



REPORTE DE EXPERIENCIA PROFESIONAL EN FORD MOTOR COMPANY DE MÉXICO

MODALIDAD DE TITULACIÓN:

“EXPERIENCIA PROFESIONAL”

NOMBRE DEL ALUMNO: **Jonathan Garza Bennet**

NÚMERO DE CUENTA: **306752603**

CARRERA: **Ingeniería Mecánica**

ASESOR: **Dr. Jesús Manuel Dorador González**

AÑO: **2013**

Facultad de Ingeniería
División de Ingeniería Mecánica e Industrial

Nombre de la empresa: **Ford Motor Company**

Título: **Reporte de Experiencia Profesional en Ford Motor Company de México**

Índice

Índice	2
Introducción	3
Capítulo 1: Historia de Ford de México	5
Capítulo 2: Ingeniero de Calibración, Roles y Responsabilidades.....	11
Capítulo 3: Revisión Teórica del Funcionamiento de los Instrumentos de Medición empleados en un Vehículo de Pruebas	13
Capítulo 4: Instrumentación de Vehículo de pruebas	21
Capítulo 5: Adquisición y análisis de datos de instrumentación durante una prueba de emisiones ciclo europeo en dinamómetro	29
Capítulo 6: Regulación Mexicana de Emisiones de Escape y Ciclo de Prueba Tipo Europeo para Certificación.....	44
Capítulo 7: Control de Emisiones de Escape en Vehículos con Motor de Combustión Interna.....	49
Capítulo 8: Calibración para maximizar la eficiencia del convertidor catalítico con el fin de certificar el auto para ser vendido en el mercado mexicano.....	53
Conclusiones.....	67
Bibliografía.....	68

Introducción

Ford Motor Company es una de las empresas que tiene más tiempo operando en México, iniciando sus actividades en 1925.

A lo largo de su historia, Ford Motor Company ha trabajado en territorio mexicano desarrollando actividades de ensamble de automóviles, maquinado de herramental para el estampado de lámina de acero, fundición de metales para fabricación de bloques y otros componentes del motor de combustión interna. Ford de México también ha realizado labores de desarrollo del producto, las cuales involucran diseño e ingeniería en diferentes ramas. Dichas actividades se han incrementado mucho en los últimos años, teniendo como consecuencia un gran crecimiento año con año en el área de desarrollo del producto, lo que demuestra que el trabajo de los ingenieros mexicanos, ha sido satisfactorio para la empresa y por lo tanto la misma está invirtiendo cada vez más capital para actividades de ingeniería en México.

Como muestra de la calidad de ingeniería de desarrollo que se lleva a cabo en Ford de México, en este trabajo se exponen las tareas realizadas durante la estancia en el área de desarrollo del producto de Ford de México, específicamente en el área de calibración del tren motriz.

El área de calibración, se encarga de asegurar la integración y el correcto funcionamiento de todos los componentes que interactúan con el tren motriz del automóvil. Entiéndase como Tren motriz el conjunto de dispositivos que le otorgan movimiento al vehículo (motor y todos sus componentes). Lo anterior se logra conociendo a detalle el funcionamiento de todos los componentes que integran e interactúan con el tren motriz, sus sensores, transductores y la estrategia de control del motor.

Entre las actividades que desempeña el área de calibración dentro de desarrollo del producto se encuentran:

- Maximizar el desempeño del motor
- Lograr una manejabilidad que satisfaga al cliente (Lograr que el motor entregue el par demandado por el conductor)
- Asegurar la correcta operación del motor y otros componentes del tren motriz (mantener una combustión estable, evitar la pre-ignición, evitar vibraciones, ahorro de combustible, etc.)
- Control de emisiones de escape
- Garantizar la protección de los diferentes componentes del tren motriz
- Asegurar el correcto funcionamiento del sistema de auto diagnóstico (OBD II)
- Diagnosticar situaciones de falla apoyándose con el sistema de autodiagnóstico

Los objetivos concretos que se buscan lograr en este reporte como ingeniero de calibración son los siguientes:

- Instrumentar un vehículo de pruebas
- Verificar el correcto funcionamiento de los sensores instalados de producción
- Verificar la calibración de los modelos que infieren la temperatura del convertidor catalítico
- Ajustar la calibración para el control de emisiones de escape, con el objetivo de cumplir con las regulaciones mexicanas de emisiones de escape, para vehículos con motor a gasolina

En este reporte se muestra la selección de instrumentos y la instrumentación de un vehículo de pruebas Fiesta 2014 con el fin de obtener datos de puntos clave de temperatura, presión, voltaje y de la relación aire-combustible, con los cuales se busca monitorear al vehículo para verificar que los sensores que se instalan de fábrica funcionan correctamente; para tomar datos sobre las condiciones de operación y para monitorear que los componentes se encuentren funcionando dentro de sus rangos de seguridad. Estos datos se usan cuando se desea tener una referencia al momento de realizar algún cambio en algún parámetro de la estrategia de control.

El siguiente tema que se trata en este reporte es el de las regulaciones que debe de cumplir un vehículo con el fin de obtener el permiso de venta en territorio mexicano. Dichos límites están establecidos en la NOM – 042 – SEMARNAT – 2003, y son exactamente los mismos que los que establece la Normativa Europea Etapa 4 (EURO IV). La norma oficial mexicana acepta para homologar los vehículos, certificados emitidos siguiendo los procedimientos establecidos por organizaciones certificadas mundialmente, por lo anterior, con el fin de homologar el nuevo Fiesta 2014, se sigue el ciclo europeo para medir emisiones contaminantes.

El ciclo consiste en un perfil de velocidades simulado por un dinamómetro de rodillo dividido en dos etapas, la primera busca imitar las condiciones de manejo que se tienen en ciudad (arranques de cero, paradas continuas debido a semáforos y tráfico, en las cuales se tienen cargas bajas) y la segunda, trata de imitar las condiciones de manejo en vías rápidas (velocidades altas sostenidas, aumentos y descensos en la velocidad, las cuales generan cargas más altas).

Durante el ciclo, se toman muestras de las emisiones de escape, las cuales se diluyen con aire ambiente en dos bolsas (una para cada etapa) con el objetivo de medir el total de emisiones contaminantes emitidas durante la prueba. Al mismo tiempo se toman muestras de los gases de salida del motor antes de ser procesados por el convertidor catalítico, con el fin de calcular la eficiencia de conversión de gases dañinos.

Para poder cumplir las regulaciones de emisiones, el sistema de escape cuenta con un convertidor catalítico, con el cual se reducen las emisiones de los gases más nocivos (CO, HC y NOx) por medio de una serie de reacciones químicas de oxidación y reducción. Para que el convertidor catalítico funcione de la forma más eficiente posible, el motor cuenta con un sistema de control de emisiones de escape, el cual consiste en un sistema que monitorea por medio de sensores que se mantenga una relación lo más cercana a la estequiométrica en los diferentes puntos de operación del automóvil, con lo cual se asegura una máxima eficiencia de conversión.

Con el fin de homologar el auto según lo establecido en la NOM – 042, se presenta el procedimiento de adquisición de datos con ayuda de la instrumentación instalada y con la que se cuenta en el laboratorio de emisiones, con el fin de desarrollar una calibración que garantice que el control de emisiones funcione correctamente. La necesidad de recalibrar el sistema de control surge de un cambio de convertidor catalítico entre el Fiesta 2014 para el mercado de Estados Unidos y el del mercado mexicano, debido a las diferentes regulaciones. El convertidor para el mercado mexicano contiene menos carga de metales catalizadores que el de Estados Unidos y los parámetros calibrados para él no hacen funcionar correctamente al control con el catalizador con menos carga, por lo que se tienen emisiones mayores a las permitidas durante el ciclo.

Con el trabajo de recalibración, se logró que el nuevo modelo cumpliera con las regulaciones establecidas para poder homologar y se presentan los datos antes y después del proceso, con lo que se puede apreciar la mejora de los resultados comparando la situación anterior con la actual.

Capítulo 1: Historia de Ford de México

Historia de Ford de México

Ford Motor Company es una de las compañías manufactureras más importantes del mundo, tanto en capital, como en personal y capacidad productiva.

Misión

Ford Motor Company es líder mundial en productos y servicios automotrices, y financieros. 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. [7]

Visión

"Una buena compañía ofrece excelentes productos y servicios, una gran empresa además, se preocupa por hacer nuestro mundo un mejor lugar donde vivir. [7]

William Clay Ford JR.

Ford Motor Company es un líder global en la industria automotriz con sede en Dearborn, Michigan; manufactura y distribuye automóviles en seis continentes. Con un total de 176,000 empleados y 80 plantas alrededor del mundo. La compañía posee actualmente las marcas Ford y Lincoln. Hoy en día, Ford de México emplea a más de 5,800 personas en todos sus centros de manufactura los cuales son, la Planta de Estampado y ensamble de Hermosillo, Engines I y II de Chihuahua, la Planta de Estampado y Ensamble de Cuautitlán y en sus Oficinas Generales de Santa Fe en la Ciudad de México. Ford produce en México el Ford Fusion, Lincoln MKZ, Ford Fiesta, el motor Duratec I-4 (2.0 y 2.5L) y el motor PowerStroke Diesel 6.7L V-8. La Planta de Motores II en Chihuahua es la primera planta de motores diesel de Ford en Norteamérica. [6]

Inicio de Ford

Armado con grandes ideas y un pequeño capital, un hombre llamado Henry Ford se decidió a poner el automóvil al alcance de todos. [8]

Ford Motor Company, que nació como una idea en la mente de Henry Ford al finalizar el siglo pasado, hoy es una de las compañías manufactureras más importantes del mundo, tanto en capital, como en personal y capacidad productiva. La empresa fue fundada el 16 de Junio de 1903 en la Ciudad de Detroit, Michigan con 12 accionistas y un capital total de 28,000 Dólares. En 1908, Ford Motor Company dio al mundo el primer automóvil a bajo precio: El Modelo "T". Cinco años más tarde Henry Ford introdujo la primera línea de ensamble móvil, lo que para el mundo significó el inicio de la producción en serie. Hoy día, Ford Motor Company cuenta con subsidiarias situadas en 36 países del mundo. [8]

Llegada de Ford a México

Enfocando sus metas a una expansión y apertura de nuevos mercados, Ford Motor Company estableció su Planta de Ensamble en la Ciudad de México en 1925. Aquellas actividades iniciales se desarrollaron con un total de 295 empleados, en una bodega rentada en el Barrio de San

Lázaro; allí se ensambló por primera vez en México el Modelo "T". En 1932, se compró un terreno situado en la Calzada de Guadalupe y la Avenida Henry Ford, en donde se edificó la Planta de Ensamble de Automóviles que vino a substituir las instalaciones de San Lázaro. Esta Planta, conocida como Planta de la Villa, se constituyó en pilar de las operaciones y desarrollo de Ford Motor Company hasta 1983, año en que fueron transferidas sus operaciones al área de Cuautitlán. [8]

El constante desarrollo de las operaciones en México, impulsó a Ford Motor Company a realizar una considerable expansión de sus instalaciones. Por ello, adquirió extensos terrenos en Cuautitlán y una Planta en Tlalnepantla. En Tlalnepantla, las instalaciones fueron remodeladas para dedicarlas a la fabricación de herramental para el ensamblado de vehículos. Hay que considerar, para juzgar la importancia de esta operación, que dicho herramental se adquiría anteriormente a elevado precio en los Estados Unidos. Esta planta fue inaugurada el 28 de Septiembre de 1962, y desde aquel entonces ha generado un ingreso considerable en dólares, por concepto de ventas al exterior de herramental de ensamble de vehículos. Los decretos del gobierno mexicano para manufacturar en el país un alto porcentaje de automóviles y camiones, ocasionaron que en 1964 se inaugurara un complejo en Cuautitlán con las siguientes instalaciones: Planta de Fundición, Planta de Maquinado y Ensamble de Motores. Más tarde, en 1970, iniciaba operaciones la Planta de Ensamble de Camiones, dentro del complejo Cuautitlán. [8]

En 1980, se inauguró la Planta de Ensamble de autos dentro del área de Cuautitlán, en la que hoy día se ensambla el Ford Fiesta, en donde además, se encuentra una de las más modernas Plantas de Pintura. En 1983, Ford Motor Company de México, respondiendo a las necesidades y expectativas del país, inauguró en la Ciudad de Chihuahua una Planta de Motores de 4 cilindros para exportación. Las operaciones de la planta de la villa, fueron transferidas al área de Cuautitlán a fines de 1985. Los retos no terminaron para Ford Motor Company. En 1986 se inauguró, en la Ciudad de Hermosillo, Sonora, la Planta de Estampado y Ensamble de vehículos de exportación más moderna en su género. [8]

Ford en la Actualidad

Actualmente, Ford trabaja basándose en la estrategia mundial "ONE FORD" que implica una reorientación importante de la marca en su estrategia de producción, enfocándose en vehículos que los consumidores realmente aprecian. Dicha estrategia integra entre otras medidas importantes:

La transformación de algunas plantas para producir automóviles compactos de nueva generación, como es el caso de Cuautitlán, la producción de vehículos bajo plataformas globales, un enfoque estratégico y dedicado para Ford y Lincoln, fuerte énfasis en aspectos de tecnología y conectividad como Ford SYNC, además de la transformación en su operación de manufactura, a través de las inversiones consolidadas y asignación de nuevos vehículos, Ford de México sigue fortaleciendo también las áreas de ingeniería y compras. [5]

Ford de México continúa fomentando el desarrollo de la cadena productiva de México, estableciendo una organización de ingeniería, la cual está participando en diversos proyectos para la corporación en todo el mundo, a través de diferentes componentes. [5]

Ford de México a través del tiempo

1920s

Los primeros camiones que circularon en México en 1922 fueron de la marca Ford, llamados coloquialmente "fotingos". Con un precio de \$750 se adquiría el esqueleto y el parabrisas, agregando después la carrocería de madera, un tablón sobre el chasis, una banca, cortinas de lona y la banqueta para pasajeros. [5]

En 1924, Adrián Lajous convence a Edsel Ford de abrir una planta en la Ciudad de México y al Presidente Plutarco Elías Calles de las ventajas para el país de la inversión de Ford. Dada la confianza de la familia Ford en el Ing. Adrián Lajous, él fue el único presidente de Ford Motor Company que se desempeñó en su puesto hasta su inesperada muerte en 1941. [5]

El 26 de agosto de 1926 se inaugura la planta de montaje y acabado de automóviles, situada en Balbuena en San Lázaro con una capacidad de producción de 25 autos diarios Modelo T. Los 260 obreros de la planta Ford eran mexicanos. [5]

1930s

Dada la gran confianza en el desarrollo del país, el 14 de septiembre de 1932 se inaugura la nueva planta automotriz de Ford frente a la calzada de Guadalupe y la recién llamada Avenida Henry Ford "Planta de la Villa" con un diseño fabril desarrollado por el famoso arquitecto estadounidense Albert Kahn para adecuarse al sistema de producción en serie. [5]

1940s

En 1949 Ford anunció la formación de Ford International Company con la finalidad de atender las necesidades y operaciones de las sucursales asociadas a Ford Motor Company alrededor del Mundo. [9] En el mes de mayo de 1949, el director de Ford Motor Company de México, Fraine B. Rhuberry anunció una inversión de 14 millones de pesos para incrementar un 50 por ciento la capacidad instalada de la empresa. [5]

1950s

En 1950 Ford continuó con su crecimiento el cual se aceleró debido a la estabilidad económica y a las reformas de ley que se presentaron en México.[9] Ford aumentó el capital social y aprobó una ampliación de 11,400 metros cuadrados al edificio de la planta de la Villa para refacciones, accesorios y ensamble.[5] Durante los 50's Ford produjo 59 mil automóviles y 68 mil camiones. [9]

1960s

En 1962, Ford compra la planta de Studebaker Packard de México, ubicada en Tlalnepantla, con el objetivo de producir herramientas de ensamble para el mercado nacional y exportar a otras plantas de Ford en el mundo. [5]

En los años 60's Ford estrenó sus oficinas ubicadas en Reforma #333 y adquirió un terreno en Cuautitlán en donde se construyó la nueva planta de Ford, la cual en una primera instancia solamente produjo motores. Sin embargo, a finales de los 60's se decidió que la planta de Cuautitlán se dedicara únicamente a la fabricación de camiones. [9]

1970s

Ford inició en la década de los 70's la producción de su vehículo 500 mil y en abril del mismo año se produjo el Mustang número 25 000 en la planta de la villa. En el año de 1975, en la planta de Cuautitlán se presentó el automóvil 725 000; un Galaxie de 2 puertas. [9] Comienza la producción de camiones en el complejo industrial de Cuautitlán.

1980s

A principio de los 80's Ford fortaleció sus esquemas de financiamiento y distribución de vehículos gracias a la formación de Ford Motor Company, Compañía Comercial S.A. de C.V. [9] El 29 de junio de 1980 Ford de México produce el vehículo 1 millón, un LTD, siendo el último automóvil ensamblado en la planta de La Villa.[5] En 1983 la planta de Chihuahua produjo su primer motor y fue inaugurada oficialmente en el mes de noviembre. En 1986 gracias a una inversión de \$6,500 millones de pesos se inauguró, con la presencia del Presidente Miguel de la Madrid, la Planta de Ensamble de Hermosillo. [9] En 1984, la planta de La Villa suspende sus operaciones de ensamble de vehículos para convertirse en un almacén de refacciones. [5]

1990s

Se inicia la re-comercialización de productos Lincoln en México después de un nuevo decreto que concluye con la restricción de importar automóviles en 1989. En 1994 en Los Pinos, residencia oficial del presidente de México, se lleva a cabo la ceremonia del primer embarque de automóviles Contour y Mystique, producidos por Ford de México hacia Estados Unidos y Canadá. [5]

2000s

De 1925 a 2000 Ford Motor Company en México ha producido 4.5 millones de vehículos y 5.5 millones de motores. Después de 70 años como planta de ensamble y almacén de partes, en 2002 La Villa cierra definitivamente sus puertas. En 2003 se inician las obras de ampliación en la Planta de Hermosillo y la construcción de un parque industrial con una inversión de más de \$1,200 millones de dólares. En 2005 se comenzó a ensamblar en la planta de Hermosillo el nuevo Fusion, un sedán de tamaño mediano, el Lincoln Zephyr y el Mercury Milan. [5]

2010 a la actualidad

Tras remodelar completamente la Planta de Ensamble y Estampado de Cuautitlán (CSAP), de ser una planta de ensamble de camionetas a una que produce automóviles, se inicia la producción del totalmente renovado Fiesta, para el mercado de Norteamérica. El nuevo Fiesta cuenta con un motor de 1.6L I-4 DOHC que entrega 120hp acoplado a una caja manual de 5 velocidades o una automática de 6, capaz de alcanzar hasta 40 millas por galón de combustible. [10]

El Ford Fiesta se vendió por primera vez en Europa en 1976, en E.U.A. en 1978 y en México hasta 1998, vendiendo más de 294,000 unidades y en todo el mundo más de 12 millones de unidades en 30 años. [10]

Desde el 2008, Ford ha invertido más de 3 mil millones de dólares en sus operaciones en México, incluyendo la remodelación de la planta de Cuautitlán, una planta de motores Diesel en Chihuahua y una nueva planta en Guanajuato que producirá la nueva transmisión automática del Fiesta. Ford expandió 25,800 m² su planta en Cuautitlán, construyendo 5 nuevas líneas de producción, 270

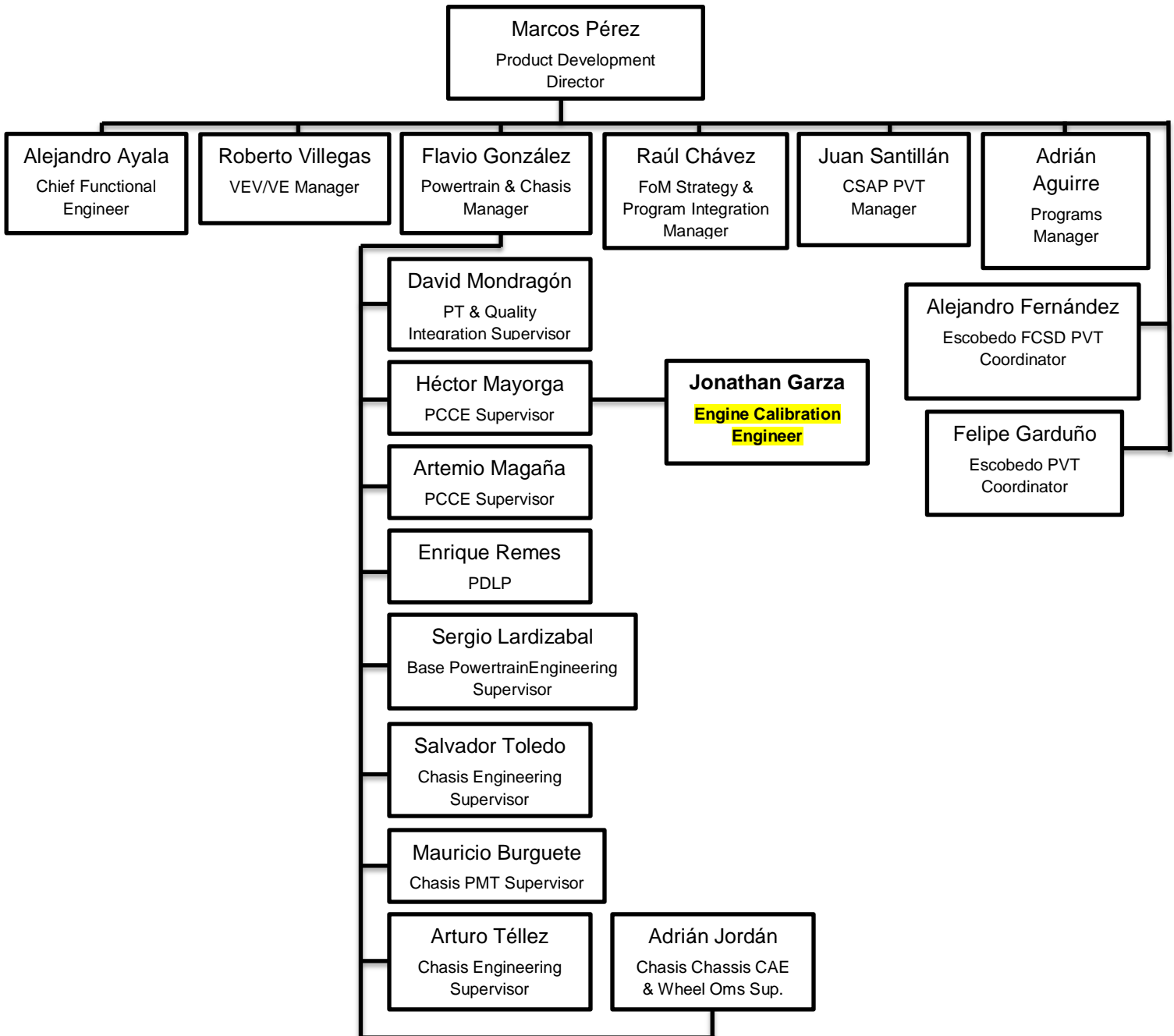
robots y sistemas de monitoreo en la línea, y unas nuevos talleres de pintura amigables con el ambiente. [10]

La producción del Fiesta creó 2000 empleos directos y 6000 indirectos, además de ser el proyecto de la compañía en el que más colaboran ingenieros mexicanos. En CSAP se han ensamblado el Ford Mustang, LTD, Crown Victoria; Thunderbird, Taurus, Contour, Grand Marquis, Mystique y las camionetas F – Series. [10]

Ford de México

Product Development

Organigrama



Capítulo 2: Ingeniero de Calibración, roles y responsabilidades

El departamento de calibración se divide principalmente en dos áreas, feature calibration y vehicle calibration. La primera se dedica principalmente a la calibración de funciones en específico, como el control de la chispa, mapas de motor, caracterización de sensores, etc. Los ingenieros de calibración de feature, son especialistas únicamente en algunas funciones y la gran mayoría de sus desarrollos se llevan a cabo sobre dinamómetros de motor, los cuales consisten básicamente de celdas instrumentadas donde se montan los motores y se acoplan a un freno eléctrico el cual simula las cargas deseadas.

Las actividades de los ingenieros de calibración en vehículo, consisten principalmente en ajustar y validar las calibraciones base obtenidas de las celdas de motor, lo anterior es necesario debido a que a pesar de ser una simulación muy cercana, los trenes motrices difieren en mayor o menor grado del comportamiento obtenido en dinamómetros de motor, cuando se montan sobre los vehículos de pruebas. Los calibradores en vehículo necesitan tener un conocimiento más generalizado de todas las funciones del tren motriz, ya que en vehículo se ajustan todas las funciones que ofrece el mismo como lo son comodidad, manejabilidad, desempeño, sistema de autodiagnóstico, control de emisiones, entre otros.

El ingeniero de calibración debe de tener buenas bases acerca del funcionamiento de los motores de combustión interna y sus componentes, de las cargas que se presentan como producto de la rotación dinámica, debido al proceso de combustión y la relación que tiene la carga del motor con la condición de operación del vehículo. También debe de dominar la física de la operación del motor incluyendo los diagramas de presión-volumen, la termodinámica y los aspectos dinámicos de los fluidos en los motores de cuatro tiempos.

El perfil de puesto del ingeniero de calibración, es el siguiente:

- Coordinar la integración de todas las actividades que interactúan con el tren motriz (por ejemplo, Feature Calibration, On Board Diagnostics, End of Line, Transmisión Automática, Refrigeración del Motor, NVH, protección contra el sobrecalentamiento, economía de combustible, shift quality, etc.) para asegurar que se cumplen con todos los requerimientos del programa y del tren motriz.
- Coordinar al PMT (Project Management Team) de calibración del tren motriz y otras PMTs según sea necesario para desarrollar y entregar una calibración del tren motriz que cumpla o exceda los atributos del programa y las expectativas del cliente.
- Coordinar el contenido de calibration feature y las aportaciones feature calibration del departamento de Feature Calibration.
- Al final de un programa, trabajar con el equipo PMA (Project Management Analyst) de calibración del tren motriz, para establecer el DVP (Design Verification Process) de la calibración específica de un programa, incluyendo guías y procedimientos de calibración del programa especificado, con el plan de tiempo para soportar todas las fechas de entrega del vehículo y del tren motriz, con calidad.
- Lograr alcanzar todas las especificaciones del programa y de la empresa.

- Tomar posesión de las calibraciones.
- Apoyar al PMT del programa con cualquier información requerida.
- Revisar los datos de las comparaciones con productos de otras compañías aplicables al vehículo o su tren motriz.
- Revisar las hojas de ruta de calidad e incorporar las acciones necesarias que soporten esa iniciativa.
- Llevar a cabo cambios que aseguren el cumplimiento de los requerimientos del programa, de la compañía y de las regulaciones.
- Apoyar las revisiones de la campaña de prevenciones.
- Entregar calibraciones a prueba de errores.
- Completar los reportes y documentos necesarios para certificar el cumplimiento de las regulaciones de emisiones de escape como sea requerido.
- Apoyar los procesos de reporte de calidad del sistema operativo del programa y del tren motriz.
- Proveer soporte para establecer la solución de todos los problemas del tren motriz relacionados con calibración.
- Gestionar las lecciones aprendidas y asegurar que los procesos de calibración están revisados para ser incorporados a otros programas, por ejemplo, con guías de calibración.
- Preparar el programa de calibración para el cierre de sesión para apoyar en las fechas de entrega y en los procesos de cierre de sesión.
- Apoyar en los procesos corporativos del inicio y posteriores a la producción masiva en lo que sea requerido, relacionado con la calibración del tren motriz.

Capítulo 3: Revisión Teórica del Funcionamiento de los Instrumentos de Medición empleados en un Vehículo de Pruebas

Medida de Temperatura

La medida de temperatura constituye una de las mediciones más comunes y más importantes que se efectúan en los procesos industriales. Las limitaciones del sistema de medida quedan definidas en cada tipo de aplicación por la precisión, por la velocidad de captación de la temperatura, por la distancia entre el elemento de medida y el aparato receptor y por el tipo de instrumento indicador, registrador o controlador necesarios. Los instrumentos de temperatura emplean diversos fenómenos que son influidos por la temperatura como una medida indirecta de la misma, entre los cuales figuran;

- a) Variaciones en volumen o en estado de los cuerpos (sólidos, líquidos o gases).
- b) Variación de resistencia de un conductor (sondas de resistencia).
- c) Variación de la resistencia de un semiconductor (termistores).
- d) f.e.m. creada en la unión de dos metales distintos (termopares).
- e) Intensidad de la radiación total emitida por el cuerpo (pirómetros de radiación).
- f) Otros fenómenos utilizados en el laboratorio (velocidad del sonido en un gas, frecuencia de resonancia de un cristal). [1]

Instrumentos para medir temperatura

Termistores

Los termistores son semiconductores electrónicos con un coeficiente de temperatura de resistencia negativo de valor elevado, por lo que presentan variaciones rápidas y extremadamente grandes para los cambios relativamente pequeños en la temperatura. Los termistores se fabrican con óxidos de níquel, manganeso, hierro, cobalto, cobre, magnesio, titanio y otros metales, y están encapsulados. La relación entre la resistencia del termistor y la temperatura viene dada por la expresión:

$$R_t = R_0 e^{\beta \left(\frac{1}{T_t} - \frac{1}{T_0} \right)} \quad [i]$$

Donde:

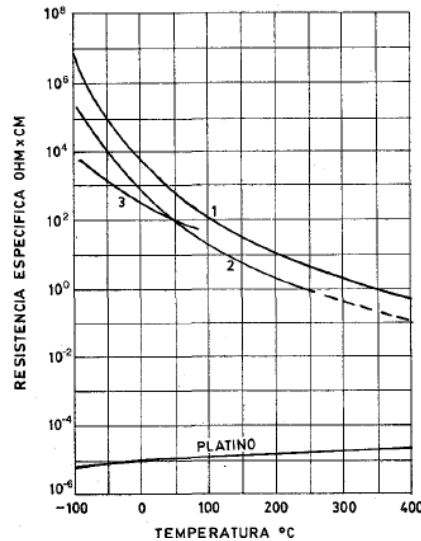
R_t = resistencia en ohms a la temperatura absoluta T_t

R_0 = resistencia en ohms a la temperatura absoluta de referencia T_0

β = constante dentro de un intervalo moderado de temperaturas [1]

En la siguiente figura, pueden verse las curvas características de dos tipos de materiales de termistores en comparación con el termómetro de resistencia de platino. Los termistores se conectan a puentes de Wheatstone convencionales o a otros circuitos de medida de resistencia. Al tener un alto coeficiente de temperatura poseen una mayor sensibilidad que otras sondas de resistencia y permiten incluso intervalos de medida de 1°C. Son de pequeño tamaño y su tiempo de respuesta depende de la capacidad térmica y de la masa del termistor variando de 0.5 a 10 segundos. [1]

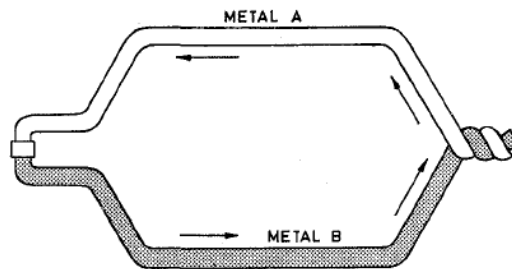
La distancia entre el termistor y el instrumento de medida puede ser considerable siempre que el elemento posea una alta resistencia comparada con la de los cables de unión. La corriente que circula por el termistor a través del circuito de medida debe de ser baja, para garantizar que la variación de resistencia del elemento sea debida exclusivamente a los cambios de temperatura del proceso. Los termistores encuentran su principal aplicación en la medición, la compensación y el control de temperatura, y como medidores de temperatura diferencial. [1]



Curvas características de Termistores [1]

Termopares

El termopar se basa en el efecto descubierto por Seebeck en 1821, debido a la circulación de una corriente en un circuito formado por dos metales diferentes cuyas uniones (unión de medida o caliente y unión de referencia o fría) se mantienen a distinta temperatura. Esta circulación de corriente obedece a dos efectos termoeléctricos combinados, el efecto Peltier que provoca la liberación o absorción de calor en la unión de dos metales distintos cuando una corriente circula a través de la unión, y el efecto Thomson, el cual consiste en la liberación o absorción de calor cuando una corriente circula a través de un metal homogéneo en el que existe un gradiente de temperaturas. [1]

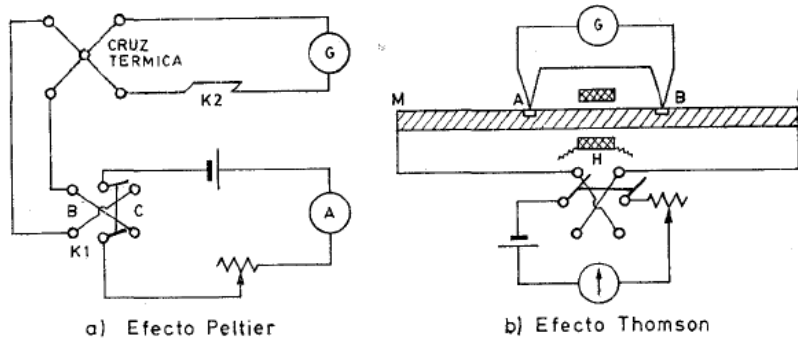


Esquema de un Termopar [1]

En una cruz térmica formada por la unión en su centro de dos metales distintos, se hace pasar una corriente en uno u otro sentido con el interruptor K_2 abierto. Después de cada paso de corriente se abre K_1 (desconectándose la pila) y se cierra K_2 leyendo en el galvanómetro la f.e.m. creada, que es proporcional a la temperatura alcanzada por la cruz térmica en cada caso.

Se observará que restando el calentamiento óhmico, que es proporcional al cuadrado de la corriente, queda un remanente de temperatura que en un sentido de circulación de la corriente es positivo y negativo en el sentido contrario. El efecto depende de los metales que forman la unión.

El efecto Thomson puede detectarse en el circuito de la siguiente figura, formado por una barra metálica MN, con un termopar diferencial AB aislado y una bobina H para calentamiento eléctrico centrada con relación a AB. En régimen, calentando la bobina H en uno de los puntos, el B por ejemplo, se presentará una diferencia de temperaturas con el A, lo que se acusará en el galvanómetro; si ahora se hace pasar corriente por la barra MN, se notará un aumento o disminución de la temperatura diferencial con el efecto contrario si se invierte la corriente. El efecto Peltier también se pone de manifiesto en la siguiente figura. [1]



Efecto Peltier y Thomson [1]

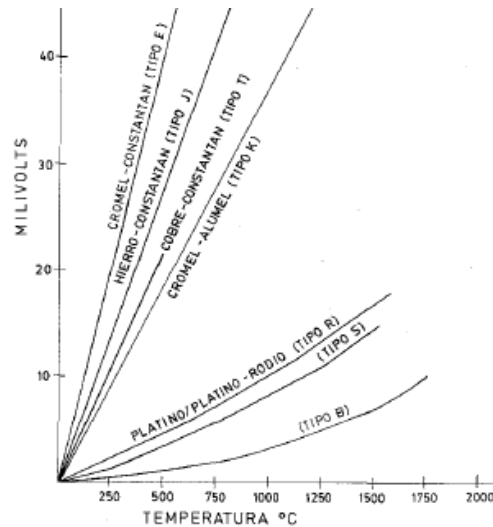
La combinación de los efectos, de Peltier y de Thomson, es la causa de la circulación de corriente al cerrar el circuito en el termopar. Esta corriente puede calentar el termopar y afectar la precisión en la medida de la temperatura, por lo que durante la medición debe hacerse mínimo su valor.

Los estudios realizados sobre el comportamiento de termopares han permitido establecer tres leyes fundamentales:

1. Ley del circuito homogéneo. En un conductor metálico homogéneo no puede sostenerse la circulación de una corriente eléctrica por la aplicación exclusiva de calor.
2. Ley de los metales intermedios. Si en un circuito de varios conductores la temperatura es uniforme desde el punto de soldadura A a otro punto B, la suma algebraica de todas las fuerzas electromotrices es totalmente independiente de los conductores, metálicos intermedios y es la misma que si se pusieran en contacto directo A y B.
3. Ley de las temperaturas sucesivas. La f.e.m. generada por un termopar con sus uniones A y C a las temperaturas T_1 y T_3 respectivamente, es igual a la suma algebraica de la f.e.m. producida por las uniones A y B a las temperaturas T_1 y T_2 con la f.e.m. producida por las uniones B y C a las temperaturas T_2 y T_3 ($V_{AC} = V_{AB} + V_{BC}$).

Por estas leyes se hace evidente que en el circuito se desarrolla una pequeña tensión continua proporcional a la temperatura de la unión de medida, siempre que haya una diferencia de temperaturas con la unión de referencia. Los valores de esta f.e.m. están tabulados en tablas de

conversión con la unión de referencia a 0°C. La selección de los alambres para termopares se hace de forma que tengan una resistencia adecuada a la corrosión, a la oxidación, a la reducción y a la cristalización, que desarrollen una f.e.m. relativamente alta, que sean estables, de bajo costo y de baja resistencia eléctrica, y que la relación entre la temperatura y la f.e.m. sea tal que el aumento de ésta sea (aproximadamente) paralelo al aumento de la temperatura. En la siguiente figura se presentan las curvas características de los termopares. [1]



Curvas características de diferentes tipos de termopares [1]

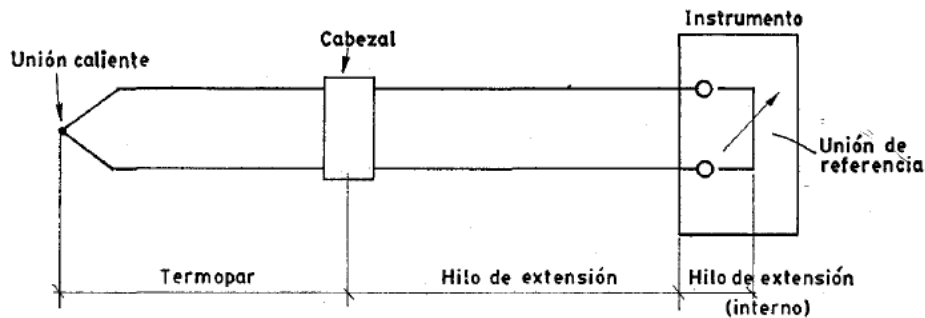
En la siguiente tabla, se muestran los tipos de termopares que se usan en la industria, sus características y su intervalo de medición.

Características de termopares (Norma IEC-584-1982)

Tipo	Intervalo de medida	Límites de error del termopar			Cable de extensión Límites de		
		Clase 1	Clase 2	Clase 3	Temperatura	Error	
						Premium	Normal
Cromel-constantán tipo E	-40 a 800° C -40 a 900° C -200 a 40° C	± 1,5° C o ± 0,4 %	± 2,5° C o ± 0,75 %	± 2,5° C o ± 1,5 %	-60 a 200° C	-	± 1,5° C o ± 2 %
Cobre constantán tipo T	-40 a 350° C -40 a 350° C -200 a 40° C	± 0,5° C o ± 0,4 %	± 1° C o ± 0,75 %	± 1° C o ± 1,5 %	-60 a +95° C	± 0,5° C o ± 0,5 %	± 1° C o ± 0,75 %
Hierro constantán tipo J	-40 a 750° C -40 a 750° C -	± 1,5° C o ± 0,4 %	± 2,5° C o ± 0,75 %		0-200° C	± 1° C o ± 0,75 %	± 2,5° C o ± 1,25 %
Cromel-Alumel tipo K	-40° C a 1000° C -40° C a 1200° C -200 a 40° C	± 1,5° C o ± 0,4 %	± 2,5° C o ± 0,75 %	± 2,5° C o ± 1,5 %	0-200° C	± 1° C o ± 0,75 %	± 2,5° C o ± 2,5 %
Pt-Pt/Th 13 % (tipo R) Pt-Pt/Rh 10 % (tipo S)	0° C a 1600° C 0° C a 1600° C -	± 1° C	± 1,5° C o ± 0,25 %		25 a 200° C	-	± 5° C o ± 6 %
Pt-Rh 6 %/Pt-Rh 30 % Tipo B	- 600° C a 1700° C 600° C a 1700° C		± 1,5° C o ± 0,25 %	± 4° C o ± 0,5 %	25 a 200° C	-	± 5° C o ± 6 %

Tabla de las características de los diferentes tipos de termopares y su intervalo de medición [1]

Cuando el termopar está instalado a una distancia larga del instrumento, no se conecta directamente al mismo, sino por medio de un cable de extensión. Los cables de extensión son conductores con propiedades eléctricas similares a las del termopar hasta ciertos límites de temperatura y son más económicos. Las conexiones entre el cable de compensación, el termopar y el instrumento deben de ser perfectas, sin empalmes en el cable de compensación.



Esquema de la conexión entre un termopar, su cable de extensión y el instrumento de medición [1]

Medidas de presión

Unidades y clases de presión

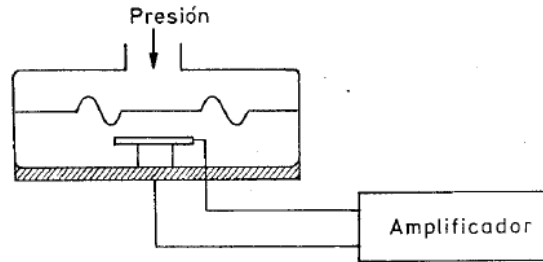
La presión es una fuerza por unidad de superficie y puede expresarse en unidades tales como pascal, bar, atmósferas, kilogramos por centímetro cuadrado y psi (libras por pulgada cuadrada). En el Sistema Internacional (S.I.) está normalizada en pascal de acuerdo con las Conferencias Generales de Pesas y Medidas 13 y 14* que tuvieron lugar en París en octubre de 1967 y 1971, Y según la Recomendación Internacional número 17, ratificada en la tercera Conferencia General de la Organización Internacional de Metrología. El pascal es 1 newton por metro cuadrado (1 N/m^2), siendo el newton la fuerza que aplicada a un cuerpo de masa 1 kg, le comunica una aceleración de 1 m/s^2 . Como el pascal es una unidad muy pequeña, se emplean también el kilopascal ($1 \text{ kPa} = 10^{-2} \text{ bar}$), el megapascal ($1 \text{ MPa} = 10 \text{ bar}$) y el gigapascal ($1 \text{ GPa} = 10\,000 \text{ bar}$). En la industria se utiliza también el bar ($1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa} = 1,02 \text{ kg/cm}^2$) y el kg/cm^2 , si bien esta última unidad, a pesar de su uso todavía muy extendido, se emplea cada vez con menos frecuencia. [1]

El campo de aplicación de los medidores de presión es amplio y abarca desde valores muy bajos (vacío) hasta presiones de miles de bar. Los instrumentos de presión se clasifican en tres grupos: mecánicos, neumáticos, electromecánicos y electrónicos. [1]

Transductores piezoeléctricos

Los elementos piezoeléctricos son materiales cristalinos que, al deformarse físicamente por la acción de una presión, generan una señal eléctrica. Dos materiales típicos en los transductores piezoeléctricos son el cuarzo y el titanato de bario, capaces de soportar temperaturas del orden de $150 \text{ }^\circ\text{C}$ en servicio continuo y de $230 \text{ }^\circ\text{C}$ en servicio intermitente. Son elementos ligeros, de pequeño tamaño y de construcción robusta. Su señal de respuesta a una variación de presión es lineal y son adecuados para medidas dinámicas, al ser capaces de respuestas frecuenciales de hasta un millón de ciclos por segundo. Tienen la desventaja de ser sensibles a los cambios en la temperatura y de experimentar una variación continua alrededor del cero debido a los cambios físicos del instrumento a lo largo de su tiempo de vida. Asimismo, su señal de salida es

relativamente débil por lo que precisan de amplificadores y acondicionadores de señal que pueden introducir errores en la medición. [1]



Esquema de un Transductor Piezoeléctrico. [1]

Sensores de Oxígeno

Sensor Lambda

Los sensores Lambda pueden ser divididos en 2 tipos: sensores circonia y sensores titania. Éstos son clasificados como sensores Lambda 1. Estos sensores utilizan diferentes tipos de elementos cerámicos que funcionan de diferentes formas pero tienen un objetivo en común que es asegurar que el convertidor catalítico funcione de forma eficiente y así se evite al mínimo la emisión de gases dañinos. Para poder conseguir esto, el motor necesita alcanzar la combustión más completa posible. La relación ideal entre aire y combustible es alrededor de 14.7 kg de aire/kg de combustible, esta relación se conoce como relación estequiométrica y corresponde al valor $\text{Lambda} = 1$. Una mezcla rica en combustible tiene un valor $\text{Lambda} < 1$ mientras que una mezcla pobre en combustible tiene un valor $\text{Lambda} > 1$. [11]

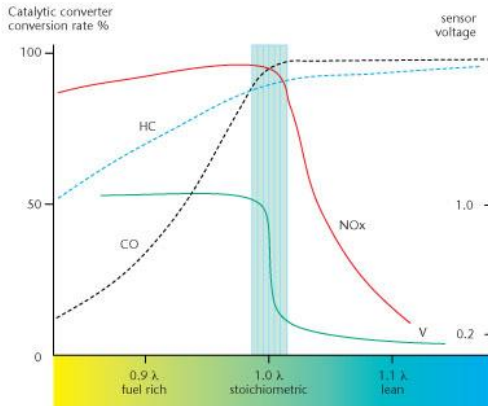
Una parte relativamente pequeña de vehículos, pero que sigue en aumento, usa sensores que pueden precisamente medir relaciones aire combustible en gran rango de valores ya sean ricas o pobres. A este tipo de sensores se les llama UEGO (Universal Exhaust Gas Oxygen) sensors, sensores de banda ancha o sensores lineales. [11]

Sensor de Circonio de Tipo Binario (HEGO: Heated Exhaust Gas Oxygen)

Bajo el extremo metálico de protección del sensor hay un cuerpo cerámico hueco en forma de dedal fabricado con dióxido de circonio. El extremo de protección metálico tiene unos agujeros especialmente diseñados para dejar que los gases de escape entren en contacto con la parte exterior del elemento cerámico. Ambos lados del elemento cerámico están cubiertos con una capa delgada y porosa de platino. Estas capas son los electrodos que llevan las señales del sensor hacia los cables del mismo. Sobre el electrodo exterior se añade una capa cerámica porosa que protege al platino de la erosión que le provocan los gases de escape. El interior del dedal cerámico es hueco y es usado para mantener una muestra de aire ambiente como referencia. [11]

A temperaturas superiores a los 300°C el elemento de circonio posee una propiedad que causa una transferencia de iones de oxígeno. Este movimiento produce una diferencia de potencial. Entre más grande sea la diferencia entre la concentración de oxígeno del gas de escape y aire ambiente dentro del dedal cerámico, se produce un voltaje más alto. El voltaje producido en la zona pobre en combustible ($\text{Lambda} > 1$) es aproximadamente de 0.1V y en la zona rica en combustible ($\text{Lambda} < 1$) es aproximadamente de 0.9V. La parte más útil de esta función es que alrededor del punto

estequiométrico hay un cambio relativamente alto en el voltaje. Lo anterior permite que el sensor retroalimente al sistema de control del motor y éste pueda mantener funcionando al motor lo más cercano posible a la estequiometría y por lo tanto cumplir con los estrictos límites establecidos de emisiones de escape. Este tipo de sensores ayudan al sistema de inyección de combustible para regresar de un estado pobre a uno rico constantemente para mantener al motor operando en el rango de la estequiometría. El tiempo que toma cambiar del punto pobre al rico es de aproximadamente 300ms. [11]



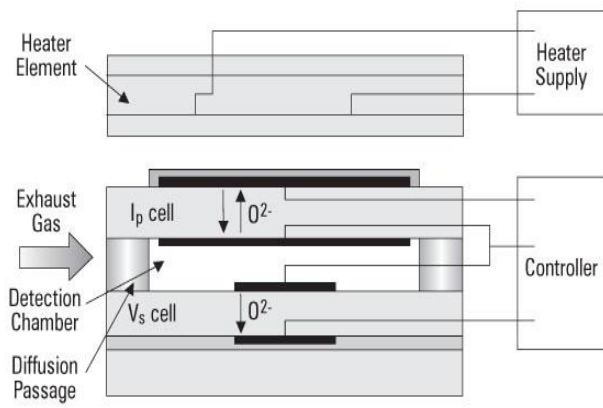
Curva característica de un sensor tipo HEGO [11]



Sensor tipo HEGO [11]

Sensor tipo UEGO

También conocido como sensor de banda ancha, la forma más fácil de identificar este tipo de sensor es por su número de cables, requiere mínimo de 5 y son siempre sensores equipados con un sistema de calentamiento para llegar rápidamente a su temperatura de operación. El sensor está construido en capas con dos componentes de sustrato cerámico, un elemento de detección de circonio y un elemento de calentamiento de alúmina. No se necesita aire de referencia mientras el sensor genere el propio. La cavidad detectora está expuesta al gas de escape a través de una capa de difusión de gas. De una forma muy simple, el sensor trata de mantener una relación aire combustible estequiométrica dentro de la cámara de detección, bombeando oxígeno hacia adentro o hacia afuera de la cámara. El vapor de la corriente de bombeo requerida para lograr lo anterior corresponde a la relación aire combustible del gas de escape. Este sensor no sólo tiene una ventana más amplia de medición además de poder usarse satisfactoriamente en estrategias de combustión pobre, también brinda una gran exactitud alrededor del punto estequiométrico, lo que resulta muy útil en la reducción de emisiones. Este tipo de sensor también puede ser utilizado con motores diésel que operan con un factor de exceso de aire. [11]



Esquema interno de un sensor tipo UEGO [1]



Sensor tipo UEGO

Capítulo 4: Instrumentación de Vehículo de pruebas

Al estar en fase de desarrollo, los vehículos de pruebas necesitan que sus parámetros clave sean monitoreados por diversos motivos, los principales son:

- Obtener datos clave para calibrar parámetros del funcionamiento del motor.
- Monitorear que no se sobrepasen los valores de diseño y evitar posibles daños.
- Comparar el desempeño, exactitud y calibración de los diversos sensores instalados de fábrica.
- Obtener datos acerca de las condiciones de operación.

Medición de temperaturas

Para los vehículos de pruebas, las temperaturas más importantes que se monitorean son las siguientes:

- Temperatura ambiente
- Temperatura del refrigerante (antes y después del radiador).
- Temperatura de los gases escape (antes de pasar por el catalizador y dentro del catalizador).
- Temperatura del aire dentro del múltiple de admisión.

Mediciones Analógicas

Se toman como mediciones analógicas a las señales de voltaje producidas por diversos transductores, se separan las mediciones de temperatura de esta sección, ya que el procesamiento de las señales es diferente, pues las medidas de temperatura necesitan de una referencia especificada única para los termopares dentro del módulo de adquisición de datos, en comparación con las señales analógicas, que sólo se necesita de la señal y de una función de transferencia para obtener la señal en las unidades físicas deseadas.

Las medidas analógicas más relevantes para estos vehículos de prueba son:

- Presión en el riel de inyección de combustible
- Voltaje de la batería
- Medición de la relación aire-combustible del motor

La instrumentación de los vehículos de prueba varía dependiendo de la fase en la que se encuentren los programas de la compañía. Cuando los vehículos se encuentran en las primeras fases de desarrollo del producto, se necesitan mucho más puntos de medición de temperatura, presión, voltajes, lambda, etc., para poder iniciar con desarrollo, integración y ajuste de todos los componentes nuevos del proyecto, contando con el respaldo de mucha información obtenida por medio de instrumentación externa. La instrumentación mencionada anteriormente, corresponde a una fase del proyecto avanzada, donde la mayoría de los parámetros ya fueron probados y certificados y ya no necesitan de monitoreo externo adicional a los sistemas del auto.

Ubicación de los Instrumentos en el Vehículo

Monitoreo de Temperaturas en puntos Clave

Los termopares que se seleccionaron para esta aplicación al igual que en muchos sectores de la industria, fueron los de tipo K (cromel – alumel), debido a su rango de medición de -40°C a 1200°C y a su bajo costo. Dependiendo de la ubicación y las condiciones de operación, se seleccionaron termopares encapsulados y no encapsulados.

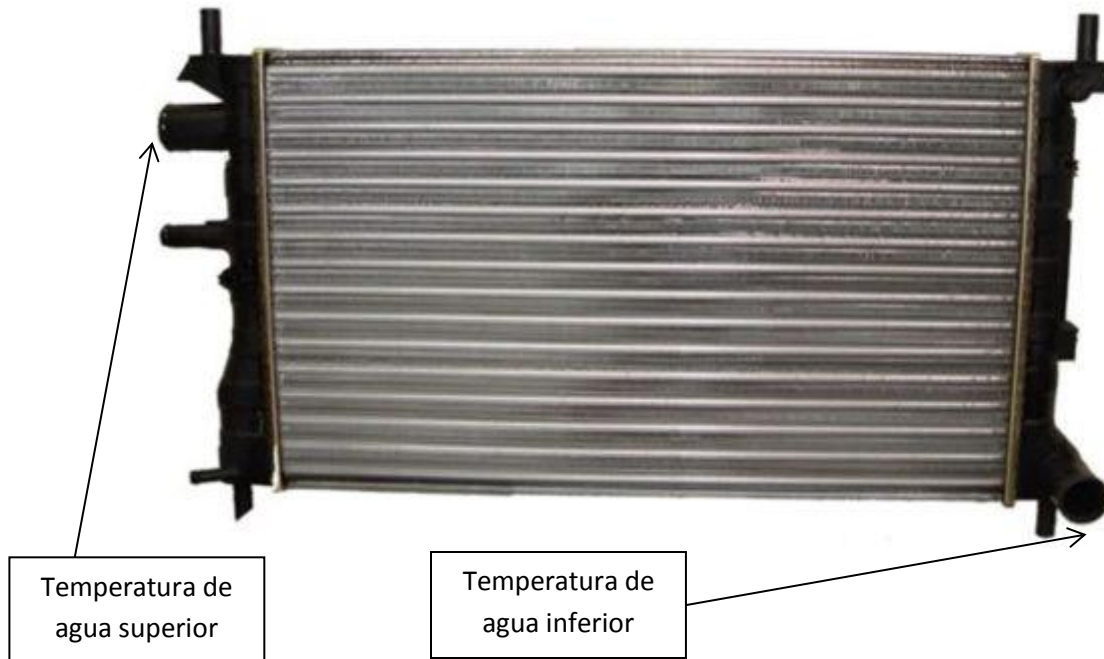
Los termopares encapsulados se utilizaron para condiciones de operación con altas temperaturas y/o con ambientes que propician la corrosión de los metales.

Los puntos que cumplen con las características mencionadas anteriormente son las temperaturas del refrigerante antes y después del radiador y las temperaturas del convertidor catalítico. Los termopares para los puntos mencionados en primer lugar, tienen que estar sumergidos en el líquido refrigerante, por lo que están en condiciones que les pueden ocasionar daños corrosivos. En el caso del convertidor catalítico, se tienen condiciones de muy alta temperatura, que en algunos casos pueden inclusive fundir los metales que componen en el termopar, por estos motivos, siendo los puntos con condiciones que pudieran dañar con más facilidad los termopares, se seleccionaron sondas encapsuladas de un 1/8" de diámetro.

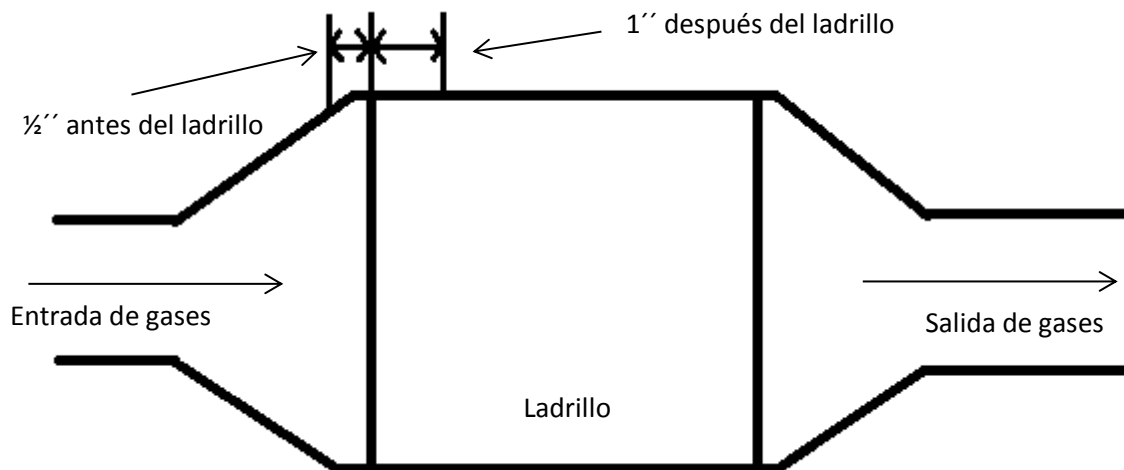


Termopar tipo K encapsulado de 1/8" de diámetro.

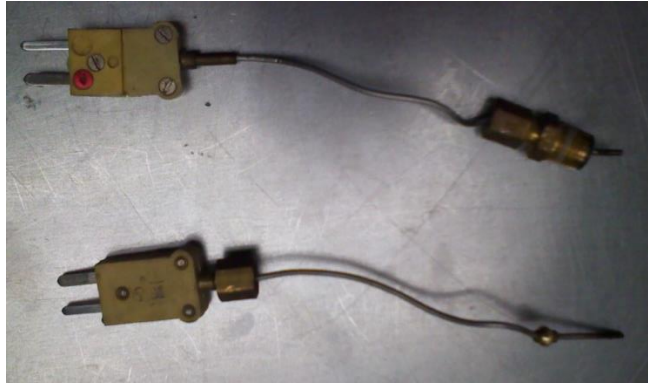
En el radiador, los termómetros se colocaron en las siguientes ubicaciones, realizando y sellando pequeñas perforaciones en las tuberías del refrigerante:



En el convertidor catalítico, por especificación de Ford, se colocaron las sondas de temperatura en las siguientes posiciones perforando y sellando por medio de uniones atornilladas y selladas:



Otro de los termopares fue colocado en el múltiple de admisión. Se decidió que este termopar fuera uno encapsulado por seguridad; debido a que la sonda va a estar sometida a flujos altos de aire, la protección no debía de ser muy robusta, ya que no se está ubicado en una zona de muy alta temperatura, por lo que para este punto se eligió una sonda de 1/16'', este tipo de sonda de menor diámetro tiene la ventaja de poseer menos "inercia térmica" o tiempo de respuesta, por lo que es más sensible a los cambios de temperatura que una de mayor diámetro.



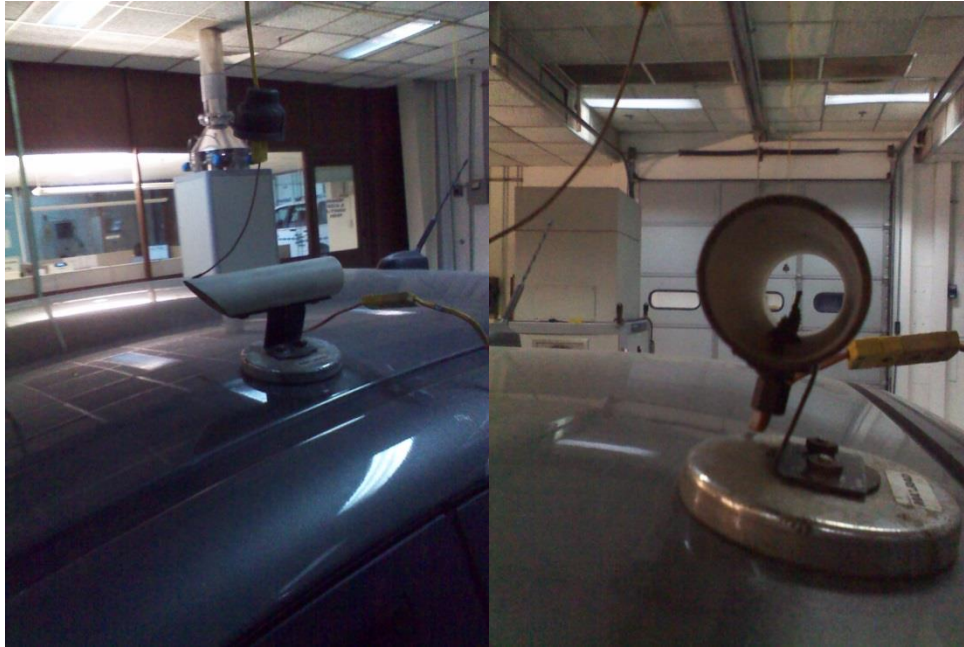
Termopares encapsulados tipo K de 1/16" con unión atornillada



El termopar se colocó dentro del múltiple de admisión por medio de una perforación y una unión atornillada sellada.

El termopar se colocó lo más cercano posible al sensor MAP (Manifold Absolute Pressure), ya que en este mismo punto se encuentra el termistor ACT (Air Charge Temperature), los cuales se encargan de medir las condiciones del aire de admisión a la cámara de combustión.

Por último, se colocó un termopar sin protección en el techo del auto, con el cual se pretenden medir las condiciones del aire ambiental y poder tener una referencia instrumentada de las condiciones en las que se encuentra operando el vehículo.

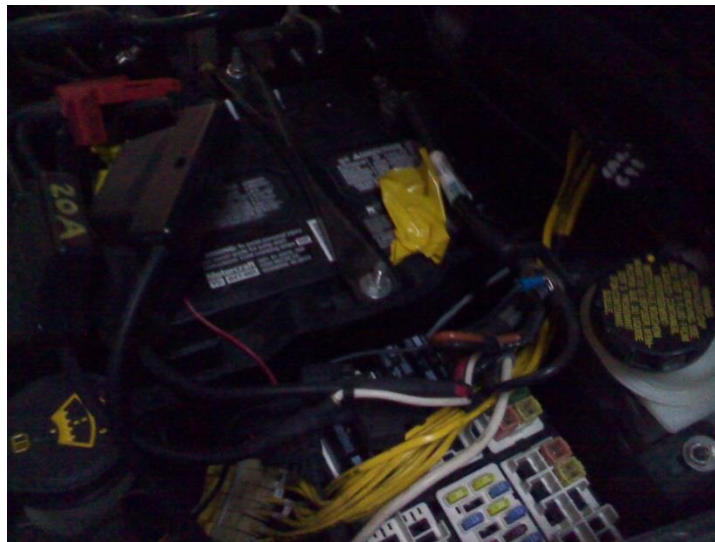


Termopar encargado de medir condiciones ambiente en el toldo del vehículo

Monitoreo de Variables Físicas por medio de Transductores Analógicos

Voltaje en Batería

Esta parte es la más sencilla de toda la instrumentación, simplemente se conectaron dos cables directamente en la batería del vehículo, uno en la terminal positiva y otro a la negativa, hacia los módulos de adquisición de datos con un fusible de 2A para la protección del equipo.



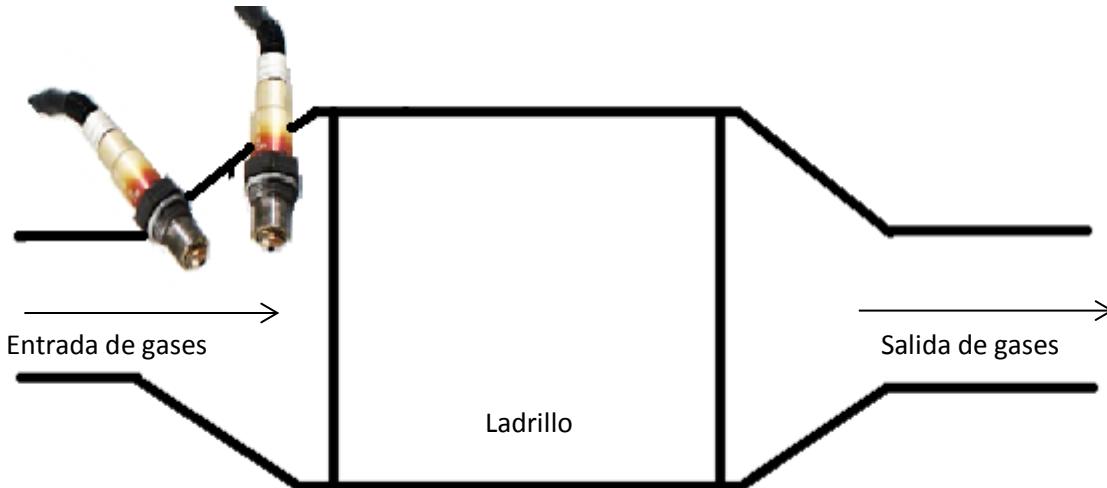
En la imagen se observan los dos cables conectados a las terminales de la batería, el rojo a la positiva y el negro a la negativa. Se observan también los cables de extensión de los termopares instalados en el compartimiento del motor

Sonda Lambda

El vehículo debido a las estrictas regulaciones gubernamentales en cuanto a emisiones de escape, cuenta con un sensor tipo UEGO localizado antes del convertidor catalítico, el cual monitorea en todo momento la relación aire combustible. Esta señal se utiliza como retroalimentación a la unidad de control del motor para modificar la longitud de los pulsos de inyección en cada cilindro y así lograr que la mezcla global del motor se encuentre en el rango de $\text{Lambda} = 1$ o sea dentro de la relación estequiométrica y así garantizar la máxima eficiencia en el catalizador, con lo cual se obtiene una emisión mínima de gases nocivos.

Para verificar que la señal recibida por la unidad de control del motor sea la correcta, se instrumenta el múltiple de escape con una sonda adicional conectada al equipo de instrumentación, así se obtiene una señal base de referencia, para verificar que el sensor de fábrica se encuentre dentro de los rangos correctos y la estrategia de inyección de combustible por lo tanto suministre el combustible necesario para alcanzar la estequiometría en los diferentes puntos de operación.

La ubicación del sensor Lambda adicional no tiene una ubicación específica establecida por Ford, simplemente se busca perforar el múltiple de escape para colocar la sonda adicional con su punta lo más cerca posible a la del sensor de fábrica para que así, la medición de ambas sondas se efectúe en el mismo punto. Para lograr esto en el múltiple del Fiesta, se encontró la siguiente disposición en el múltiple para cumplir con las condiciones de cercanía de las puntas de los sensores:

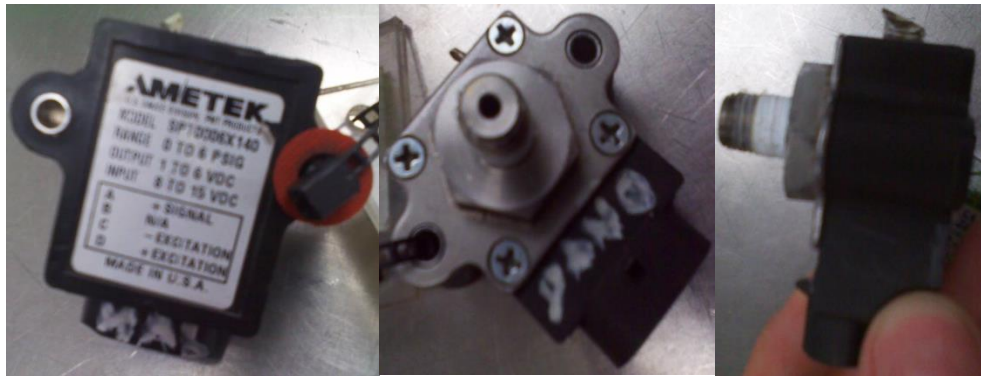


El sensor de fábrica está colocado paralelamente a la cara del ladrillo del convertidor catalítico. El sensor adicional se colocó en una posición angulada con respecto al otro sensor para que su punta estuviera lo más cercana posible a la del sensor de fábrica.

Sensor de presión en el riel de inyección de combustible:

El sensor de presión manométrica, es un sensor de presión piezoeléctrico lineal de diafragma, el cual tiene un rango de medición de 0 a 100 PSI correspondiendo linealmente los siguientes

voltajes de salida respectivamente 1 a 6V. Es decir, cuando se tiene una presión de 0 PSI se tiene 1V a la salida y así respectivamente. Para instalar el sensor, se desconectó la manguera que proviene de la bomba de gasolina del riel de inyección y se puso en su lugar un tubo en forma de "S" con el sensor de presión montado en él. Este tubo se colocó con un extremo conectado al riel de inyección y con el otro a la manguera proveniente de la bomba de gasolina. Hecho lo anterior, quedó instrumentado el riel de inyección y con ello se puede monitorear la presión a la que se opera en todo momento.



Sensor de presión empleado en el riel de inyección de combustible

Sistema de adquisición de datos

El sistema de adquisición de datos de ATI, consiste básicamente en tres módulos. Uno de los módulos se encarga únicamente de capturar las señales de temperatura de los termopares. Internamente el sistema tiene su referencia del cero de temperatura por lo tanto con el voltaje leído en los termopares, puede entregar inmediatamente la transformación a °F. En este módulo se conectan todos los termopares y se procesan las señales. De igual forma, hay otro módulo encargado de recibir las señales analógicas, este dispositivo sólo recibe y procesa señales de voltaje sin transformarlas. Ambos equipos se conectan a una unidad que concentra las señales y las envía a través de un cable USB a la computadora, donde se establecen las funciones de transferencia de las señales de los transductores y se obtiene la lectura de la unidad física deseada.



Imagen izquierda: Se observan los conectores de las señales analógicas (caja negra) estas señales son enviadas al dispositivo electrónico que las procesa (en el fondo el dispositivo a la izquierda de los tres). Las señales de los termopares son recibidas por la caja en la derecha del fondo y posteriormente enviadas al dispositivo que las procesa (en el fondo el dispositivo en medio de los tres). Las señales procesadas son enviadas por los cables de datos azules a la unidad concentradora (al lado izquierdo de la caja negra) y después los datos concentrados en este dispositivo se monitorean con una computadora por medio de un cable USB.

Imagen derecha: Se muestran con más detalle las conexiones de los termopares con su equipo de adquisición.

Capítulo 5: Adquisición y análisis de datos de instrumentación durante una prueba de emisiones ciclo europeo etapa IV en dinamómetro.

Software de Adquisición de datos y breve descripción de la prueba y parámetros

A continuación, se muestran las gráficas de los datos obtenidos con ayuda de la instrumentación que se instaló en el vehículo de pruebas. La adquisición de datos se realizó con ayuda del software ATI Vision, el cual es ampliamente utilizado en la industria automotriz para la calibración y monitoreo de las unidades de control del motor y para adquisición de datos por medio de instrumentación externa.

En todas las gráficas que se mostrarán, se pueden observar siempre en la parte superior, los trazos de los datos obtenidos con la instrumentación, comparados con los datos adquiridos de la unidad de control del motor, seguidos por las gráficas de la carga del motor, la velocidad de giro y por último la velocidad del vehículo.

La prueba realizada en el vehículo, es un Ciclo Europeo para medir emisiones de escape. Este ciclo se utiliza para poder certificar que los vehículos cumplen con las restricciones de emisiones según la NOM – 042 y se les otorgue la homologación para su venta en territorio mexicano.

El ciclo en sí, corresponde al perfil de velocidades que se observa en el trazo inferior de las gráficas que se mostrarán. Este ciclo simula condiciones de manejo en ciudad con un tramo al final en vía rápida, para imitar las condiciones de operación en las que se encuentra un vehículo en condiciones normales de uso.

Los vehículos requieren que todos sus componentes estén a temperatura ambiente al iniciar la prueba, esto con el fin de lograr simular un arranque en frío requerido por las especificaciones del ciclo europeo. Para lograr esto, los vehículos que se requieren probar se estacionan en una cámara con temperatura controlada por un mínimo de 12 horas, para lograr las condiciones iniciales de temperatura mencionadas. Tanto la cámara donde los vehículos son dejados para alcanzar temperatura ambiente como la celda de pruebas, se mantienen a una temperatura aproximada de 25°C (77°F). Cabe destacar que todas las graficas de temperatura construidas con los datos obtenidos con ayuda la instrumentación en los distintos puntos del auto, parten de la misma temperatura, lo que comprueba que el coche estuvo detenido el tiempo suficiente para alcanzar temperatura ambiente en todos sus componentes.

El parámetro LOAD_FG, es un número adimensional que va de 0 a 1 el cual corresponde a la carga de aire del motor. A continuación se muestra una descripción de las variables:

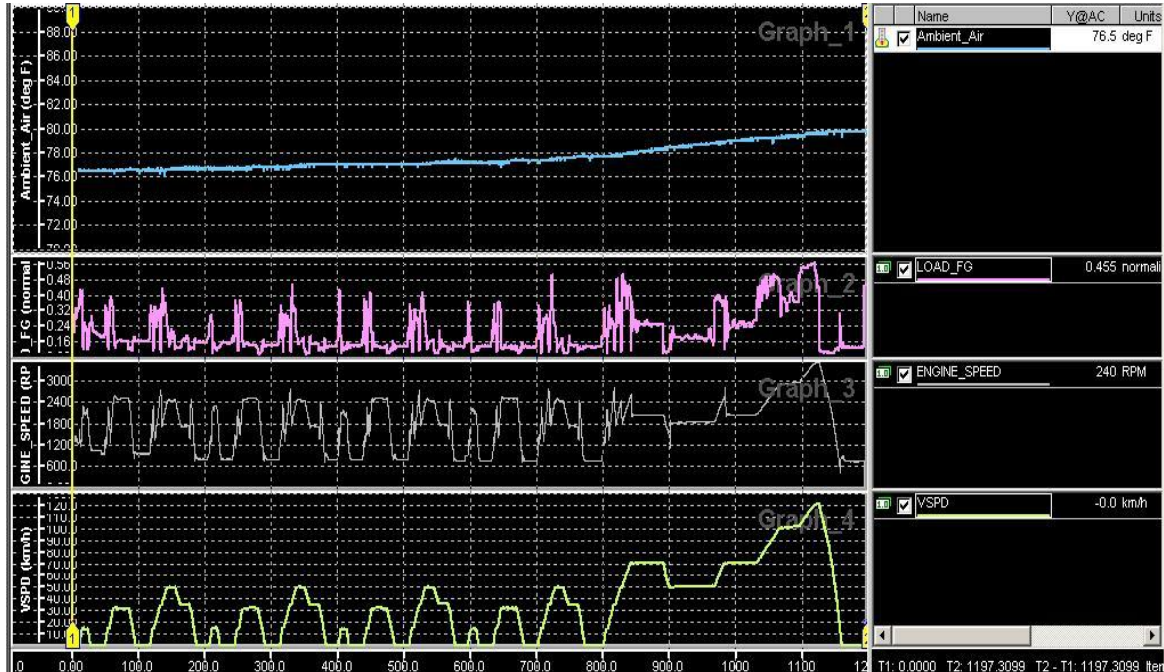
LOAD_FG = cantidad de aire actual / cantidad de aire máxima posible.

ENGINE_SPEED: es la velocidad de giro del cigüeñal del motor.

VSPD: es la velocidad del auto.

Lecturas de Temperatura

- Temperatura del Aire Ambiente

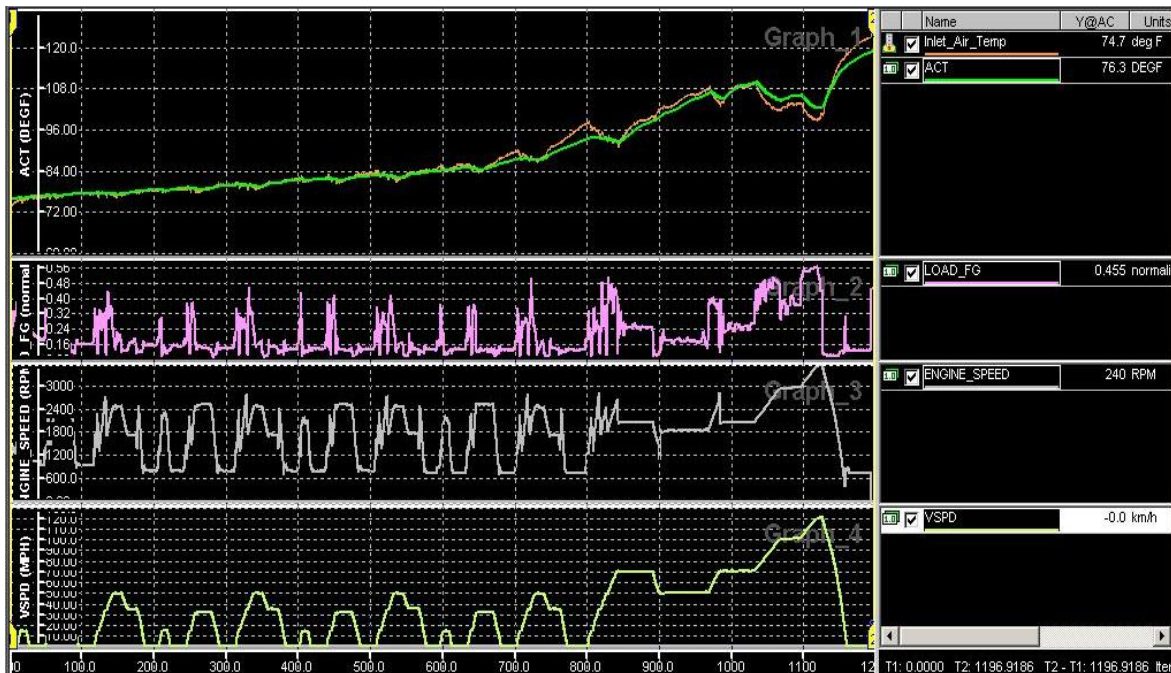


Ambient_Air: Temperatura del aire ambiente (°F)
LOAD_FG: Carga del motor (adimensional)
ENGINE_SPEED: Velocidad de giro del cigüeñal del motor (RPM)
VSPD: Velocidad del auto (km/h)
El eje horizontal representa el tiempo en segundos y es común para todos los trazos

Figura 1: Datos adquiridos del termopar tipo K instalado para monitorear la temperatura ambiente

En la figura 1 se puede observar cómo la temperatura ambiente de la celda se encuentra parcialmente constante durante toda la prueba. Durante la primera fase se tiene un aumento mínimo en la temperatura de la celda, pero se nota un aumento más marcado durante la segunda etapa de la prueba debido a que en las condiciones de carga más altas, se rechaza más calor y es complicado para el control de temperatura mantener la celda en temperatura constante durante esta etapa. Sin embargo cabe destacar que durante casi toda la prueba, se tiene una temperatura cercana a los 25°C (77°F), para lograr condiciones ambiente similares en todo momento.

- Temperatura del Aire de Admisión



■ Inlet_Air_Temp: Temperatura del aire de admisión medida con un termopar tipo K (°F)
■ ACT: Temperatura del aire de admisión medida con el termistor de producción ACT (°F)
■ LOAD_FG : Carga del motor (adimensional)
■ ENGINE_SPEED: Velocidad de giro del cigüeñal del motor (RPM)
■ VSPD: Velocidad del auto (km/h)
 El eje horizontal representa el tiempo en segundos y es común para todos los trazos

Figura 2: Datos adquiridos del termopar instalado en el múltiple de admisión y del sensor ACT

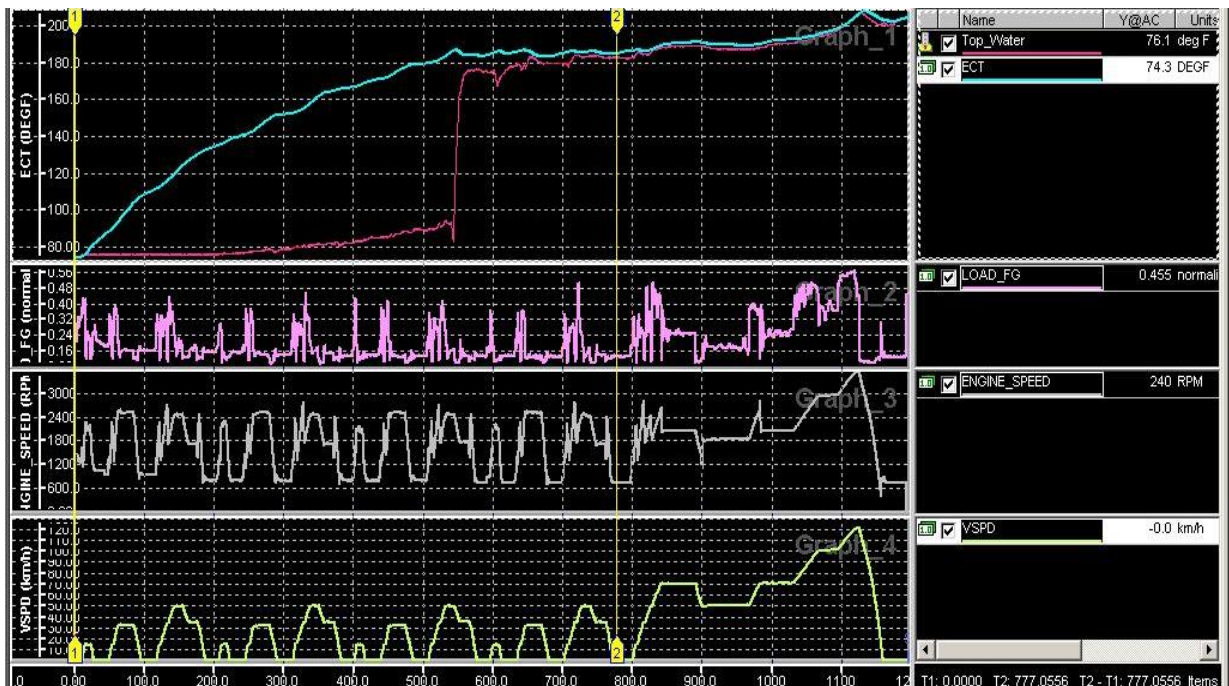
En la figura 2 se comparan las temperaturas registradas por el termistor ACT situado en el múltiple de admisión y el termopar instalado a un lado del sensor anterior.

Como se puede observar, las mediciones de ambos sensores convergen a los mismos valores, por lo que se confirma la correcta medida de la temperatura de interés. Durante el ciclo de prueba, las temperaturas del múltiple de admisión se comportan de la misma forma. En la primera fase, la de manejo en ciudad, se observa que la temperatura en el múltiple aumenta con una pendiente casi constante, pero no es así. Esto se comprueba durante la segunda fase. Cuando se tiene una condición de carga y RPM constantes, se tiene un flujo de aire constante a través del múltiple, por lo que el múltiple comienza a elevar su temperatura debido a que todo el tiempo se tienen las mismas condiciones de admisión de aire. Si esta condición se mantuviera indefinidamente, el múltiple alcanzaría una temperatura de equilibrio con la tasa constante de calor que sale del motor y se alcanzaría el estado estacionario, pero como se sabe, los tiempos de estabilización de los sistemas térmicos son muy grandes y durante esta prueba no se alcanza ese estado.

La condición en la cual el múltiple eleva más rápidamente la temperatura es cuando se mantiene estado de ralentí (velocidad de giro mínima para que una combustión estable sea posible), cuando el vehículo está detenido o durante la desaceleración. Lo anterior se debe a que en estas condiciones, se tiene el flujo de aire mínimo a través del múltiple y como se tiene un flujo másico menor, entonces éste puede elevar más su temperatura con una cantidad menor de calor.

Los puntos donde se puede observar que desciende la temperatura del múltiple, son los estados transitorios donde se demanda más carga al motor para poder aumentar la velocidad del vehículo. En estos puntos, entra una mayor cantidad de aire ambiental a menor temperatura que la que permanecía en el múltiple en el estado anterior, logrando un descenso global de la temperatura del múltiple durante estos estados transitorios. La temperatura en el múltiple tiene el mismo comportamiento durante la primera fase, pero debido a las condiciones de carga considerablemente menores, las variaciones son menos notorias debido a la escala de la gráfica.

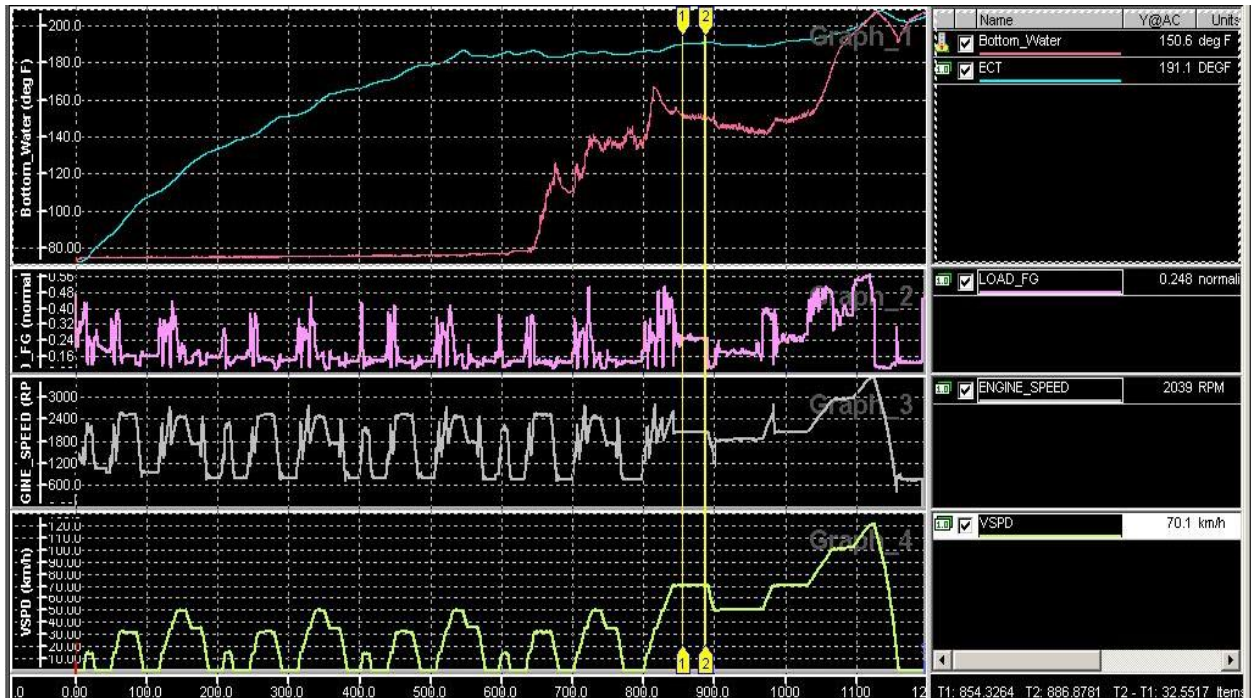
- Temperaturas del Refrigerante del motor



█ **Top_Water:** Temperatura del refrigerante del motor a la entrada del radiador medida con un termopar tipo K (°F)
█ **ECT:** Temperatura del refrigerante del motor medida en el bloque con el termistor de producción ECT (°F)
█ **LOAD_FG:** Carga del motor (adimensional)
█ **ENGINE_SPEED:** Velocidad de giro del cigüeñal del motor (RPM)
█ **VSPD:** Velocidad del auto (km/h)
 El eje horizontal representa el tiempo en segundos y es común para todos los trazos

Figura 3: Datos adquiridos del termopar instalado en la entrada del radiador y del sensor ECT

En la figura 3 se compara la lectura del termistor ECT con la del termopar tipo K instalado en la entrada del radiador. El termistor ECT se encuentra instalado en el bloque del motor, para que el módulo de control tenga una lectura constante de las condiciones de operación además de que este valor se usa en muchos otros cálculos. Como se observa en la gráfica, el ECT registra un aumento de la temperatura desde el arranque, condición que el termopar no registra. Esto se debe a que el termostato del auto permanece cerrado y no permite que el fluido refrigerante pase por el radiador, esto con el objetivo de que el motor alcance más rápidamente su temperatura de operación alrededor de 90°C (194°F). Como se observa en la gráfica, cuando la temperatura llega a los 186°F, el termostato se abre permitiendo el flujo del refrigerante a través del radiador y por lo tanto se observa un escalón en la temperatura que registra el termopar cuando esto sucede. Posterior a la apertura del termostato, se observa que las gráficas se empatan casi perfectamente por lo que ambos instrumentos están midiendo correctamente la temperatura del refrigerante.



■ **Bottom_Water:** Temperatura del refrigerante la salida del radiador medida con un termopar tipo K (°F)
■ **ECT:** Temperatura del refrigerante del motor medida en el bloque con el termistor de producción ECT (°F)
■ **LOAD_FG :** Carga del motor (adimensional)
■ **ENGINE_SPEED:** Velocidad de giro del cigüeñal del motor (RPM)
■ **VSPD:** Velocidad del auto (km/h)
 El eje horizontal representa el tiempo en segundos y es común para todos los trazos

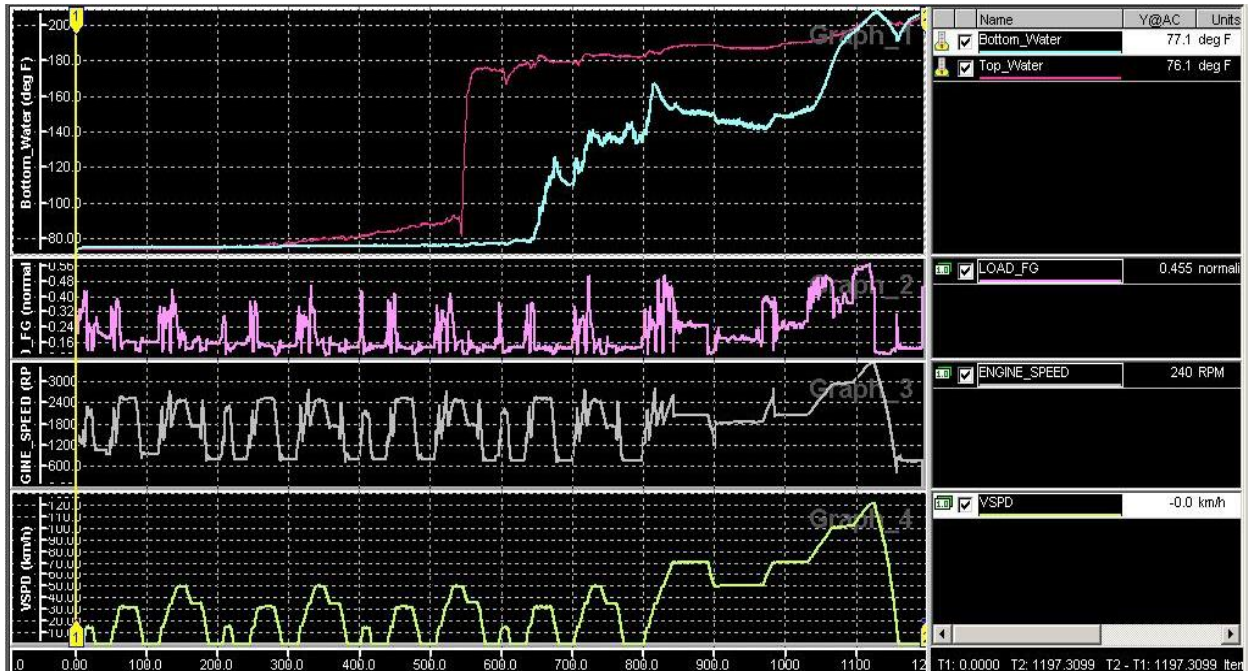
Figura 4: Datos adquiridos del termopar instalado en la salida del radiador y del sensor ECT

En la figura 4 se observa el trazo del ECT comparado con el termopar situado al final del radiador, donde el refrigerante ingresa de nuevo al bloque del motor. En estos trazos, se puede observar la función de enfriamiento del radiador, ya que la temperatura del termopar se sitúa casi siempre por debajo de la temperatura del bloque, lo que muestra cómo se está realizando la transferencia de calor del bloque hacia el ambiente. Como se puede observar, durante fases transitorias correspondientes a incrementos/disminuciones en la carga del motor se tienen variaciones en la temperatura del refrigerante. Cuando se tienen incrementos en la carga, aumenta la temperatura del refrigerante ya que el motor está produciendo más potencia durante ese periodo de tiempo y por lo tanto, rechaza más calor al refrigerante. Cuando se tienen desaceleraciones, se observa que la temperatura baja debido a que la carga en el motor es muy pequeña o nula y por lo tanto se rechaza el calor almacenado en el sistema sin que se produzca más por medio de la combustión. Cuando se tienen condiciones de carga relativamente constante, se observa que la curva de temperatura del termopar se mantiene casi constante o cercanamente plana debido a que se alcanza un estado parcialmente estacionario de operación.

Los incrementos de carga corresponden a los incrementos de velocidad en la gráfica mostrada, al igual que las disminuciones en la carga corresponden a las desaceleraciones. Las condiciones de carga relativamente constante se logran cuando el vehículo marcha a velocidad constante.

En la última fase de la prueba, cuando se le demanda más potencia al motor para alcanzar el trazo de velocidad de la prueba, se tiene el estado transitorio más prolongado y demandante, por lo que se puede observar que la gráfica del termopar y la del ECT llegan a tocarse momentáneamente e

inmediatamente cuando comienza la desaceleración, se observa cómo la temperatura registrada en el termopar baja debido a los motivos antes mencionados.

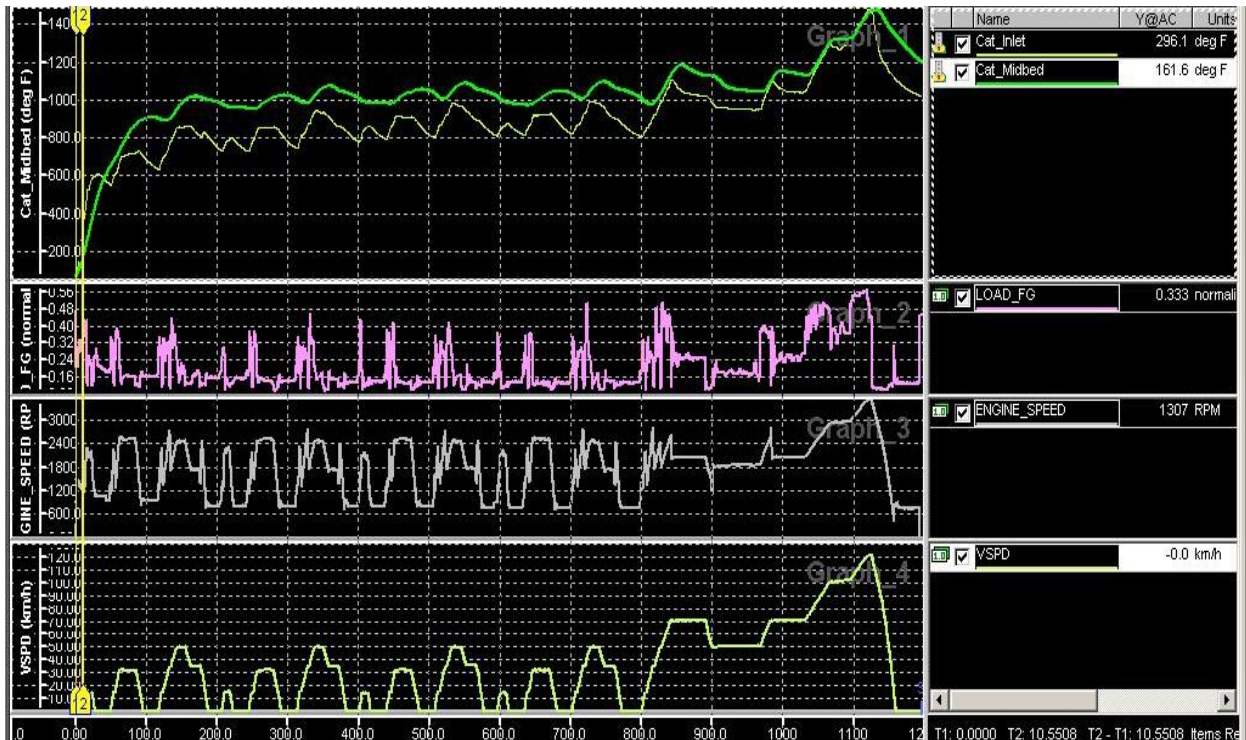


■ **Bottom_Water:** Temperatura del refrigerante la salida del radiador medida con un termopar tipo K (°F)
■ **Top_Water:** Temperatura del refrigerante del motor a la entrada del radiador medida con un termopar tipo K (°F)
■ **LOAD_FG :** Carga del motor (adimensional)
■ **ENGINE_SPEED:** Velocidad de giro del cigüeñal del motor (RPM)
■ **VSPD:** Velocidad del auto (km/h)
 El eje horizontal representa el tiempo en segundos y es común para todos los trazos

Figura 5: Datos adquiridos de los termopares instalados en la entrada y salida del radiador

En la figura 5, se comparan ambos termopares, el superior y el inferior. Al igual que en la imagen anterior, se puede observar el efecto de enfriamiento para el cual fue diseñado el radiador, ya que la temperatura inferior se mantiene por debajo de la superior en casi todo el trazo. También se puede observar el retraso que hay entre los aumentos y disminuciones en la temperatura, el más notorio es después de la apertura del termostato. Debido a que todo el fluido dentro del radiador se encuentra a temperatura ambiente, éste se tiene que desplazar en su totalidad hasta que la primera porción de fluido caliente que ingresó tras la apertura del termostato, alcance el termopar al final del radiador.

- Temperaturas en el Convertidor Catalítico



 Cat_Inlet: Temperatura de los gases de escape a la entrada del convertidor medida con un termopar tipo K (°F)
 Cat_Midbed: Temperatura de los gases de escape en el convertidor medida con un termopar tipo K (°F)
 LOAD_FG : Carga del motor (adimensional)
 ENGINE_SPEED: Velocidad de giro del cigüeñal del motor (RPM)
 VSPD: Velocidad del auto (km/h)
 El eje horizontal representa el tiempo en segundos y es común para todos los trazos

Figura 6: Datos adquiridos de los termopares instalados 1/2" antes y 1" después del ladrillo del convertidor catalítico.

En la figura 6 se observan las temperaturas de los termopares con los que se instrumentó el convertidor catalítico del motor. El termopar que se encuentra 1/2" antes del ladrillo del catalizador siempre presenta una temperatura menor que el termopar ubicado a 1" después del ladrillo del catalizador, excepto en el arranque. Esto se debe a las reacciones químicas que se producen dentro de él, con las cuales se reducen la cantidad de gases nocivos expulsados a la atmósfera. Estas reacciones son exotérmicas por lo que además de lo elevada que ya es la temperatura de los gases de escape a la salida del motor, éstos elevan su temperatura aún más debido a las reacciones químicas que los oxidan o reducen.

El comportamiento de las temperaturas en ambos puntos es muy similar. Cuando se tienen altas demandas, es decir, en condiciones de aumento en la velocidad, la temperatura de los gases aumenta debido a la cantidad mayor de calor por combustión añadida para alcanzar la potencia necesaria del motor. Las temperaturas en ambos puntos comienzan a descender cuando el motor se encuentra en condición de desaceleración, en la cual se deshabilitan los inyectores para ahorrar combustible, por lo tanto el único producto que sale por el convertidor es aire a menor temperatura que el convertidor mismo, por lo que se produce un efecto de refrigeración en estas condiciones. Ambas gráficas siguen el mismo comportamiento, con la diferencia de que la temperatura en el ladrillo del catalizador tiene un retraso con respecto a la de la entrada. Lo anterior se debe a que después de un cambio en los regímenes de flujo de gases, el catalizador tarda unos segundos en

adaptarse al nuevo régimen para producir las reacciones químicas después de un cambio de estado. Cuando el catalizador alcanza de nuevo su punto de funcionamiento óptimo, se presenta de nuevo la reacción exotérmica y por lo tanto se eleva la temperatura.



■ **Cat_Midbed:** Temperatura de los gases de escape en el convertidor medida con un termopar tipo K (°F)
■ **EXT_CMD:** Temperatura de los gases escape en el convertidor calculada por medio de un modelo (°F)
■ **LOAD_FG :** Carga del motor (adimensional)
■ **ENGINE_SPEED:** Velocidad de giro del cigüeñal del motor (RPM)
■ **VSPD:** Velocidad del auto (km/h)
 El eje horizontal representa el tiempo en segundos y es común para todos los trazos

Figura 7: Datos adquiridos del termopar instalado 1" después del ladrillo del convertidor catalítico y del modelo que infiere dicha temperatura

El convertidor catalítico de un auto de producción, no es monitoreado por ningún instrumento debido a las condiciones altamente dañinas en las que opera. Cualquier instrumento colocado para monitorearlo podría sufrir daños en cualquier momento además de que su precio sería bastante elevado. En lugar de eso, la unidad de control del motor tiene modelos con los cuales infiere la temperatura en el convertidor catalítico dependiendo de los puntos de operación en los que se encuentre el motor. Estos modelos emplean la temperatura del sensor ECT, datos experimentales de temperatura obtenidos en condiciones de carga y RPM fijos, entre otros para predecir la temperatura en la que se encuentra operando el convertidor. Este modelo cuenta con un factor de seguridad en su predicción, el cual se puede observar en la temperatura inferida (trazo en verde). En la figura 7, se puede observar que esta predicción sigue casi perfectamente a la temperatura real obtenida del termopar instalado con la instrumentación, con la diferencia de que en todo momento, la temperatura inferida se encuentra por encima de la temperatura real aproximadamente 30°F. Esto se debe a una sobre estimación de la temperatura del catalizador, para que cuando se alcancen temperaturas de operación críticas (alrededor de 1900°F), se pueda comandar a tiempo el modo de operación "protección del catalizador" con el cual se logra enfriar el ladrillo a temperaturas seguras por medio de un régimen de inyección rico en combustible. Cuando

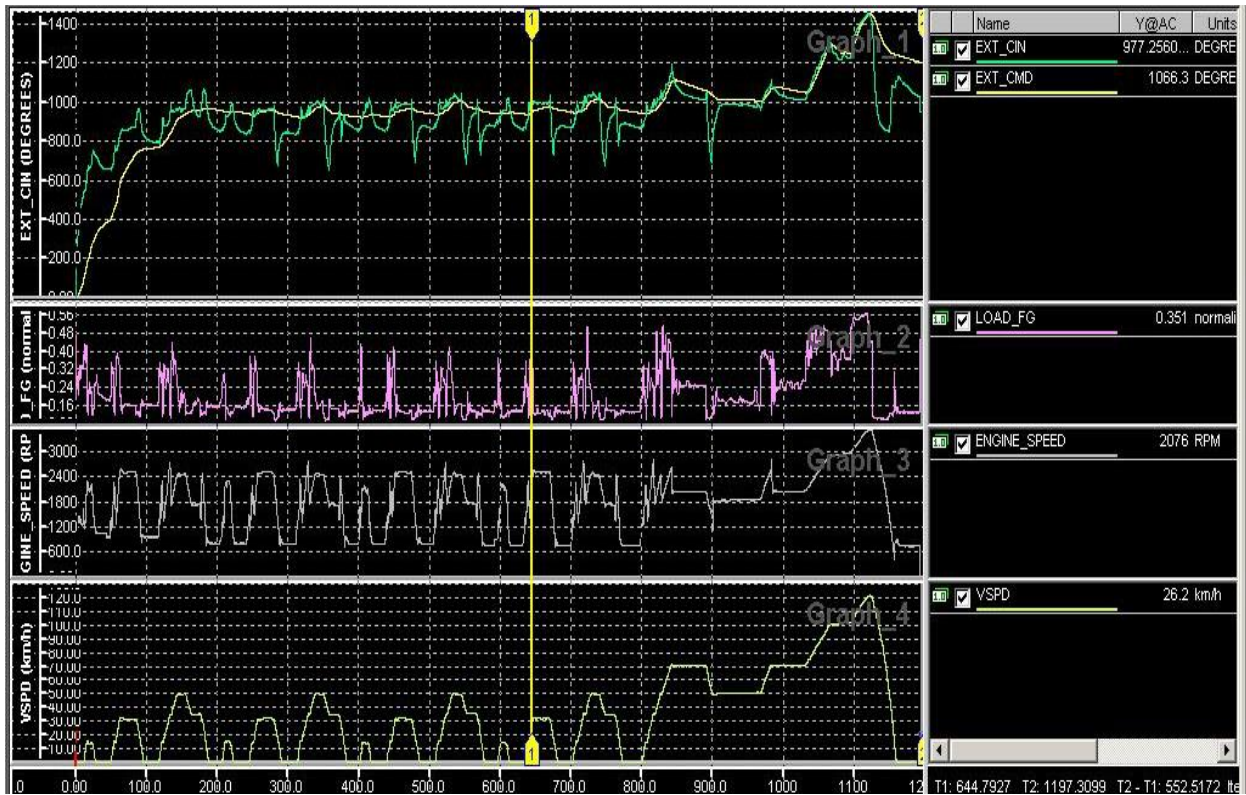
el catalizador alcanza 1900°F por medio del modelo, en realidad este se encuentra en 1870°F, lo que ofrece un margen de seguridad en el cual se puede comenzar a proteger el catalizador antes de que pueda sufrir daños.



EXT_CIN: Temperatura de los gases escape a la entrada del convertidor calculada por medio de un modelo (°F)
 Cat_Inlet: Temperatura de los gases de escape a la entrada del convertidor medida con un termopar tipo K (°F)
 LOAD_FG : Carga del motor (adimensional)
 ENGINE_SPEED: Velocidad de giro del cigüeñal del motor (RPM)
 VSPD: Velocidad del auto (km/h)
 El eje horizontal representa el tiempo en segundos y es común para todos los trazos

Figura 8: Datos adquiridos del termopar instalado 1/2" antes del ladrillo del convertidor catalítico y del modelo que infiere dicha temperatura

En la figura 8 se muestran las temperaturas del termopar a la entrada del catalizador (amarillo) y la inferida por modelo (verde). Como se puede observar, el modelo sigue a la temperatura real salvo en algunos puntos, esto se debe a que el modelo es menos robusto para esta zona que para la zona interior del catalizador. Lo anterior se debe a que la temperatura en el ladrillo es más elevada y por lo tanto es más crítica. Al igual que en el gráfico anterior, la temperatura inferida es mayor que la real para agregar un factor de seguridad.



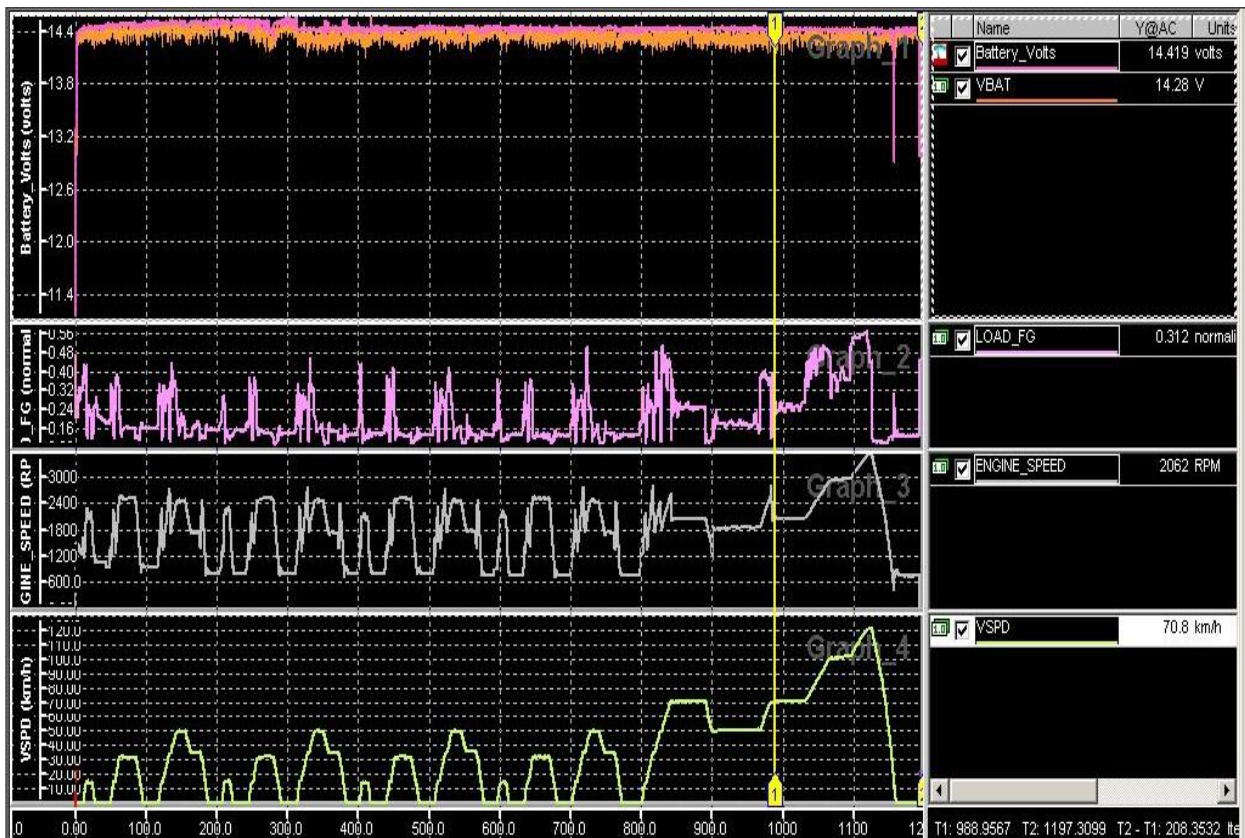
■ **EXT_CIN:** Temperatura de los gases escape a la entrada del convertidor calculada por medio de un modelo (°F)
■ **EXT_CMD:** Temperatura de los gases escape en el convertidor calculada por medio de un modelo (°F)
■ **LOAD_FG:** Carga del motor (adimensional)
■ **ENGINE_SPEED:** Velocidad de giro del cigüeñal del motor (RPM)
■ **VSPD:** Velocidad del auto (km/h)

El eje horizontal representa el tiempo en segundos y es común para todos los trazos

Figura 9: Se muestra la comparación entre ambas temperaturas inferidas, la de entrada (verde) y la del interior del ladrillo del catalizador (amarilla).

Lecturas Analógicas

- Voltaje de Batería

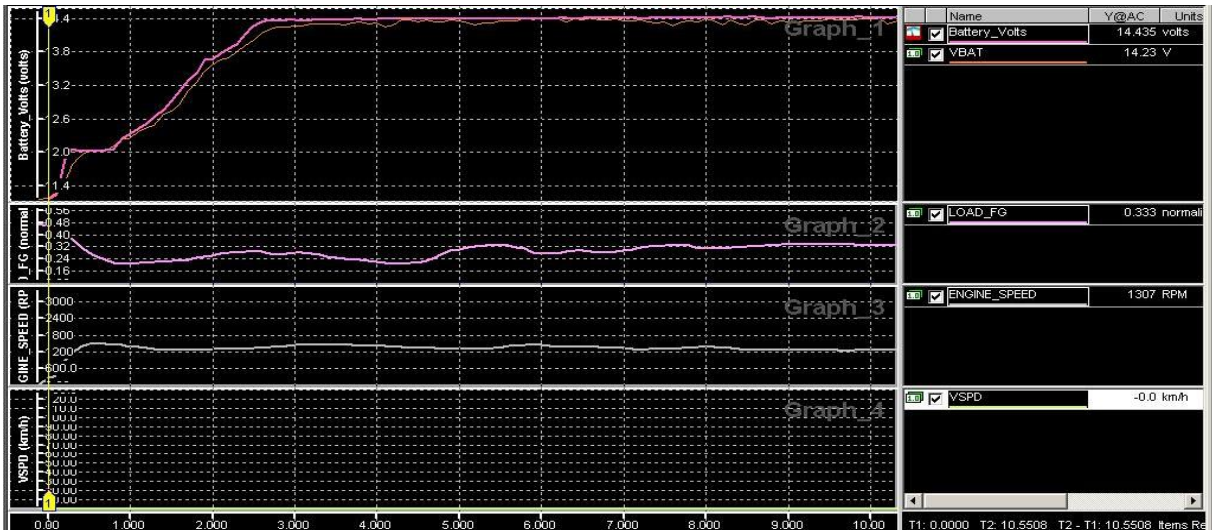


Battery_Volts: Voltaje medido en los bornes de la batería (V)
VBAT: Voltaje de la batería medido por la unidad de control del motor (V)
LOAD_FG: Carga del motor (adimensional)
ENGINE_SPEED: Velocidad de giro del cigüeñal del motor (RPM)
VSPD: Velocidad del auto (km/h)
 El eje horizontal representa el tiempo en segundos y es común para todos los trazos

Figura 10: Comparación entre la lectura del voltaje de batería leído por medio de la instrumentación y la leída por la unidad de control del motor

En la figura 10 se comparan la medición del voltaje de batería calculado por la unidad de control del motor y la que se obtiene por medio de la instrumentación adicional del vehículo. En ambos casos se observa cómo el voltaje sube casi instantáneamente de 11.1V a más de 14V después del arranque del motor. Esto se debe a que cuando el motor está en marcha, el alternador comienza a cargar la batería alcanzando un valor por encima de los 14V para la condición de carga. VBAT corresponde a la medición de la unidad de control y Battery_Volts a la medición de la instrumentación instalada.

En la siguiente figura ampliando la escala en el tiempo se observa con mayor detalle el arranque:



■ **Battery_Volts**: Voltaje medido en los bornes de la batería (V)
■ **VBAT**: Voltaje de la batería medido por la unidad de control del motor (V)
■ **LOAD_FG**: Carga del motor (adimensional)
■ **ENGINE_SPEED**: Velocidad de giro del cigüeñal del motor (RPM)
■ **VSPD**: Velocidad del auto (km/h)
 El eje horizontal representa el tiempo en segundos y es común para todos los trazos

Figura 11: Ampliación de la zona de arranque de las lecturas de voltaje de batería

- Sonda Lambda



■ **Lambda_ES635**: Relación Lambda medida por la sonda adicional instrumentada (adimensional)
■ **LAM_30MS[0]**: Relación Lambda medida por la sonda de producción (adimensional)
■ **LOAD_FG**: Carga del motor (adimensional)
■ **ENGINE_SPEED**: Velocidad de giro del cigüeñal del motor (RPM)
■ **VSPD**: Velocidad del auto (km/h)
 El eje horizontal representa el tiempo en segundos y es común para todos los trazos

Figura 12: Comparación de la lectura de la sonda lambda (UEGO) instrumentada y la de producción en una condición de carga y velocidad constante

En la figura 12 se pueden observar las lecturas de la relación aire/combustible obtenidas por medio de las sondas lambda de producción del auto y la sonda adicional que se instrumentó. Se hace zoom en una zona de operación de la prueba en la que se tienen condiciones de operación de carga y velocidades constantes, se puede observar como la unidad de control mantiene en todo momento oscilando la relación alrededor de 1, por lo que se tienen condiciones estequiométricas de operación. Ambas gráficas, la de fábrica (amarilla) y la instrumentada (azul), convergen a los mismos valores por lo que se corrobora que los datos obtenidos por la unidad de fábrica están dentro de los valores reales correctos.

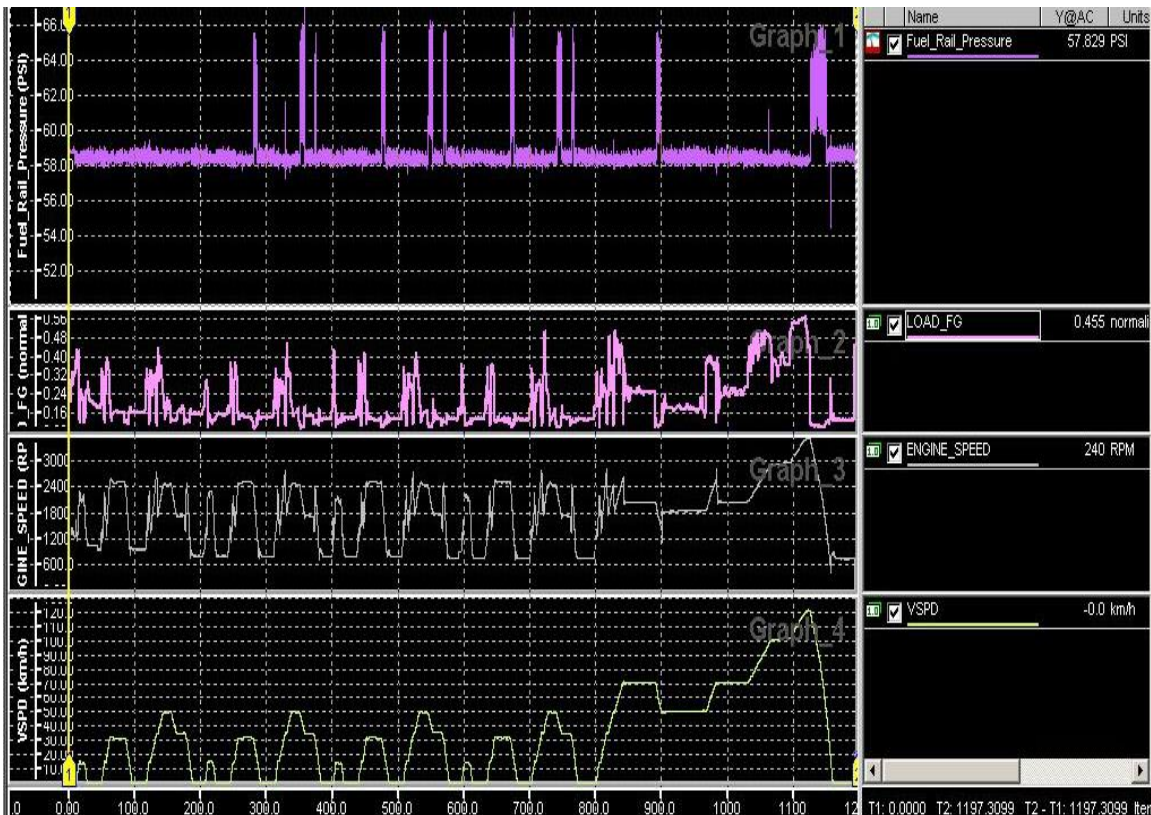


■ Lambda_ES635: Relación Lambda medida por la sonda adicional instrumentada (adimensional)
■ LAM_30MS[0]: Relación Lambda medida por la sonda de producción (adimensional)
■ LOAD_FG : Carga del motor (adimensional)
■ ENGINE_SPEED: Velocidad de giro del cigüeñal del motor (RPM)
■ VSPD: Velocidad del auto (km/h)
 El eje horizontal representa el tiempo en segundos y es común para todos los trazos

Figura 13: Comparación de la lectura de la sonda lambda (UEGO) instrumentada y la de producción en una condiciones de aceleración y desaceleración.

En la figura 13 se observa cómo se comanda la desactivación de los inyectores durante las condiciones de desaceleración. Se puede observar cómo ambos instrumentos registran valores sumamente pobres durante las caídas en el trazo de velocidad. Otras condiciones donde las relaciones se mueven hacia el lado pobre es cuando se realiza un cambio en la caja de velocidades, obsérvese que durante un aumento en el trazo de velocidad lineal, se tienen varios aumentos y caídas en la velocidad de giro del motor, cada caída después de un pico, corresponde a un cambio de marcha en la caja. Nótese que en cada pico debido al cambio, se empobrece la mezcla debido a que se deja de aplicar momentáneamente el acelerador para realizar el cambio.

- Presión en el Riel de Combustible



Fuel_Rail_Pressure: Presión en el riel de combustible medido con un transductor piezoeléctrico (PSI)
 LOAD_FG : Carga del motor (adimensional)
 ENGINE_SPEED: Velocidad de giro del cigüeñal del motor (RPM)
 VSPD: Velocidad del auto (km/h)
 El eje horizontal representa el tiempo en segundos y es común para todos los trazos

Figura 14: Lectura de los datos obtenidos del sensor de presión instalado en el riel de combustible

En la figura 14 se observa la presión del riel de combustible durante la prueba. La bomba de gasolina está diseñada para entregar aproximadamente 60 PSI de presión para que los inyectores suministren la cantidad de combustible correcta en cada evento. Como se puede observar en toda la gráfica los valores oscilan entre 58 PSI, por lo que se corrobora que la bomba está funcionando correctamente en todo momento. Durante algunas desaceleraciones drásticas, debido a la desactivación de los inyectores, se corta el flujo de combustible y se tienen picos de presión de más de 60 PSI en el riel. Cuando el motor regresa a condiciones de operación normales, se observa cómo la presión del riel regresa de nuevo a sus valores normales.



- Fuel_Rail_Pressure:** Presión en el riel de combustible medido con un transductor piezoeléctrico (PSI)
 - LOAD_FG:** Carga del motor (adimensional)
 - ENGINE_SPEED:** Velocidad de giro del cigüeñal del motor (RPM)
 - VSPD:** Velocidad del auto (km/h)
- El eje horizontal representa el tiempo en segundos y es común para todos los trazos

Figura 15: Lectura de los datos obtenidos del sensor de presión instalado en el riel de combustible durante un evento de desaceleración.

Capítulo 6: Regulación Mexicana de Emisiones de Escape y Ciclo de Prueba Tipo Europeo para Certificación.

Puntos Clave de la NOM – 042 – SEMARNAT – 2003

Cualquier armadora de vehículos que pretenda vender autos con motor de combustión interna en territorio mexicano, debe cumplir con un cierto límite de emisiones de escape estipulado en la NOM – 042 – SEMARNAT – 2003. Esta norma oficial mexicana estipula los límites de emisiones de escape según el peso del vehículo dividido en tres segmentos siendo el más pesado un vehículo no mayor a los 3857 kg.

Los vehículos se encuentran divididos según su peso de la siguiente forma:

- Camión ligero clase 1 (CL) / Vehículo utilitario Clase 1 (VU): Camión ligero, Vehículo utilitario cuya masa de referencia es hasta 1305 kg.
- Camión ligero clase 2 (CL) / Vehículo utilitario Clase 2 (VU): Camión ligero, Vehículo utilitario cuya masa de referencia es mayor a 1305 kg y hasta 1760 kg.
- Camión ligero clase 3 (CL) / Vehículo utilitario Clase 3 (VU): Camión ligero, Vehículo utilitario cuya masa de referencia es mayor a 1760 kg y hasta 3857 kg.

A continuación se muestra la tabla que presenta la NOM con las emisiones límite de escape que deben de cumplir los vehículos según su categoría mencionada en la parte superior. [2]

TABLA 2											
Límites máximos permisibles de emisión para vehículos que utilizan gasolina, gas licuado de petróleo, gas natural y diesel.											
Estándar de durabilidad a 100,000 km											
Estándar	Clase	CO g/km		HC g/km	HC + NOx g/km	NOx g/km		Part (1) g/km		HCev (2) g/prueba	
		gasolina, gas L.P. y gas natural	diesel	gasolina, gas L.P. y gas natural	diesel	gasolina, gas L.P. y gas natural	Diesel	gasolina, gas L.P. y gas natural	Diesel	gasolina y gas L.P.	Diesel
B	VP										
	CL y VU Clase 1	1.25	0.64	0.125	0.56	0.100	0.50	-	0.050	2.0	-
	CL y VU Clase 2	2.26	0.80	0.162	0.72	0.125	0.65	-	0.070		
	CL y VU Clase 3	2.83	0.95	0.200	0.86	0.137	0.78	-	0.100		
C	VP										
	CL y VU Clase 1	1.00	0.50	0.10	0.30	0.08	0.25	-	0.025	2.0	-
	CL y VU Clase 2	1.81	0.63	0.13	0.39	0.10	0.33	-	0.040		
	CL y VU Clase 3	2.27	0.74	0.16	0.46	0.11	0.39	-	0.060		

(1) Aplica sólo para vehículos a diesel.

Tabla con los límites de emisiones permitidos, tomada de la NOM – 042- SEMARNAT – 2003. El Fiesta 2014 entra en la categoría VU Clase 1 debido a su masa de 1247kg.

Para la obtención del Certificado de esta NOM en cuanto a los límites máximos permisibles y el estándar de durabilidad de la presente tabla, se aceptará un informe de resultados de laboratorios acreditados y aprobados, carta o constancia del fabricante que incluya informe de resultados, o certificado emitido por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de América, o por organismos de certificación reconocidos en la Unión Europea o Japón, o bien, por otras autoridades de protección ambiental correspondientes al país de origen del vehículo o el país donde se realizan las pruebas y se demuestre que cumplen con las disposiciones de la NOM.

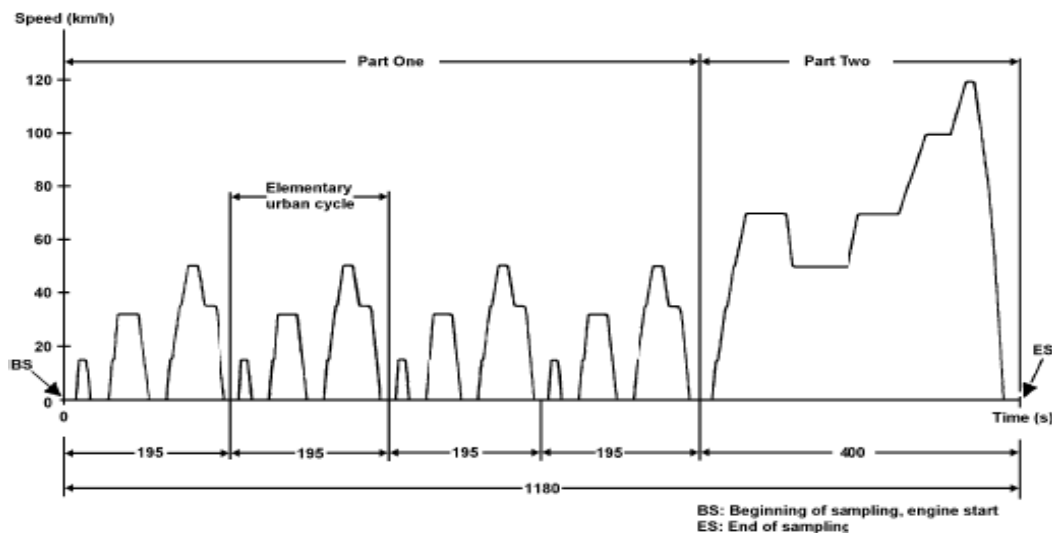
Por los motivos enlistados anteriormente, la mayoría de los vehículos vendidos en México presentan un certificado de acreditación de cumplimiento siguiendo las metodologías de prueba de la Unión Europea, ya que éstas se aceptan según lo establecido en la NOM para obtener el certificado de homologación y posterior aprobación para la venta en México del Vehículo, además de que los límites de emisiones de escape estipulados en la NOM – 042, son exactamente los mismos que los que se exigen en la Normativa de la Unión Europea Etapa IV (EURO IV).

Descripción breve del ciclo europeo para la certificación del cumplimiento los límites en emisiones de escape

El ciclo europeo debe de ser realizado en una celda con temperatura controlada entre 15 y 30°C, sobre un dinamómetro que simule la carga de camino sobre las ruedas con tracción del automóvil sujeto a la prueba. A lo largo del ciclo, se toman muestras de las emisiones de escape, las cuales se diluyen y almacenan con aire ambiente en dos bolsas. El ciclo se divide en dos etapas, uno que simula manejo en ciudad y otro que simula el manejo sobre vías rápidas o carreteras. La primera de las bolsas es llenada con las muestras tomadas durante la primera fase y en la segunda bolsa se almacenan las de la siguiente fase.

Durante el ciclo también se toman muestras de los gases de escape antes y después de pasar por el convertidor catalítico, esto con el fin de monitorear la eficiencia del convertidor a lo largo de la prueba.

A continuación se muestra una imagen del trazo de velocidades que debe de seguir el vehículo a lo largo de la prueba para simular las condiciones de manejo antes mencionadas.



Perfil de velocidades a seguir durante la prueba, tomado de la normativa europea 70/220/CEE

Los operadores manejan el automóvil sobre el dinamómetro y siguen el trazo mostrado anteriormente para realizar la prueba. Los puntos que especifica la norma en los que se debe de llevar a cabo un cambio de marcha o donde se debe embragar y o desembragar del clutch, se muestran en pantalla sobre el trazo de velocidad.

Las cargas de camino están especificadas también en la norma europea, según el peso del vehículo. El dinamómetro simulará la fuerza de arrastre, fricción y la debida a la inercia del auto y de sus componentes por medio de un polinomio cuadrático, para el cual sus coeficientes están establecidos en la norma. El polinomio que se emplea es el siguiente:

$$F = (a + bV^2) \pm 0.1F_{80} \text{ [ii]}$$

Donde:

F = Es la fuerza total absorbida por el dinamómetro

a = Coeficiente que representa la resistencia por rodamiento

b = Coeficiente que representa la resistencia del aire

V = Velocidad del auto

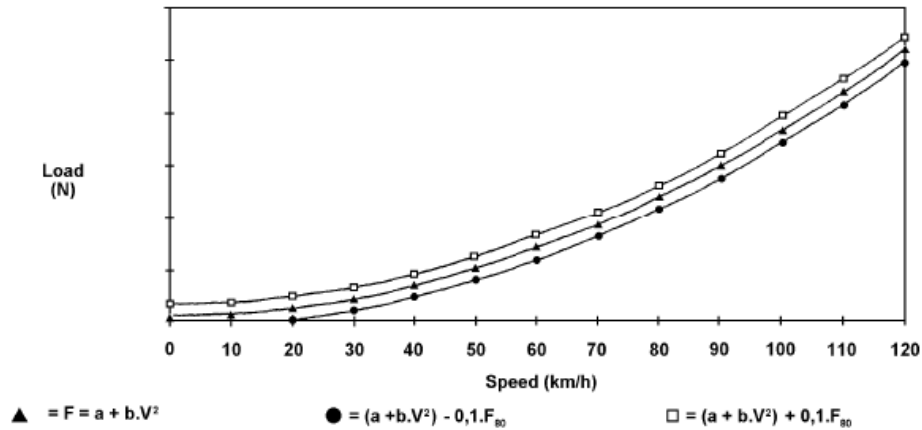
F_{80} = Carga del vehículo a 80 km/h

Los coeficientes y la inercia equivalente pueden ser encontrados en la siguiente tabla según lo que establece la norma europea.

Reference mass of vehicles	Equivalent inertia	Power and load absorbed by the dynamometer at 80 km/h		Coefficients	
		kW	N	a	b
RW (kg)	kg			N	N/(km/h) ²
RW ≤ 480	455	3.8	171	3.8	0.0261
480 < RW ≤ 540	510	4.1	185	4.2	0.0282
540 < RW ≤ 595	570	4.3	194	4.4	0.0296
595 < RW ≤ 650	625	4.5	203	4.6	0.0309
650 < RW ≤ 710	680	4.7	212	4.8	0.0323
710 < RW ≤ 765	740	4.9	221	5.0	0.0337
765 < RW ≤ 850	800	5.1	230	5.2	0.0351
850 < RW ≤ 965	910	5.6	252	5.7	0.0385
965 < RW ≤ 1 080	1 020	6.0	270	6.1	0.0412
1 080 < RW ≤ 1 190	1 130	6.3	284	6.4	0.0433
1 190 < RW ≤ 1 305	1 250	6.7	302	6.8	0.0460
1 305 < RW ≤ 1 420	1 360	7.0	315	7.1	0.0481
1 420 < RW ≤ 1 530	1 470	7.3	329	7.4	0.0502
1 530 < RW ≤ 1 640	1 590	7.5	338	7.6	0.0515
1 640 < RW ≤ 1 760	1 700	7.8	351	7.9	0.0536
1 760 < RW ≤ 1 870	1 810	8.1	365	8.2	0.0557
1 870 < RW ≤ 1 980	1 930	8.4	378	8.5	0.0577
1 980 < RW ≤ 2 100	2 040	8.6	387	8.7	0.0591
2 100 < RW ≤ 2 210	2 150	8.8	396	8.9	0.0605
2 210 < RW ≤ 2 380	2 270	9.0	405	9.1	0.0619
2 380 < RW ≤ 2 610	2 270	9.4	423	9.5	0.0646
2 610 < RW	2 270	9.8	441	9.9	0.0674

Tabla de coeficientes de carga, tomada de la normativa europea 70/220/CEE

Después de seleccionar los valores correspondientes según la categoría en la que entren los automóviles de acuerdo a su peso, el dinamómetro genera las siguientes curvas, con las cuales se simulan las cargas de camino durante la prueba, dependiendo de la velocidad.



Curvas generadas con los valores de la tabla de coeficientes de carga [3]

Más información sobre los equipos para el análisis de muestras, los procedimientos y especificaciones de las prueba pueden ser encontrados en la norma europea 70/220/CEE.

Con los datos revisados anteriormente, se puede clasificar al Ford Fiesta, el cual es el vehículo que se va a someter a las pruebas de emisiones de escape con el fin de ver si cumple con los requerimientos de la NOM – 042.

El Ford Fiesta es un vehículo de pasajeros con masa de 1247kg en su versión sedán. Siendo un vehículo de pasajeros con la masa mencionada anteriormente, el Ford Fiesta 2014 se clasifica como un vehículo utilitario (VU) Clase 1 y debe de cumplir con los siguientes límites de emisiones contaminantes según la NOM – 042:

THC (gr/Km)	CO (gr/Km)	NOx (gr/Km)
0.100	1.000	0.080

Estos son los límites en emisiones de escape para poder homologar el vehículo en México. Pero el objetivo de ingeniería de Ford se fijó 20% debajo de los valores límite en la norma, por lo que si el vehículo no cumple con los siguientes valores, para Ford, no cumple con sus requerimientos y el vehículo no se puede vender:

THC (gr/Km)	CO (gr/Km)	NOx (gr/Km)
0.08	0.800	0.064

En México se tiene que cumplir con un estándar de durabilidad a 100,000 km, durante el cual el vehículo debe de cumplir con los límites de emisiones permitidos. Este estándar de durabilidad según la norma Europea se puede simular empleando convertidores catalíticos envejecidos. El envejecido consiste en una serie de ciclos de uso en un banco especializado, el cual les genera un deterioro equivalente a esa cantidad de kilómetros recorridos. Con estos catalizadores deteriorados se corren las pruebas de emisiones, por lo que si cumplen los requerimientos con esas condiciones de deterioro del convertidor, los vehículos están dentro de los estándares de durabilidad.

La norma europea permite una segunda opción para simular el deterioro del catalizador y garantizar el estándar de durabilidad. Esta segunda opción consiste en multiplicar los resultados de la prueba de emisiones por un factor de deterioro de 1.2, lo cual eleva en un 20% los resultados obtenidos durante la prueba y si estos se encuentran por debajo de los límites, el coche cumple con los requerimientos para ser homologado.

La segunda opción es la que se utiliza en Ford de México para comparar los resultados obtenidos, con los requerimientos de Ford.

Los coeficientes de carga de camino para el dinamómetro que se emplean en la prueba, según lo establecido en la norma europea son los siguientes:

$$a = 6.8 \text{ N}$$

$$b = 0.046 \text{ N}/(\text{km/h})^2$$

$$F_{80} = 302 \text{ N}$$

Capítulo 7: Control de Emisiones de Escape en Vehículos con Motor de Combustión Interna

Convertidor Catalítico

Los automóviles utilizan los convertidores catalíticos para reducir considerablemente la emisión de gases nocivos, para ello, el sistema de control del motor mantiene la relación aire - combustible lo más cercana posible a la estequiometría. Teóricamente, con esta relación se tiene combustión completa, es decir, todo el combustible reacciona con todo el oxígeno de la mezcla. El punto estequiométrico de la gasolina es aproximadamente 14.7:1, lo que quiere decir 14.7 unidades de masa de aire por 1 de masa de combustible.

La relación aire combustible varía con respecto al punto ideal durante un ciclo de manejo, a veces se tiene una mezcla pobre, es decir, una relación mayor a 14.7 y a veces una mezcla rica, es decir, una relación menor a 14.7. Lo anterior produce que se tengan diferentes tipos de emisiones no deseadas según varíe la relación aire combustible.

La mayor parte de las emisiones que presenta un automóvil son las siguientes:

Gas Nitrógeno (N_2): Este gas compone el 79% del aire y en una situación ideal de combustión (mezcla perfecta de aire y combustible con una relación estequiométrica exacta), es no reactivo por lo que entra y sale de la cámara de combustión sin sufrir cambios. En los motores reales es prácticamente imposible tener una combustión perfecta y en algunas ocasiones se tienen condiciones de exceso de aire (mezcla pobre en combustible) lo que facilita que se alcancen temperaturas instantáneas durante el proceso de oxidación muy elevadas (mayores a $1350^\circ C$), lo que ocasiona que una pequeña porción del nitrógeno alcance una temperatura en la que se vuelve reactivo y por lo tanto una pequeña porción reacciona con el oxígeno y se expulsan óxidos de nitrógeno.

Dióxido de Carbono (CO_2): Este es uno de los productos de la combustión, el carbono presente en el combustible forma enlaces con el oxígeno del aire.

Vapor de Agua (H_2O): También uno de los productos de la combustión, el hidrógeno presente en el combustible, reacciona con el oxígeno en el aire y forma estas moléculas.

Las emisiones anteriores componen la mayoría del volumen de los gases de escape y son gases no dañinos para la salud. Como la combustión nunca es perfecta, un pequeño volumen de gases dañinos es liberado junto con el resto. Entre los gases dañinos para la salud se encuentran los siguientes:

- **Monóxido de Carbono (CO):** Es un gas inodoro e incoloro sumamente tóxico, si es respirado en grandes cantidades puede causar la muerte.
- **Hidrocarburos no quemados (THC):** El smog se compone principalmente de hidrocarburos no quemados, es decir, vapores del combustible no quemado.
- **Óxido de Nitrógeno: (NO y NO_2 , en conjunto NO_x):** Forman parte del smog y contribuyen a la formación de lluvia ácida y también producen irritación en las mucosas humanas.

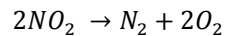
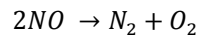
Los convertidores catalíticos están diseñados para reducir la cantidad de los gases dañinos mencionados anteriormente, expulsados a la atmósfera.

En química, un catalizador es una sustancia que causa o acelera una reacción química sin ser afectado por la misma. Los catalizadores participan en una reacción química mejorando la velocidad de reacción, pero no son reactivos ni productos de la reacción que catalizan.

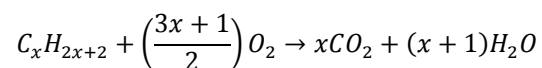
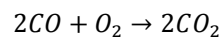
Dentro de los convertidores catalíticos existen dos tipos de reacciones, una de reducción y otra de oxidación. En ambos casos se utiliza una estructura cerámica, con una cubierta de catalizador metálico, normalmente platino, rodio y/o paladio. El concepto básico es crear una superficie que produzca el máximo contacto posible de los gases de escape con los catalizadores metálicos, lo que al mismo tiempo minimiza la cantidad de catalizador requerido, ya que los materiales son extremadamente caros.

La mayoría de los automóviles modernos están equipados con catalizadores de tres vías, esto se refiere a las emisiones de escape que ayudan a reducir.

El catalizador reductor es la primera etapa del convertidor catalítico. Esta fase utiliza platino y rodio para reducir las emisiones de NO_x . Cuando una molécula de NO o NO_2 entra en contacto con el catalizador, éste desprende el átomo de nitrógeno de la molécula y la retiene en él, liberando el oxígeno en forma de O_2 . El átomo de nitrógeno se une posteriormente con otro que también estaba retenido en el catalizador y forma una molécula de N_2 . A continuación, se muestran las ecuaciones balanceadas de la reacción:



El catalizador de oxidación es la segunda etapa del convertidor catalítico. Éste se encarga de reducir los hidrocarburos no quemados y el monóxido de carbono, oxidándolos por medio de un catalizador hecho de platino y paladio. Este catalizador ayuda a que el CO y los HC no quemados, reaccionen con el oxígeno remanente en el gas de escape. A continuación las ecuaciones químicas balanceadas de las reacciones:



La estructura más común de los convertidores catalíticos para maximizar el contacto de los gases con el catalizador, es la de tipo "panal de abeja". En la figura 16 se pueden observar un convertidor catalítico, sus dos etapas y su estructura interna:

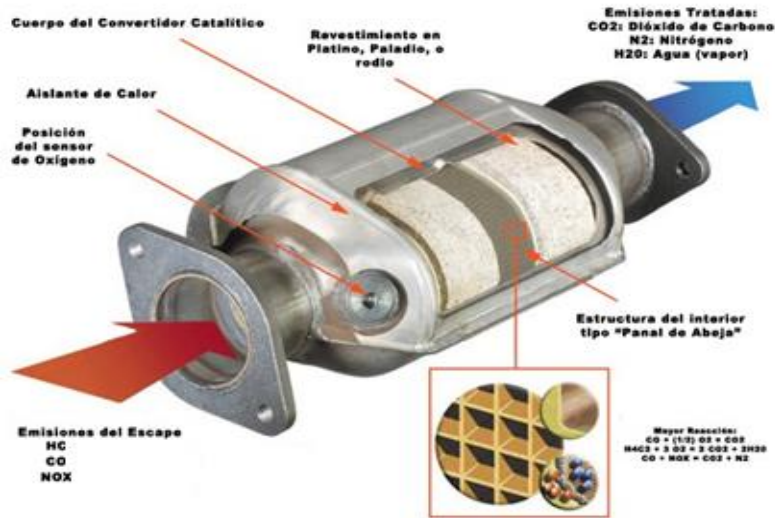


Figura 16: Convertidor catalítico y su estructura interna

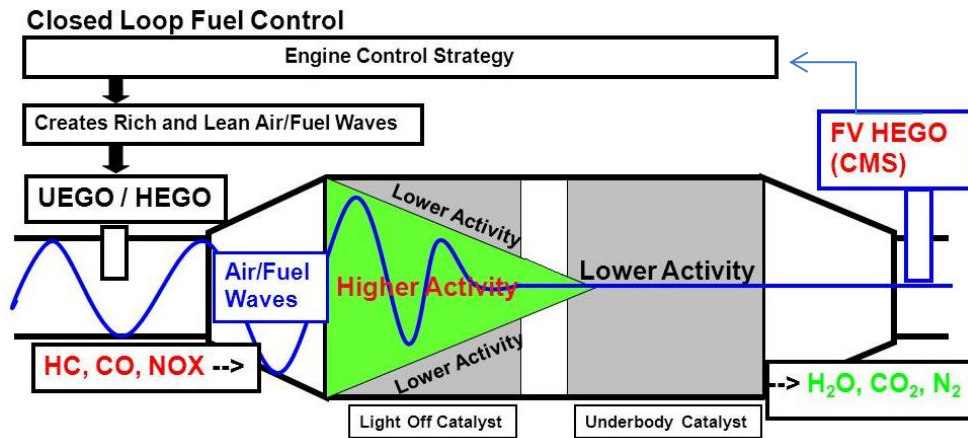
Funcionamiento del control de emisiones del motor

El convertidor catalítico está equipado con dos sondas Lambda, las cuales monitorean que la mayoría del tiempo, el motor se encuentre funcionando dentro del rango de la estequiometría y al mismo tiempo se monitorea la eficiencia del catalizador. Con esto se busca que el convertidor se encuentre trabajando en su máxima eficiencia, en todos los puntos de operación del motor y por lo tanto, se expulse la menor cantidad posible de gases dañinos a través del escape.

La sonda que monitorea los gases de escape antes de que sean procesados por el catalizador, es una del tipo UEGO, la segunda, que monitorea los gases ya procesados por el catalizador, es del tipo HEGO.

El sistema de inyección de combustible del motor, sigue un patrón de inyección que oscila periódicamente de la estequiometría, creando una onda que oscila entre una mezcla pobre y una rica. Este modo de operación es necesario para dotar al convertidor catalítico con el oxígeno necesario para que pueda llevar a cabo las reacciones de oxidación (cuando se tiene mezcla pobre) y al mismo tiempo para lograr la máxima eficiencia de conversión en NOx (mezcla rica). Esta oscilación entre la zona rica y pobre le da el tiempo suficiente al catalizador para poder convertir los diferentes gases nocivos según la zona donde se encuentre la relación aire combustible. El objetivo de este modo de operación es lograr la máxima eficiencia de conversión en el catalizador.

El sensor UEGO ubicado en la zona anterior al convertidor catalítico, monitorea que el sistema de inyección siga la onda comandada y se encarga de dar la retroalimentación necesaria para que el sistema oscile entre la zona estequiométrica. El sensor HEGO ubicado después del catalizador, se encarga de indicarle al sistema de control, qué tan bien está funcionando el convertidor comparando la señal de voltaje que se entrega de la lectura actual de los gases ya procesados por el catalizador, con una tabla de voltajes experimental donde se comprobó que teniendo dicha lectura, el convertidor funciona con su máxima eficiencia. A continuación se muestra un diagrama que ilustra el funcionamiento descrito anteriormente:



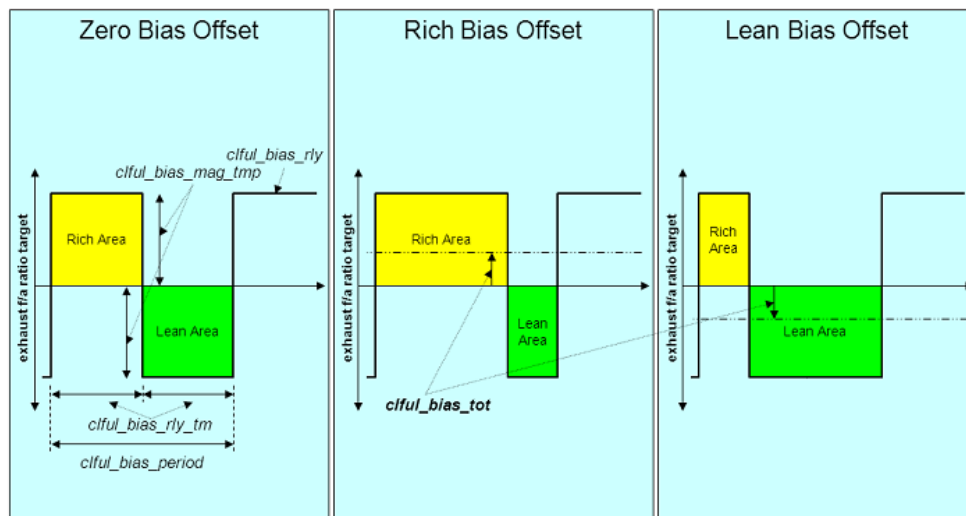
Esquema básico del funcionamiento del control de emisiones [4]

Offset BIAS

Para fines del algoritmo y control, el sistema funciona con la variable Phi. Phi es el inverso de Lambda ($\Phi = 1/\Lambda$), por lo que para esta variable, los valores mayores a 1 representan lecturas ricas y los que son menores a 1 representan lecturas pobres.

El BIAS, es un offset que se aplica al valor medio de la onda de inyección. Cuando el BIAS se encuentra en cero, significa que la onda permanece el mismo tiempo del lado rico que del pobre, es decir que su valor medio corresponde al estequiométrico.

Esta desviación del valor medio es modificada por la estrategia de control del motor, con el objetivo de lograr la máxima eficiencia de conversión en el convertidor catalítico según los datos experimentales que se tienen calibrados. En la siguiente ilustración, se muestra la onda comandada de la relación combustible-aire y unos ejemplos de cómo se aplica el BIAS:



Esquema en el cual se observa la onda de la relación combustible-aire y un ejemplo de un offset rico y uno pobre [4]

Capítulo 8: Calibración para maximizar la eficiencia del convertidor catalítico con el fin de certificar el auto para ser vendido en el mercado mexicano.

Descripción del Problema

Los programas Fiesta 2014 para Estados Unidos cuentan con un sistema de control de emisiones de escape más robusto debido a que las regulaciones son más estrictas que las de México. Debido a lo expuesto anteriormente, los automóviles para el mercado de Estados Unidos cuentan con convertidores catalíticos con mayor carga de metales catalizadores (rodio/paladio/platino), con el fin de cumplir con los requerimientos gubernamentales.

Para la aplicación en el mercado mexicano, se cuenta con un convertidor catalítico diseñado para cumplir con las restricciones de emisiones establecidas por el gobierno mexicano. Este convertidor contiene menor carga de metales catalizadores.

En un principio, fue pensado que se podía realizar un cambio de los convertidores catalíticos entre los programas sin la necesidad de alterar la calibración para su correcto funcionamiento. Situación que fue desmentida al momento de realizar pruebas de emisiones en los vehículos con el convertidor catalítico con menor carga, ya que los resultados no cumplían con las especificaciones requeridas por Ford.

Después del análisis de varias pruebas de emisiones, se llegó a la conclusión de que se debía de hacer un trabajo específico para la calibración mexicana ya que las eficiencias del convertidor catalítico no eran las esperadas en varios puntos del ciclo europeo. Por lo anterior, se sugirió y se aprobó hacer mediciones en dinamómetro con mapeo en tiempo real de emisiones de escape y feedgas (gases de escape antes de ser procesados por el convertidor), con el fin de calibrar el sistema de emisiones y lograr la máxima eficiencia el convertidor catalítico en todas las condiciones operación durante la prueba.

Con la calibración para la aplicación de Estados Unidos se tenían los siguientes resultados con repetitividad:

	THC	CO	NOx	
EU IV Standard	0.1	1	0.08	g/km
Engineering Target	0.08	0.8	0.064	g/km
Test Results	0.08556	0.50472	0.069	g/km

Como se puede observar, los resultados de la prueba no cumplen con los requerimientos de la compañía.

A continuación se muestran las gráficas del comportamiento del vehículo durante la prueba donde se puede observar cómo el convertidor catalítico no se encuentra trabajando adecuadamente y por lo tanto se emiten cantidades no aceptables de gases dañinos:



- TP_CUMGM_CO: Masa acumulada de CO expulsada por el escape (g)
 - TP_CUMGM_HC: Masa acumulada de HC expulsada por el escape (g)
 - TP_CUMGM_NOX: Masa acumulada de NO_x expulsada por el escape (g)
 - TP_CONVEFF_CO: Eficiencia de conversión de CO (%)
 - TP_CONVEFF_HC: Eficiencia de conversión de HC (%)
 - TP_CONVEFF_NOX: Eficiencia de conversión de NO_x (%)
 - LAM_30MS[0]: Relación Lambda medida por la sonda de producción (adimensional)
 - Lambda_ES635: Relación Lambda medida por la sonda adicional instrumentada (adimensional)
 - LAMBSE_TGT[0]: Relación lambda comandada por la unidad de control del motor (adimensional)
 - CLFUL_BIAS_PROP[0]: Offset BIAS aplicado por el control proporcional (adimensional)
 - CLFUL_BIAS_TOT_FINAL[0]: Offset BIAS aplicado según la carga y velocidad del motor actual (adimensional)
 - VSPD: Velocidad del auto (km/h)
 - ENGINE_SPEED: Velocidad de giro del cigüeñal del motor (RPM)
 - LOAD_FG: Carga del motor (adimensional)
 - CLFUL_DS_SP[0]: Error entre el voltaje objetivo calibrado y el voltaje real leído en el sensor HEGO (V)
 - EGO_V_30MS[0][1]: Voltaje leído del sensor HEGO (V)
- El eje horizontal representa el tiempo en segundos y es común para todos los trazos

Figura 17: Datos adquiridos durante una prueba de emisiones siguiendo el ciclo europeo, antes del procedimiento de calibración para mejorar emisiones

Las figura 17, muestran los trazos de las variables medidas durante una prueba de emisiones siguiendo un ciclo europeo. En la gráfica de la parte superior se pueden observar las cantidades acumuladas de los gases contaminantes de interés, TP_CUMGM_CO es el acumulado total de monóxido de carbono emitida durante la prueba, TP_CUMGM_HC Y TP_CUMGM_NOX son los acumulados totales de hidrocarburos no quemados y óxidos de nitrógeno respectivamente.

La segunda gráfica muestra los trazos de la eficiencia de conversión en el convertidor catalítico. TP_CONVEFF_CO, TP_CONVEFF_HC, TP_CONVEFF_NOX representan la eficiencia de conversión de monóxido de carbono, hidrocarburos no quemados y óxidos de nitrógeno respectivamente. La eficiencia de conversión en cada caso se calcula como sigue:

$$Eff = \frac{FG_x - TP_x}{FG_x} \times 100 \text{ [iii]}$$

Donde:

FG_x : Es el gas de escape del motor antes de pasar por el convertidor catalítico.

TP_x : Es el gas de escape del motor después de pasar por el convertidor catalítico.

Eff : Es la eficiencia total de conversión.

x : Es la emisión que se está analizando, es decir, CO, HC, NO_x.

Por ejemplo, si se tiene una cantidad determinada de CO en la entrada del catalizador y esta es cero a la salida, se tiene una eficiencia del 100% ya que el cociente se convierte automáticamente en 1. De la misma forma, si se tiene la misma cantidad de CO a la entrada y en la salida, la eficiencia es 0%, ya que la resta en el numerador se reduce a cero.

En la tercera gráfica se pueden observar las lecturas de las dos sondas lambda, LAM_30MS representa la lectura de la sonda de fábrica y Lambda_ES635 la sonda instrumentada, LAMSE_TGT representa el objetivo de la relación aire-combustible que debe de seguir el sistema de inyección combustible.

En la cuarta gráfica se pueden observar CLFUL_BIAS_PROP, que es el offset BIAS proporcional (se detallará más adelante) y CLFUL_BIAS_TOT que offset total aplicado por el sistema de inyección el cual desvía el objetivo de inyección hacia el lado rico o pobre según lo comande la unidad de control siguiendo los valores de la calibración actual.

La quinta gráfica es el trazo de velocidad seguido en la prueba, como se puede observar, es el mismo que se expuso anteriormente correspondiente a la normativa europea.

La sexta gráfica muestra la carga del motor (LOAD_FG) y su velocidad giro (ENGINE_SPEED)

La última gráfica muestra el voltaje objetivo calibrado que debe de seguir la sonda lambda posterior al catalizador o sensor CMS (CLFUL_DS_SP) y el voltaje actual de dicho sensor EGO_V_30MS. El sistema continuamente compara el voltaje calibrado con el real registrado por el sensor y dependiendo de la diferencia entre ellos comanda modificar el BIAS dependiendo si se tiene un error rico o pobre, por medio de un control proporcional, con el objetivo de seguir ese voltaje, ya que ese voltaje calibrado es el que experimentalmente se tiene probado que permite obtener la máxima eficiencia de conversión en el catalizador.

Como se puede observar en la gráfica de eficiencia, las eficiencias caen inaceptablemente por debajo del 80% numerosas veces, siendo el más notorio el caso de la eficiencia del convertidor catalítico con NO_x. Si se observan las gráficas, en todos los puntos donde cae la eficiencia de conversión, se tienen subidas repentinas en la cantidad de gases acumulados. Por los motivos expresados anteriormente, se decidió atacar el problema recalibrando las tablas de valores que influyen en la eficiencia de conversión del catalizador, ya que los valores calibrados para el programa del mercado de Estados Unidos, no funcionaban correctamente con el convertidor catalítico empleado para el mercado mexicano.

Adquisición de datos experimentales para recalibrar los valores de las tablas de control de emisiones.

¿Por qué se producen diferentes tipos de contaminantes dependiendo de la relación Lambda?

Cuando se tiene una mezcla perfectamente estequiométrica, es decir, el equilibrio perfecto molecular para que cada átomo de oxígeno reaccione con sus respectivos átomos de carbono o hidrógeno durante la combustión, se tiene una combustión perfectamente completa y los productos de la combustión son únicamente vapor de agua, dióxido de carbono y gas nitrógeno. Como lo anterior es prácticamente imposible de lograr, siempre se tienen condiciones de exceso de aire o falta de aire en la mezcla.

¿Por qué se emite CO y HC cuando la mezcla es rica?

Los contaminantes anteriores se emiten durante este régimen de operación debido a que no hay el oxígeno suficiente para reaccionar con todos los átomos de carbono e hidrógeno disponibles, por lo que se producen moléculas inestables como el monóxido de carbono y los hidrocarburos restantes que no alcanzaron a reaccionar simplemente se vaporizan y se emiten tal cual como ingresaron a la cámara de combustión.

¿Por qué se emite NO_x cuando la mezcla es pobre o con exceso de aire?

Para que se produzcan los óxidos de nitrógeno se necesitan cumplir dos condiciones. La primera es tener un exceso de oxígeno, por lo que después de que todas las moléculas de carbono e hidrógeno reaccionan con las de oxígeno, quedan aun más moléculas de oxígeno disponibles para reaccionar con el nitrógeno del aire. La segunda es que se alcancen temperaturas instantáneas superiores a los 1370°C .

¿Cómo se pueden reducir las emisiones de escape?

Las emisiones de HC y CO se reducen simplemente manteniendo la relación Lambda lo más cercano a 1, buscando que se logre la combustión más completa posible. Se puede buscar también la eliminación de estos contaminantes por medio de una mezcla pobre pero eso contribuye al aumento de la emisión de NO_x . Para controlar las emisiones de NO_x , se busca también como primera opción, mantener la relación Lambda lo más cercana a 1. Como segunda opción se busca prevenir que la cámara de combustión alcance niveles críticos de temperatura. Para esto se emplea la recirculación de gases de escape. El aire es un gas que tiene una capacidad térmica específica baja, por lo que necesita de poca energía para aumentar su temperatura, por esta razón, cuando se tiene una mezcla pobre, se alcanzan temperaturas instantáneas más altas que cuando se tiene una rica o estequiométrica. Al reinyectar un cierto porcentaje de los gases de escape, se reintroduce un porcentaje de CO_2 el cual es un gas con una capacidad calorífica más alta que la del aire puro, lo anterior logra que se eleve la capacidad calorífica de la mezcla y logra que se alcancen temperaturas instantáneas menos altas en la cámara de combustión.

En los motores de combustión interna Ciclo Otto, esta estrategia se emplea mayoritariamente a cargas y revoluciones bajas, ya que si se mantiene cuando el motor se encuentra en cargas altas, la recirculación de gases afecta el desempeño del mismo.

Procedimiento de Calibración

La estrategia de control, para mantener la eficiencia del catalizador lo más alta posible durante los diferentes rangos de operación del motor, modifica el offset BIAS que se tiene que aplicar a la relación phi (combustible-aire), dependiendo de una serie de valores calibrables que lee de una tabla dependiendo de la velocidad de giro y carga a la que se encuentre funcionando el motor en determinado momento. A continuación se muestra la tabla con los valores calibrados para el Fiesta 2014 para la venta en Estados Unidos:

Carga/RPM	650	1000	1250	1500	1750	2000	2250	2500	3000	5000
0.15	0	-0.006	-0.006	-0.006	-0.006	-0.006	-0.006	-0.006	-0.006	-0.006
0.25	-0.006	-0.006	-0.006	-0.006	-0.006	-0.006	-0.006	-0.006	-0.006	0.001
0.3	-0.006	-0.006	-0.006	-0.006	-0.006	-0.006	-0.006	-0.006	0.001	0.001
0.4	-0.006	-0.006	-0.006	-0.006	-0.006	-0.006	-0.006	0.001	0.001	0.001
0.5	-0.006	-0.006	-0.006	-0.006	-0.006	-0.006	0.001	0.001	0.001	0.001
0.6	-0.006	-0.006	-0.006	-0.006	-0.006	-0.006	0.001	0.001	0.001	0.001
0.7	-0.006	-0.006	-0.006	-0.006	-0.006	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
1	-0.006	-0.006	-0.006	-0.006	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001

Tabla del Offset BIAS aplicado según la actual carga y velocidad de giro del motor antes del procedimiento de calibración para mejorar emisiones

Por ejemplo si se tiene una carga de 0.3 a 2000 RPM el offset total que se aplicará en la onda de inyección será -0.006, si se tiene una carga de 0.35 a 2100 RPM, el offset total aplicado es el resultado de la interpolación de las cuatro casillas entre estos dos valores, en este caso como las cuatro casillas tienen el mismo valor, el offset aplicado será de -0.006.

De igual forma, se tiene otra tabla con los valores calibrados de voltaje objetivo del sensor HEGO (CMS), con los cuales se calcula el objetivo que se debe de seguir para garantizar la máxima eficiencia del catalizador y se aplican las correcciones necesarias en caso de tener un error mediante un controlador proporcional. A continuación se muestra la tabla para la aplicación de Estados Unidos:

Carga/RPM	650	1000	1250	1500	1750	2000	2250	2500	3000	5000
0.15	0.8	0.8	0.8	0.79	0.78	0.78	0.78	0.78	0.77	0.76
0.25	0.83	0.83	0.83	0.83	0.78	0.77	0.77	0.77	0.77	0.76
0.3	0.83	0.83	0.81	0.81	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77	0.76
0.4	0.75	0.75	0.75	0.79	0.74	0.75	0.74	0.76	0.76	0.76
0.5	0.68	0.68	0.68	0.71	0.74	0.75	0.74	0.76	0.76	0.75
0.6	0.66	0.66	0.66	0.66	0.74	0.75	0.74	0.76	0.76	0.75
0.7	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	0.7	0.8	0.8	0.8	0.75
1	0.63	0.63	0.63	0.63	0.63	0.7	0.8	0.8	0.8	0.75

Tabla del voltaje objetivo del sensor HEGO que el sistema de control debe seguir según la actual carga y velocidad de giro del motor antes del procedimiento de calibración para mejorar emisiones

De la misma forma, si se tiene una carga de 0.3 a 2000 RPM el voltaje que teóricamente se debería estar leyendo en el HEGO es de 0.77V, si esto no es así, el sistema comanda offset más pobre o rico según se tenga un error pobre o rico mediante un controlador proporcional, hasta que

se alcance un voltaje cercano al objetivo. Si se tienen condiciones intermedias entre los puntos establecidos en el mapa, se interpola el voltaje objetivo de la misma forma que en la tabla anterior.

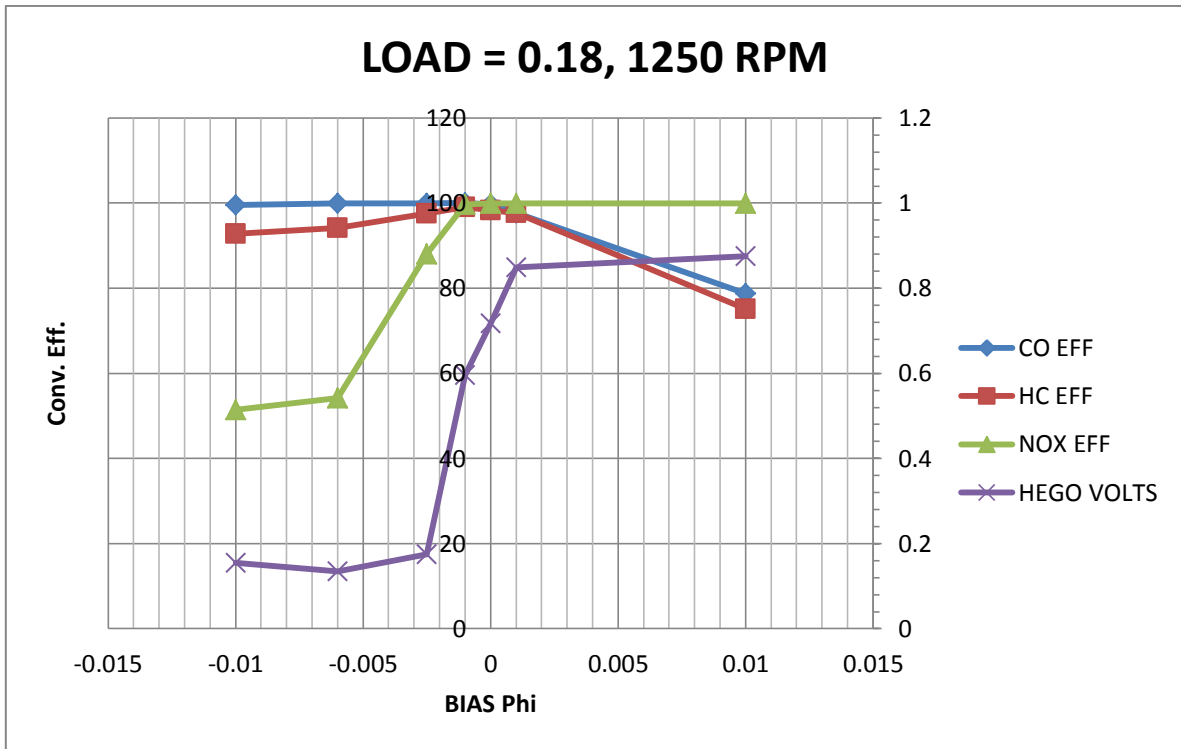
Las herramientas necesarias para poder realizar el mapeo y poder recalibrar esta tabla, se encuentran también en el laboratorio de emisiones de la compañía. Es necesario un dinamómetro de rodillo con el cual se necesitan fijar cargas y velocidades de giro, para así poder llevar al motor a las condiciones de operación deseadas; así mismo, se necesita tener instrumentado el sistema de escape del motor con dos sondas para poder tomar muestras de los gases antes y después del convertidor catalítico y así poder calcular la cantidad de emisiones de escape y la eficiencia con el equipo de medición del laboratorio.

Con el automóvil montado en el rodillo del dinamómetro, lo que sigue es seleccionar una serie de puntos de offset en los cuales se desean obtener datos de emisiones, partiendo de -0.01 (muy pobre) a 0.01 (muy rico). Uno de esos puntos debe de ser 0 y dos se deben ubicar muy cerca del 0, con el fin de obtener datos para estudiar qué tanto varían las emisiones si se tiene un valor muy cercano a cero pobre (negativo) o rico (positivo). En total se seleccionaron los siguientes 7 puntos para hacer mediciones: -0.01, -0.006, -0.0025, -0.001, 0, 0.001 y 0.01.

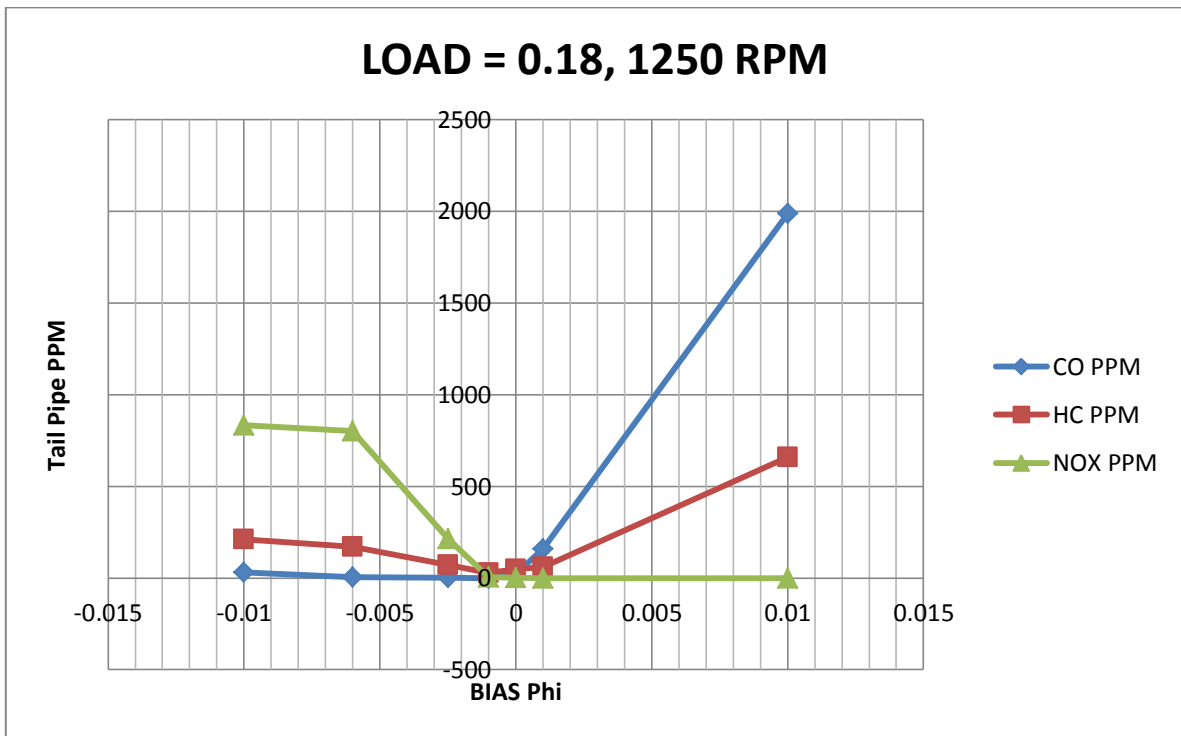
Para lograr que el motor funcionara en las condiciones de velocidad de giro y carga que se tienen en la tabla, se desactivaron el control proporcional para evitar la retroalimentación y corrección de error con base en el voltaje leído del HEGO, se mantuvo el automóvil operando todo el tiempo en la primera marcha y se fue modificando la velocidad del rodillo dinamómetro, hasta alcanzar la velocidad de giro del motor deseada. Después de fijar la velocidad, se fue modificando la apertura del cuerpo de aceleración hasta alcanzar la carga deseada. Para aplicar el offset a probar, después de fijar un punto de operación, se fijaron todas las casillas alrededor de la de interés con el mismo valor de offset para garantizar que se aplicara sin importar las variaciones que se pudieran tener en carga o RPM. Por ejemplo, cuando se quiso aplicar un offset de -0.001 con 0.3 de carga y 2000 RPM se fijó el valor de -0.001 en las ocho casillas alrededor de la de interés, de esta manera si los valores de carga o RPM variaran por encima o por debajo de los de interés, el offset aplicado, sería el mismo.

Logradas las condiciones buscadas, se dejó operar al vehículo en el régimen seleccionado durante un minuto con el fin de que se estabilizaran las lecturas y, posteriormente, se tomaron grabaciones de un minuto de los datos obtenidos de la unidad de control del motor con ayuda del programa ATI Vision y de emisiones simultáneamente con el equipo del laboratorio. En total 7 grabaciones para cada casilla en la tabla, una por cada valor seleccionado del offset.

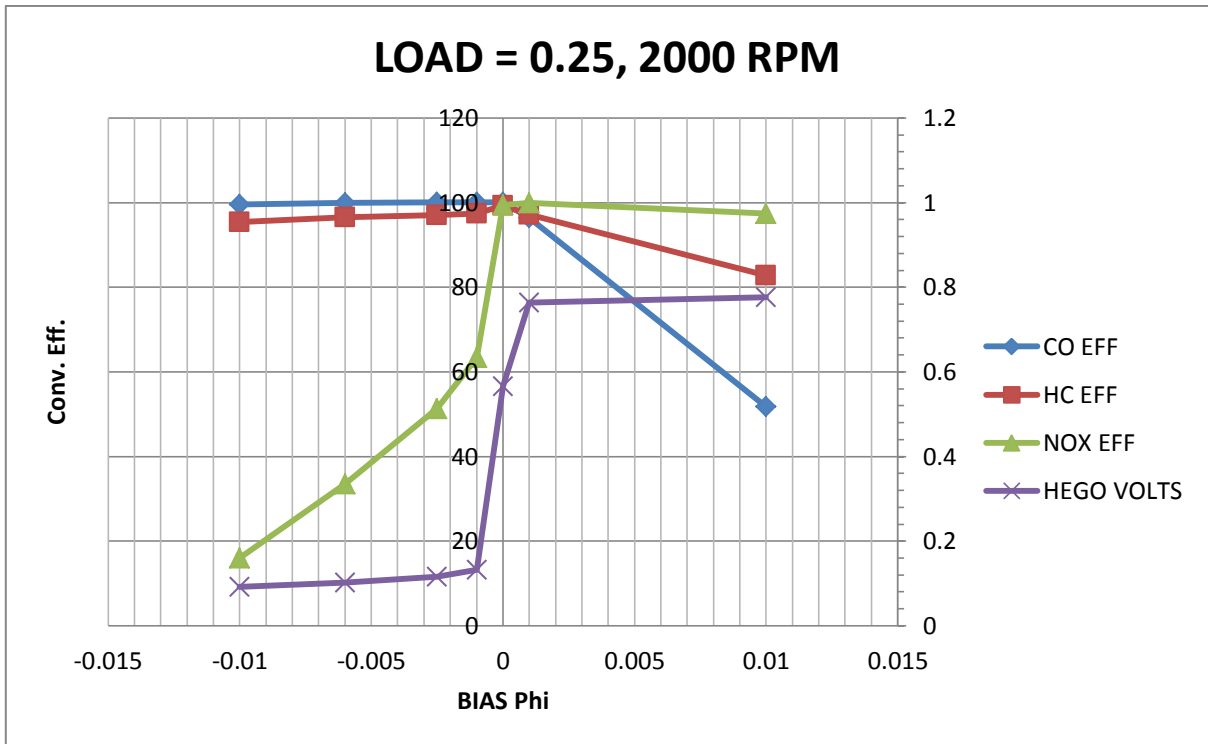
Después de obtener todos los datos de los puntos de interés, se promediaron las lecturas de las emisiones antes y después del convertidor, la eficiencia del catalizador, el voltaje en el HEGO y se construyeron gráficas para observar el comportamiento del convertidor catalítico en cada punto de operación, con los diferentes offsets aplicados a la onda de inyección. A continuación, se muestran ejemplos de las gráficas construidas con los datos que se obtuvieron en el laboratorio:



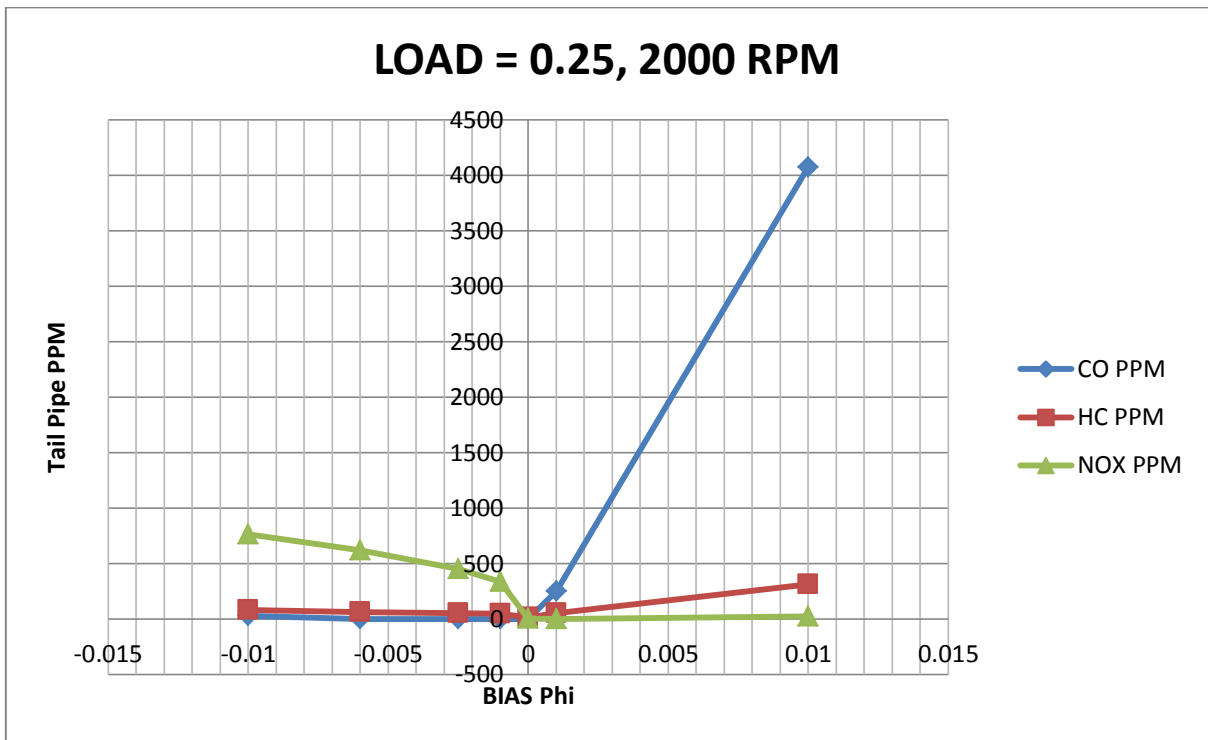
Gráficas de la eficiencia de conversión de CO, HC y NO_x y del voltaje del HEGO a partir de datos adquiridos durante el mapeo en tiempo real de emisiones, con una carga de 0.18 y 1250 RPM.



Gráficas de la cantidad de CO, HC y NO_x emitidos a partir de datos adquiridos durante el mapeo en tiempo real de emisiones, con una carga de 0.18 y 1250 RPM.



Gráficas de la eficiencia de conversión de CO, HC y NO_x y del voltaje del HEGO a partir de datos adquiridos durante el mapeo en tiempo real de emisiones, con una carga de 0.25 y 2000 RPM.



Gráficas de la cantidad de CO, HC y NO_x emitidos a partir de datos adquiridos durante el mapeo en tiempo real de emisiones, con una carga de 0.25 y 2000 RPM.

El criterio para seleccionar el offset que ofrece los mejores resultados de eficiencia y por lo tanto de emisiones, probado en muchos programas de Ford es el siguiente:

Se debe de seleccionar el punto que tenga la mayor eficiencia de conversión de NO_x que al mismo tiempo tenga una eficiencia de conversión de CO superior al 90% y un total de emisiones de escape después del convertidor menor a 500 PPM de CO y menor a 10 PPM de NO_x.

Por ejemplo, en las gráficas de las dos casillas que se mostraron anteriormente, los offsets que cumplen con las condiciones anteriores son los siguientes:

Para 0.18 de carga a 1250 RPM el offset que cumple con las condiciones anteriores es 0 y el voltaje promedio del HEGO leído para este punto de operación con dicho offset es 0.840436 V.

Para 0.25 de carga a 2000 RPM se tienen los valores de 0.001 y 0.763771 V respectivamente que cumplen con las condiciones de máxima eficiencia.

Sucesivamente para cada punto de operación, se aplicó el mismo criterio de selección y se recalibraron las tablas del offset y voltaje objetivo como se puede observar a continuación:

Carga/RPM	650	1000	1250	1500	1750	2000	2250	2500	3000	5000
0.18	0	0	0	0	0	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
0.25	-0.001	-0.001	0	-0.001	0.001	0.001	0.001	-0.001	0.001	0.001
0.3	-0.001	-0.001	0	-0.001	0.001	0.001	0	-0.001	0	0.001
0.4	-0.001	-0.001	0	-0.001	0.001	0	0	0.001	-0.001	0.001
0.5	-0.001	-0.001	0	-0.001	0	0	0	0	0	0.001
0.6	-0.001	-0.001	0	-0.001	0	0	0	0	0	0.001
0.7	-0.001	-0.001	0	-0.001	0	0	0	0	0	0.001
1	-0.001	-0.001	0	-0.001	0	0	0	0	0	0.001

Tabla del Offset BIAS aplicado según la actual carga y velocidad de giro del motor después del procedimiento de calibración para mejorar emisiones

Carga/RPM	650	1000	1250	1500	1750	2000	2250	2500	3000	5000
0.18	0.840436	0.840436	0.717812	0.846633	0.800614	0.741393	0.719685	0.705925	0.699146	0.19114
0.25	0.787818	0.787818	0.776659	0.762406	0.760318	0.763771	0.533541	0.670475	0.689551	0.19114
0.3	0.758108	0.758108	0.721275	0.716546	0.618988	0.629616	0.674806	0.624276	0.653397	0.19114
0.4	0.704377	0.704377	0.743994	0.704402	0.684909	0.667618	0.691753	0.71098	0.634895	0.19114
0.5	0.704377	0.704377	0.705512	0.666644	0.653332	0.703403	0.709705	0.683067	0.635688	0.19114
0.6	0.704377	0.704377	0.705512	0.666644	0.653332	0.703403	0.709705	0.683067	0.635688	0.19114
0.7	0.704377	0.704377	0.705512	0.666644	0.653332	0.703403	0.709705	0.683067	0.635688	0.19114
1	0.704377	0.704377	0.705512	0.666644	0.653332	0.703403	0.709705	0.683067	0.635688	0.19114

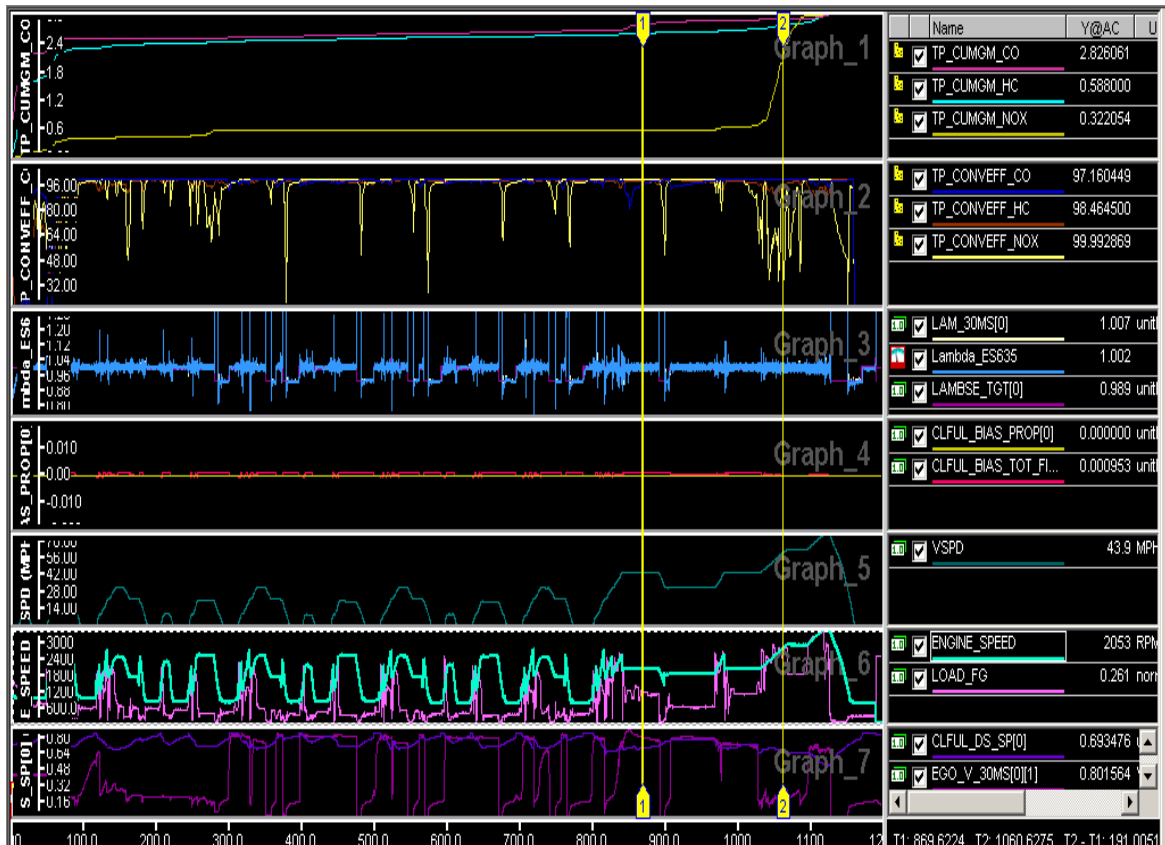
Tabla del voltaje objetivo del sensor HEGO que el sistema de control debe seguir según la actual carga y velocidad de giro del motor antes del procedimiento de calibración para mejorar emisiones

Con esta nueva calibración, se reprogramó la unidad de control del motor, se acondicionó el vehículo y se corrieron nuevamente pruebas de emisiones siguiendo el ciclo europeo, para conocer el efecto de los cambios y se obtuvieron los siguientes resultados:

	THC	CO	NOx	
EU IV Standard	0.1	1	0.08	g/km
Engineering Target	0.08	0.8	0.064	g/km
Test Results	0.06996	0.34068	0.17184	g/km

Como se puede observar, se redujeron significativamente las emisiones de monóxido de carbono en el sumario de la prueba, de igual forma pero en menor proporción, se redujeron los valores de hidrocarburos sin quemar, ambos por debajo de los objetivos de ingeniería. El inconveniente fue que se aumentaron drásticamente las emisiones de óxidos de nitrógeno a niveles inaceptables.

Teniendo dos puntos dentro de los objetivos de ingeniería, se procedió de nuevo a analizar los datos grabados durante la prueba para poder determinar qué fue lo que produjo que se elevaran tan drásticamente las emisiones de óxidos de nitrógeno



- TP_CUMGM_CO: Masa acumulada de CO expulsada por el escape (g)
 - TP_CUMGM_HC: Masa acumulada de HC expulsada por el escape (g)
 - TP_CUMGM_NOX: Masa acumulada de NO_x expulsada por el escape (g)
 - TP_CONVEFF_CO: Eficiencia de conversión de CO (%)
 - TP_CONVEFF_HC: Eficiencia de conversión de HC (%)
 - TP_CONVEFF_NOX: Eficiencia de conversión de NO_x (%)
 - LAM_30MS[0]: Relación Lambda medida por la sonda de producción (adimensional)
 - Lambda_ES635: Relación Lambda medida por la sonda adicional instrumentada (adimensional)
 - LAMBESE_TGT[0]: Relación lambda comandada por la unidad de control del motor (adimensional)
 - CLFUL_BIAS_PROP[0]: Offset BIAS aplicado por el control proporcional (adimensional)
 - CLFUL_BIAS_TOT_FINAL[0]: Offset BIAS aplicado según la carga y velocidad del motor actual (adimensional)
 - VSPD: Velocidad del auto (km/h)
 - ENGINE_SPEED: Velocidad de giro del cigüeñal del motor (RPM)
 - LOAD_FG: Carga del motor (adimensional)
 - CLFUL_DS_SP[0]: Error entre el voltaje objetivo calibrado y el voltaje real leído en el sensor HEGO (V)
 - EGO_V_30MS[0][1]: Voltaje leído del sensor HEGO (V)
- El eje horizontal representa el tiempo en segundos y es común para todos los trazos

Figura 18: Datos adquiridos durante una prueba de emisiones siguiendo el ciclo europeo, después del procedimiento de calibración para mejorar emisiones

Como se puede observar en la figura 18, con la nueva calibración se logró mantener las eficiencias del convertidor con respecto a CO y HC en valores por encima del 90% en casi toda la prueba. Por lo que casi el total de emisiones de escape de estos gases se emitió en el arranque, mientras el convertidor catalítico estaba en fase de calentamiento hasta llegar a su temperatura de operación. Después de alcanzada esta temperatura, se observa que los acumulados de CO y HC se mantienen prácticamente constantes durante toda la prueba, teniendo un aumento mínimo. El problema fue que de nuevo la eficiencia de NO_x no estaba siendo aceptable, sobre todo en la última fase de la prueba donde se ve que se acumula una gran cantidad de este contaminante en un periodo muy pequeño de tiempo.

Analizando la gráfica del nuevo voltaje objetivo del HEGO, se observa que la disminución en la eficiencia de conversión coincide perfectamente con un voltaje del HEGO muy por debajo del

objetivo; por lo que se decidió revisar la calibración del control proporcional para contemplar posibles mejoras.

La calibración del control proporcional encontrada fue la siguiente:

Setpoint VS HEGO Error	-0.2	-0.1	-0.05	0	0.05	0.1	0.2
FNBIAS_PROP_FLT	0	0	0	0	0	0	0

Tabla de la ganancia proporcional aplicada, según el error que se tiene entre la lectura actual del sensor HEGO y su voltaje objetivo, antes del ajuste para mejorar emisiones

El control del motor utiliza el con el contenido esta tabla de la siguiente forma: Si se tiene una condición dada de operación (Carga y RPM) se aplica un cierto valor de offset y se espera obtener el voltaje objetivo que corrobora la correcta eficiencia del convertidor. Si después de aplicado el offset no se obtiene el valor esperado de voltaje, se calcula el error entre el voltaje leído y el objetivo y se aplica un offset adicional, mediante un control proporcional, dependiendo de la magnitud del error. En la tabla anterior, en la fila superior se tienen los valores de error y en la fila inferior, los valores extra de offset que se aplicarán proporcionalmente para tratar de compensar y corregir el error.

Por ejemplo un error negativo corresponde a un error rico, por lo que se buscará compensar empobreciendo la mezcla, es decir aplicando un offset menor al actual, dependiendo de la magnitud del error se aplicaran proporcionalmente los valores calibrados en la tabla buscando controlar magnitud del error. De la misma forma para un error positivo, se buscará aplicar un offset más rico hasta obtener valores de voltaje cercanos a los del objetivo. Con lo anterior se busca mantener operando al convertidor catalítico dentro de su máxima eficiencia.

Como se puede observar todos los valores de la tabla se encuentran en cero, por lo que no se aplica ninguna corrección frente a los posibles errores. Investigando el porqué de la situación, se descubrió que estos valores habían sido movidos a cero debido a que como estaba mal calibrado el voltaje objetivo, es decir, con valores correspondientes a otro convertidor catalítico, el control en vez de ayudar a compensar el error, lo incrementaba debido a que buscaba mantener el voltaje en los valores inadecuados, causando resultados de emisiones peores que los que se presentaron como base en este reporte.

A continuación, como ya se contaba con un voltaje de HEGO específico para este modelo de convertidor en todos los puntos de operación, se buscaron valores recomendados en guías de calibración para esta tabla y se hicieron los siguientes cambios:

Setpoint VS HEGO Error	-0.2	-0.1	-0.05	0	0.05	0.1	0.2
FNBIAS_PROP_FLT	-0.01	-0.003	-0.002	0	0.002	0.002	0.006

Tabla de la ganancia proporcional aplicada, según el error que se tiene entre la lectura actual del sensor HEGO y su voltaje objetivo, después del ajuste para mejorar emisiones

De nuevo, se reprogramó la unidad de control del motor con todos los cambios, incluyendo los cambios de la tabla del control proporcional, se acondicionó el vehículo y de nuevo se corrió un ciclo europeo, obteniéndose los siguientes resultados como sumario:

	THC	CO	NOx	
EU IV Standard	0.1	1	0.08	g/km
Engineering Target	0.08	0.8	0.064	g/km
Test Results	0.06516	0.32496	0.05376	g/km

Como se puede observar, se logró con el último cambio que todos los contaminantes estuvieran por debajo de los objetivos de ingeniería y por lo tanto muy por debajo de los límites establecidos por la Normativa Europea y la Norma Oficial Mexicana.

Con estos nuevos cambios se corrieron ciclos europeos de emisiones sucesivos y se obtuvo repetibilidad en los resultados, por lo que el proceso de calibración para esta parte de la estrategia se dio por terminado con resultados satisfactorios. A continuación se muestran las gráficas de los datos obtenidos después de aplicar todos los cambios.



- TP_CUMGM_CO: Masa acumulada de CO expulsada por el escape (g)
 - TP_CUMGM_HC: Masa acumulada de HC expulsada por el escape (g)
 - TP_CUMGM_NOX: Masa acumulada de NO_x expulsada por el escape (g)
 - TP_CONVEFF_CO: Eficiencia de conversión de CO (%)
 - TP_CONVEFF_HC: Eficiencia de conversión de HC (%)
 - TP_CONVEFF_NOX: Eficiencia de conversión de NO_x (%)
 - LAM_30MS[0]: Relación Lambda medida por la sonda de producción (adimensional)
 - Lambda_ES635: Relación Lambda medida por la sonda adicional instrumentada (adimensional)
 - LAMBSE_TGT[0]: Relación lambda comandada por la unidad de control del motor (adimensional)
 - CLFUL_BIAS_PROP[0]: Offset BIAS aplicado por el control proporcional (adimensional)
 - CLFUL_BIAS_TOT_FINAL[0]: Offset BIAS aplicado según la carga y velocidad del motor actual (adimensional)
 - VSPD: Velocidad del auto (km/h)
 - ENGINE_SPEED: Velocidad de giro del cigüeñal del motor (RPM)
 - LOAD_FG: Carga del motor (adimensional)
 - CLFUL_DS_SP[0]: Error entre el voltaje objetivo calibrado y el voltaje real leído en el sensor HEGO (V)
 - EGO_V_30MS[0][1]: Voltaje leído del sensor HEGO (V)
- El eje horizontal representa el tiempo en segundos y es común para todos los trazos

Figura 19: Datos de emisiones siguiendo el ciclo europeo, después del procedimiento de calibración para mejorar emisiones y del ajuste de la tabla del control proporcional

Como se puede observar en la figura 19, con los últimos cambios se logró una mejor corrección por parte del sistema de control, cuando existe un error entre el voltaje del HEGO y su objetivo, con ello se consiguió mantener la eficiencia del convertidor con los tres contaminantes en valores cercanos o por encima del 90% en prácticamente todos los puntos de la prueba. Se puede observar que la zona donde más se emite NO_x sigue coincidiendo con la que se tenía anteriormente antes de corregir el controlador proporcional, pero claramente se puede observar que el control corrige el offset aplicado durante esta zona manteniéndolo cercano al voltaje objetivo, por lo que se redujo la emisión de NO_x en todas las zonas donde la eficiencia caía debido a los errores pobres de inyección.

En la cuarta gráfica se puede observar cómo se está aplicando el componente proporcional del offset (amarillo) al offset total aplicado (rojo), componente que en las dos pruebas de emisiones mostradas anteriormente, se mantiene siempre en cero.

Conclusiones

El trabajo realizado en el programa Fiesta 2014 contribuyó a que se cumplieran con las especificaciones del programa y de la empresa.

Con las actividades iniciales realizadas, instrumentando el auto de pruebas, se consiguió tener una base para poder obtener datos que contribuyeron a analizar el funcionamiento del tren motriz en distintas condiciones de operación, lo que contribuyó a verificar que los sensores instalados de fábrica están dentro de los rangos de medición correctos y ayudó a comprobar que la calibración realizada para los modelos que infieren las temperaturas del convertidor catalítico (1/2" antes del ladrillo y 1" después del ladrillo) es correcta, asegurando la adecuada protección del mismo cuando se requiera, garantizando su durabilidad.

Al mismo tiempo, la instrumentación instalada permitió obtener datos clave de operación, durante los ciclos europeos de emisiones. Resultó importante analizar que la temperatura del convertidor catalítico fuera la correcta para asegurar que se tuvieran las condiciones de operación necesarias para que se pudieran llevar a cabo las reacciones de oxidación y reducción respectivamente. Así mismo, el sensor lambda instrumentado permitió asegurar que la oscilación de la onda de aire – combustible que estaba midiendo el sensor instalado de fábrica, fuera la correcta. Con lo anterior, se verificó el correcto funcionamiento de la estrategia y calibración encargada de regular la inyección de combustible y al mismo tiempo, contribuyó a verificar que se le estaba proveyendo al convertidor catalítico con la oscilación adecuada entre una relación rica y pobre para que se pudiera llevar a cabo correctamente la reducción de gases nocivos.

Con los mapeos de emisiones realizados sobre el dinamómetro de rodillo, en el laboratorio de emisiones de la compañía, se obtuvieron datos valiosos para conocer los puntos de operación óptimos del convertidor catalítico. Con estos datos, se calibró correctamente la estrategia de control encargada de aplicar el offset necesario hacia el lado rico o pobre de la onda de inyección, incrementando la eficiencia de conversión del catalizador y por lo tanto se redujo considerablemente la cantidad de monóxido de carbono e hidrocarburos sin quemar liberados a la atmósfera.

Con la recalibración del control proporcional encargado de ayudar a seguir el voltaje objetivo del HEGO, instalado después del catalizador, se logró incrementar aún más la eficiencia de conversión del convertidor catalítico, sobre todo la eficiencia de conversión de óxidos de nitrógeno. Lo anterior se debió a que con la aplicación del control proporcional, se logró reducir significativamente el error pobre de inyección a lo largo de la prueba, sobre todo en la segunda fase donde se tenía el incremento más drástico en la emisión de NO_x.

Con todas las actividades listadas en este reporte, se realizaron cambios en la calibración del Fiesta 2014 para el mercado mexicano, con los cuales se aseguraron que las emisiones de escape se mantuvieran por debajo de los objetivos. Lo anterior, aseguró el cumplimiento de los requerimientos de emisiones de la compañía y del programa, y como consecuencia el cumplimiento de las regulaciones gubernamentales, con lo que se garantiza que el vehículo pueda ser homologado bajo la NOM – 04 – SEMARNAT – 2003 y por lo tanto se autorice su venta en el territorio mexicano.

Bibliografía

Fuentes Escritas:

- Revisión teórica del funcionamiento de instrumentos de medición de temperatura y presión, incluyendo gráficas y esquemas.

[1] *"Instrumentación Industrial"*. Antonio Creus Solé. Ed. Marcombo. Séptima Edición.

- Regulación mexicana de emisiones incluyendo tablas

[2] *NOM – 042 – SEMARNAT – 2003*

- Normativa Europea para emisiones de escape, métodos y ciclos de prueba, incluyendo tablas y gráficas

[3] *Normativa Europea 70/220/CEE*

- Procedimiento de calibración para el control de emisiones de escape e información básica sobre el funcionamiento del control

[4] *Manuales de Calibración de la Compañía*

Fuentes Electrónicas:

- Historia de Ford de México

[5] [Intranet de Ford](#)

[6] http://media.ford.com/article_display.cfm?article_id=32629

[7] <http://www.ford.mx/acerca/compania>

[8] http://media.ford.com/article_display.cfm?article_id=4166

[9] <http://www.terra.com.mx/autos/articulo/916670/85+anos+de+Ford+en+Mexico.htm&paginaid=2>

[10] http://media.ford.com/images/10031/Fiesta_Timeline.pdf

- Revisión teórica del funcionamiento y tipos de sensores Lambda

[11] <http://ngkntk.co.uk/index.php/technical-centre/lambda-sensors/how-does-the-lambda-sensor-work/>

- Revisión del funcionamiento del convertidor catalítico

[12] <http://auto.howstuffworks.com/catalytic-converter.htm>