciones y pruebas físicas, la resistencia de cada una de los componentes excedió su resistencia por un margen amplio, de manera que a pesar de cualquier incertidumbre debido a condiciones de uso o manufactura, la falla no sea frecuente.

La distribución de temperaturas a lo largo del escape mostrada, sirvió como referencia para decidir las zonas a proteger con los escudos térmicos y para realizar una primera aproximación de la elongación y esfuerzos térmicos presentes en el sistema. Como se mencionó anteriormente la finalidad de dichos cálculos está fuera del alcance de este informe debido a que se evaluarán y utilizarán para la mejora del producto en un futuro.

La elongación del sistema de escape producida por la distribución de temperaturas se absorbe con las propiedades de los soportes de caucho y otra parte por el ducto flexible por lo tanto se comprobó que la elongación del sistema no afectaría la funcionalidad del sistema de escape.

Por otra parte fue fundamental conocer el proceso de manufactura del proveedor para ubicar posibles reducciones de costo, prever si es posible manufacturar el diseño propuesto y lo más importante; contemplar los tiempos aproximados que toma el realizar la construcción de una parte prototipo, ya que de esta manera es posible planear anticipadamente cualquier cambio de diseño imprevisto que afecte la construcción de vehículos prototipo, debido a que esto entra dentro del índice de pérdidas de capital para la empresa.

Durante el diseño del sistema de escape, fue fundamental realizar trabajo en equipo, ya que muchos de los datos que se utilizaron para validar el diseño de los prototipos fueron generados bajo una metodología y disciplina de trabajo constante y comprometido para entregar un producto.

Ford Motor Company© es una empresa que ha permitido tener un aprendizaje acelerado en el área en la que me encuentro he podido interactuar con diferentes equipos e ingenieros de todo el mundo y también, lo más importante; conocer los procesos de manufactura tanto de Ford como de sus proveedores de sistemas de escape. Cada diseño debe seguir un estricto proceso de validación de acuerdo a los estándares y reglas de diseño de Ford, ya que la satisfacción e incluso la seguridad de las personas depende de decisiones que recaen completamente en el ingeniero de diseño (siguiendo

los cuatro pilares), lo cual me ha hecho consciente de la responsabilidad y compromiso que debo tener al tomar decisiones.

Actualmente los sistemas de escape prototipos requirieron una serie de re diseños donde se reforzaron los soportes y ganchos, ya que debido al largo trayecto que recorren desde las instalaciones del proveedor hasta las localidades Ford donde se está realizando la construcción de los vehículos prototipo, los ganchos y soportes se encontraban dañados o con defectos de manufactura lo cual provoco ciertos problemas al momento de ensamble.

## Bibliografía:

- [1] Arbuckle, I. Optimization Strategies Applied to Exhaust System Design. SAE Papers, 2002.
- [2] Arunpreya, K. A Finite Element Methodology to Design and Validate the Performance of an Automotive Exhaust System. SAE Papers, 2012.
- [3] Eriksson L.J. Theory and Practice in Exhaust System Design, SAE Papers, 1985.
- [4] Ghasemi, Amir. CAE Dynamic Durability Simulation of Exhaust System. SAE International, 2013.
- [5] Jawad, Badih. Exhaust System Design for a Four Cylinder Engine. SAE Papers, 2002.
- [6] Pang, Jian. Attribute Analysis and Criteria for Automotive Exhaust Systems, SAE Papers, 2003.
- [7] Suggs, Jennifer. Disassembly of Small Engine Catalytic Converters and Analysis of Washcoat Material for Platinum Group Metals by X-Ray Fluorescence Spectrometry, SAE Papers, 2014.
- [8] Yuki Aoki. Development of Double – Layered Three-Way Catalysts, SAE Papers, 2009.

## Mesografía:

- 1) [https://en.wikipedia.org/wiki/Cuautitl%C3%A1n\\_Assembly](https://en.wikipedia.org/wiki/Cuautitl%C3%A1n_Assembly) - 19/06/16
- 2) <http://www.ford.mx/acerca/compania> - 19/06/16
- 3) <http://www.biografiasyvidas.com/monografia/ford/fotos4.htm> - 19/06/16
- 4) <http://social.ford.es/ford-111-an%CC%83os-de-juventud/> - 19/06/16
- 5) [https://en.wikipedia.org/wiki/Ford\\_Model\\_T\\_engine](https://en.wikipedia.org/wiki/Ford_Model_T_engine) - 19/06/16