

MEDICIÓN Y COMPARACIÓN DE LOS ÍNDICES DE DETERIORO  
DE DOS CATALIZADORES OPERADOS CON MEZCLAS DE  
ETANOL-GASOLINA (E10 Y E20)

WILLIAM DAVID VALENCIA LOPEZ

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA  
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA  
ÁREA DE CIENCIAS TÉRMICAS  
PEREIRA  
2015

MEDICIÓN Y COMPARACIÓN DE LOS ÍNDICES DE DETERIORO  
DE DOS CATALIZADORES OPERADOS CON MEZCLAS DE  
ETANOL-GASOLINA (E10 Y E20)

WILLIAM DAVID VALENCIA LOPEZ

TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE  
INGENIERO MECÁNICO

DIRECTOR

JUAN ESTEBAN TIBAQUIRÁ GIRALDO Ph.D

INGENIERO MECÁNICO

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

ÁREA DE CIENCIAS TÉRMICAS

PEREIRA

2015

Nota de aceptación:

---

---

---

---

---

---

Firma del jurado

---

Firma del jurado

17 / Noviembre / 2015

## **DEDICATORIA**

Como primera medida, le dedico este trabajo a mis padres William y Gloria Cecilia, quienes han sido el pilar fundamental de mi formación y crecimiento, tanto en el ámbito académico como en el personal; les doy gracias por el apoyo incondicional que me han proporcionado a través del tiempo sin importar las adversidades que hemos afrontado. A mis abuelos maternos, quienes en el momento que decidí iniciar mis estudios en la Universidad Tecnológica de Pereira me brindaron su acompañamiento, ofreciéndome todo lo que estaba a su alcance para conseguir el objetivo que después de 5 años estoy cumpliendo.

De manera muy especial quiero dedicarle este triunfo a mi abuelo José Ovidio Lopez, quien lastimosamente falleció antes de ver culminado este proceso, siempre fue un anhelo de él tener un Ingeniero Mecánico en la familia y hoy con mucho orgullo puedo decir que su deseo y el mío se ha materializado.

## **AGRADECIMIENTOS**

Quiero agradecerle a mi director de proyecto el Doctor Juan Esteban Tibaquirá, quien me escogió para continuar avanzando en esta línea de investigación, depositando su confianza en mí, brindándome la oportunidad de trabajar en un campo de la ingeniería que me apasiona, además de integrar un increíble grupo de trabajo.

A todas las personas que en los últimos años han hecho parte del Grupo de Investigación en Gestión Energética (GENERGÉTICA) y principalmente el Laboratorio de Pruebas Dinámicas Automotrices (LPDA), a los Magister Luis Felipe Quirama y Sebastián Ospina, quienes me ofrecieron su ayuda desde el momento en que llegue a este grupo de trabajo, proporcionando su colaboración y conocimiento en los momentos en que fueron requeridos, al Ingeniero Juan Sebastián González quien me ayudó a ejecutar todas las pruebas requeridas.

Adicionalmente, quiero agradecer a las personas que estuvieron involucradas de alguna manera durante este periodo universitario, las cuales contribuyeron con su amistad, compañerismo y/o apoyo para que consiguiera esta gran meta, la cual me ha permitido crecer intelectualmente y como persona durante los últimos años.

## CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN.....	10
1. MARCO TEÓRICO .....	13
1.1 PROCESO DE COMBUSTIÓN .....	13
1.1.1 Combustibles .....	13
1.1.2 Combustión .....	14
1.2 CONVERTIDOR CATALÍTICO (CATALIZADOR).....	16
1.2.1 Constitución y componentes .....	17
1.2.2 Clasificación de los convertidores catalíticos .....	20
1.3 CLASIFICACIÓN DE LAS SEÑALES FÍSICAS .....	21
1.3.1 Señales continuas .....	21
1.3.2 Señales discretas .....	21
1.4 SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS .....	23
1.4.1 Sensor.....	23
1.4.2 Módulo Acondicionador de Señal.....	24
1.4.3 Unidad de Adquisición de Datos .....	24
1.4.4 Instrumento Virtual (VI) .....	24
1.5 MÉTODO DE DIAGNÓSTICO DE DETERIORO DEL CATALIZADOR .....	25
2. CARACTERIZACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE LOS SENSORES .....	27
2.1 SENSOR DE OXÍGENO (SONDA LAMBDA) .....	27
2.2 SENSOR DE TEMPERATURA (TERMOPAR) .....	30
3. ACONDICIONAMIENTO DE SEÑAL Y UNIDAD DE ADQUISICIÓN DE DATOS... 32	
3.1 CONTROLADOR DE BANDA ANCHA .....	32
3.2 MÓDULOS DE ENTRADA/SALIDA (E/S) DE LA SERIE C .....	34
3.2.1 Módulo de medición de <i>AFR</i> .....	35
3.2.2 Modulo de medición de temperatura .....	36
3.3 CHASIS DE LA UNIDAD DE ADQUISICIÓN.....	37
4. DISEÑO Y PROGRAMACIÓN DE LA INSTRUMENTACIÓN VIRTUAL .....	39

5. MONTAJE EXPERIMENTAL .....	42
5.1 VEHÍCULO DE PRUEBAS .....	42
5.2 DINAMÓMETRO .....	43
5.3 MÓDULO DE CONSUMO DE COMBUSTIBLE .....	44
5.4 MONTAJE DEL SISTEMA DE MEDICIÓN .....	45
6. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE LAS PRUEBAS EXPERIMENTALES .....	47
6.1 RESULTADOS DEL ÍNDICE DE TEMPERATURA ( $ID_T$ ) .....	48
6.2 RESULTADOS DEL ÍNDICE DE DETERIORO ( $ID_{Máx}$ ) .....	50
7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	53
7.1 CONCLUSIONES.....	53
7.2 RECOMENDACIONES.....	55
BIBLIOGRAFÍA.....	56

## LISTA DE TABLAS

Pág.

<b>Tabla 1.</b> Comparación de algunos combustibles alternativos contra los combustibles tradicionales basados en petróleo usados en la industria del transporte .....	14
<b>Tabla 2.</b> Clasificación de la combustión con respecto a $\lambda$ .....	16
<b>Tabla 3.</b> Propiedades físicas y químicas del Platino.....	18
<b>Tabla 4.</b> Propiedades físicas y químicas del Paladio.....	19
<b>Tabla 5.</b> Propiedades físicas y químicas del Rodio .....	19
<b>Tabla 6.</b> Condiciones de operación del sensor Bosch LSU-4.2 .....	28
<b>Tabla 7.</b> Características generales del sensor Bosch LSU-4.2.....	29
<b>Tabla 8.</b> Características generales del sensor de temperatura.....	31
<b>Tabla 9.</b> Relación de aire/combustible estequiométrica de diversos combustibles.....	33
<b>Tabla 10.</b> Conexiones eléctricas de los controladores de banda ancha .....	34
<b>Tabla 11.</b> Módulo NI 9201: Resumen de especificaciones técnicas .....	36
<b>Tabla 12.</b> Módulo NI 9211: Resumen de especificaciones técnicas .....	37
<b>Tabla 13.</b> Especificaciones técnicas del motor .....	43
<b>Tabla 14.</b> Resultados de las pruebas experimentales .....	47
<b>Tabla 15.</b> Índices de temperatura .....	49
<b>Tabla 16.</b> Índices de deterioro .....	51



## LISTA DE FIGURAS

Pág.

<b>Figura 1.</b> Convertidor catalítico o catalizador .....	16
<b>Figura 2.</b> Constitución interna del catalizador de tipo cerámico .....	17
<b>Figura 3.</b> Señal continua en el tiempo .....	21
<b>Figura 4.</b> Señal discreta en tiempo.....	22
<b>Figura 5.</b> Señal discreta en amplitud .....	22
<b>Figura 6.</b> Señal discreta en amplitud y tiempo.....	23
<b>Figura 7.</b> Sistema de adquisición de datos.....	23
<b>Figura 8.</b> Concepto básico del método de diagnóstico .....	25
<b>Figura 9.</b> Sensor de oxígeno o sonda Lambda.....	27
<b>Figura 10.</b> Curva característica del sensor Bosch LSU-4.2 .....	30
<b>Figura 11.</b> Sensor de temperatura Autometer .....	30
<b>Figura 12.</b> Controlador de banda ancha (Wideband) .....	32
<b>Figura 13.</b> Pantalla de calibración del controlador de banda ancha .....	33
<b>Figura 14.</b> Módulos de E/S de la Serie C .....	34
<b>Figura 15.</b> Módulo de medición de voltaje NI 9201 .....	35
<b>Figura 16.</b> Módulo de medición de temperatura NI 9211 .....	36
<b>Figura 17.</b> Chasis de la unidad de adquisición NI cDAQ-9174.....	38
<b>Figura 18.</b> Programación de la adquisición y visualización de datos.....	39
<b>Figura 19.</b> Programación de los métodos de diagnóstico.....	40
<b>Figura 20.</b> Programación del temporizador de la prueba.....	40
<b>Figura 21.</b> Programación del instrumento virtual .....	41
<b>Figura 22.</b> Montaje experimental del vehículo de pruebas .....	42
<b>Figura 23.</b> Vehículo de pruebas Chevrolet Aveo 2010 .....	43
<b>Figura 24.</b> Módulo de consumo de combustible .....	44
<b>Figura 25.</b> Montaje experimental del sistema de adquisición de datos.....	45
<b>Figura 26.</b> Acoples para conexión de sensores.....	46
<b>Figura 27.</b> Comparación de los índices de temperatura .....	49
<b>Figura 28.</b> Comparación de los índices de deterioro .....	51

## INTRODUCCIÓN

Este proyecto, surgió como una iniciativa del Grupo de Investigación en Gestión Energética (GENERGÉTICA), adscrito a la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Tecnológica de Pereira (UTP) para continuar en el desarrollo de su línea de investigación en Vehículos y Transporte, como un complemento del Proyecto de Investigación Protocolo E20, ejecutado por GENERGÉTICA entre los años 2010-2012 en asocio con Ecopetrol S.A y el Ministerio de Minas y Energía.

Para disminuir el impacto negativo sobre la calidad del aire, los vehículos poseen dispositivos que se encargan de reducir las emisiones nocivas, uno de estos componentes es el convertidor catalítico o catalizador. El buen funcionamiento del catalizador en los vehículos representa un factor importante en el proceso de control de emisión de gases para los motores de combustión interna (MCI). Estos gases están conformados por ciertos compuestos que afectan la calidad del aire, estos son: Óxidos de Nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ), Monóxido de Carbono (CO) e Hidrocarburos no quemados (HC).

Adicionalmente, en los productos de la combustión también se encuentran compuestos no nocivos, tales como: Agua ( $\text{H}_2\text{O}$ ), Oxígeno ( $\text{O}_2$ ) y Dióxido de Carbono ( $\text{CO}_2$ ); estos últimos, son compuestos que se esperan encontrar al momento de realizar un análisis de emisiones.

El proceso que se desarrolla al interior de un catalizador, consiste en disminuir la concentración de algunos gases nocivos (CO, HC y  $\text{NO}_x$ ) generados en el proceso de combustión mediante una reacción de óxido-reducción.

El uso de etanol como aditivo oxigenante para los combustibles de origen fósil, contribuye a la disminución de las emisiones de CO, HC y Óxidos de Azufre ( $\text{SO}_x$ ), al igual que  $\text{NO}_x$  dependiendo de las características del motor. Además, algunos estudios indican que se espera un menor deterioro del catalizador cuando se emplean mezclas de etanol-gasolina, principalmente por el hecho de que el etanol contiene menos contaminantes. [1]

Esta investigación tiene como objetivo determinar los índices de desgaste (deterioro) de dos catalizadores después de haber sido sometidos a una operación de 100 000 km con diferentes mezclas de etanol-gasolina. Esta acumulación de kilómetros se realizó en dos vehículos, uno de ellos dedicado a operar con la mezcla de etanol-gasolina con 10% de etanol y el otro con un 20% durante el desarrollo del proyecto Protocolo E20, bajo dos modalidades de prueba: laboratorio y ruta.

Para el cumplimiento del objetivo general se plantearon una serie de objetivos específicos listados a continuación:

- Caracterizar los sensores de oxígeno y temperatura que se instalarán en la prueba.
- Elaborar el montaje experimental, usando los sensores de oxígeno y temperatura en el convertidor catalítico.
- Registrar y analizar las mediciones ejecutadas por los sensores de oxígeno y temperatura.
- Comparar los resultados del diagnóstico de los convertidores catalíticos usados con respecto al catalizador nuevo.
- Implementar en el Laboratorio de Pruebas Dinámicas Automotrices la metodología para determinar los índices de deterioro y temperatura de un convertidor catalítico.

La etapa experimental de este proyecto fue desarrollada en el Laboratorio de Pruebas Dinámicas Automotrices (LPDA) de la UTP con un vehículo Chevrolet Aveo modelo 2010, se probó en cuatro regímenes de giro del motor (1000, 2000, 3000 y 4000 RPM) que permiten obtener información en el rango de velocidades que el motor del vehículo genera la inyección de combustible, estas pruebas se realizaron a plena carga (mariposa del acelerador completamente abierta) durante veinte segundos, después de la etapa de estabilización. Durante estas pruebas se registraron antes y después del catalizador medidas de temperatura, así como la relación aire/combustible (*AFR*), y luego mediante análisis de señales se determinaron los índices de deterioro ( $ID_{Máx}$ ) y de temperatura ( $ID_T$ ) del catalizador a partir de las mediciones realizadas.

Este documento contiene información que condujo al cumplimiento de cada uno de los objetivos; como se explica en los capítulos descritos a continuación:

- 1. Marco teórico:  
En esta sección se recopila información acerca de los distintos conceptos utilizados a lo largo de la investigación, abordando los temas relacionados con la combustión, la composición y clasificación del catalizador, los tipos de señales físicas que existen, el modo de recopilar y manipular las variables de las pruebas, así como finalmente el método aplicado para determinar los índices de diagnóstico.
- 2. Caracterización de los parámetros de los sensores:  
En este capítulo, se especifican las características físicas y operativas de los dos tipos de sensores utilizados para la adquisición de la temperatura y la *AFR*

respectivamente. Se explica como de acuerdo a sus especificaciones estos sensores convierten una propiedad física como lo es la temperatura y la *AFR* en una variable eléctrica fácilmente medible, ya sea una corriente o una diferencia de potencial.

- 3. Acondicionamiento de señal y unidad de adquisición de datos:  
Esta sección del documento contiene la información técnica de los dispositivos que se requieren para manipular, transportar y convertir los dos tipos de variables medidas (temperatura y *AFR*) de señales análogas en señales digitales, las cuales son manipuladas y adquiridas por medio de un instrumento virtual.
- 4. Diseño y programación de la instrumentación virtual:  
En este apartado del documento, se muestran y explican de manera simple las diferentes secciones del instrumento virtual que es utilizado para la adquisición y manejo de la temperatura y la *AFR*. Igualmente se describe la programación requerida para limitar la operación del instrumento a un tiempo de prueba determinado.
- 5. Montaje experimental:  
Aquí se realiza una descripción de cada uno de los equipos con los que se elabora el montaje de las pruebas en las instalaciones del LPDA; definiendo las condiciones y metodología que se aplica para la adquisición de las variables.
- 6. Resultados y análisis de las pruebas experimentales:  
Los resultados reportados en este capítulo, corresponden a la determinación de los índices anteriormente nombrados para los convertidores catalíticos objeto de estudio. Igualmente se presenta una descripción del comportamiento de los índices de diagnóstico en diferentes regímenes para cada catalizador, los cuales se representan por medio de gráficas.
- 7. Conclusiones y recomendaciones:  
En el capítulo final de este documento se pueden ver las conclusiones que se encontraron a partir de los resultados obtenidos en las pruebas, se realiza un análisis que permite concluir acerca de las diferencias entre los índices de temperatura y deterioro de los catalizadores probados. Adicionalmente se presentan recomendaciones para continuar con el desarrollo de esta línea de investigación.

# 1. MARCO TEÓRICO

## 1.1 PROCESO DE COMBUSTIÓN

**1.1.1 Combustibles.** Todo aquel componente que pueda quemarse con el objetivo de liberar energía, se conoce como combustible. En su gran mayoría, los combustibles que se utilizan en la cotidianidad están compuestos de cadenas de carbonos e hidrógenos. Estos combustibles se conocen con el nombre de hidrocarburos (carbón, gasolina, gas natural, etc.) y se denotan de manera general con la formula  $C_aH_b$ .

Por conveniencia y practicidad, los hidrocarburos líquidos suelen considerarse como un solo hidrocarburo, en el caso de la gasolina se trata como octano ( $C_8H_{18}$ ), el diésel como dodecano ( $C_{12}H_{26}$ ) y el alcohol etílico como etanol ( $C_2H_5OH$ ).

Durante los últimos años en Colombia, el uso del gas licuado de petróleo (un subproducto del gas natural) como combustible ha ido en aumento, principalmente en vehículos de transporte liviano como taxis, autobuses escolares y autos particulares. Por tal motivo, se ha convertido en otro producto derivado del petróleo que posee una alta demanda, y debe ser considerado por parte de las refinerías a la hora de decidir la cantidad de producción de cada uno de ellos. Anteriormente por su poca demanda, esto no afectada los niveles de producción de la gasolina y del diésel tradicional, pero dado este aumento, se han buscado maneras de mezclar los combustibles convencionales con aditivos para reducir la contaminación del aire y abastecer de manera normal los vehículos que utilizan los combustibles tradicionales. El aditivo utilizado en la gasolina es el etanol, obtenido a partir de carbohidratos de origen vegetal extraídos de maíz, caña de azúcar, yuca, granos y desechos orgánicos; en Colombia se obtiene a partir de la caña de azúcar. Para el caso del diésel, este puede ser mezclado con dos diferentes compuestos: el etanol usado también en la gasolina, como con biodiesel extraído de semillas o frutos provenientes de plantas oleaginosas, que en el caso de Colombia es obtenido a partir de palma africana.

Los combustibles alternativos poseen una desventaja en comparación con los tradicionales, esta consiste en el contenido energético (Ver *Tabla 1*), debido a que es más bajo que el de los hidrocarburos de origen fósil, por lo tanto, la distancia que un vehículo puede recorrer con su tanque lleno de combustible es menor en el caso de utilizar uno de los combustibles alternativos. [2]

**Tabla 1.** Comparación de algunos combustibles alternativos contra los combustibles tradicionales basados en petróleo usados en la industria del transporte [2]

Combustible	Contenido energético [kJ/L]	Equivalencia en gasolina, L de gasolina /L [ - ]
Gasolina	31 850	1
Diésel ligero	33 170	0.96
Diésel pesado	35 800	0.89
LPG (gas licuado de petróleo, principalmente propano)	23 410	1.36
Etanol (o alcohol etílico)	29 420	1.08
Metanol (o alcohol metílico)	18 210	1.75
CNG (gas natural comprimido, principalmente metano, a 200 atm)	8 080	3.94
LNG (gas natural licuado, principalmente metano)	20 490	1.55

**1.1.2 Combustión.** Es una reacción química mediante la cual un combustible se oxida y libera una cantidad de energía. Por tal motivo, para poder realizar un proceso de combustión se requiere que existan tres elementos, uno que se queme (combustible), otro que produzca la oxidación (comburente) y un cambio de temperatura con el propósito de encender los vapores del combustible. Para el caso de los vehículos, el combustible utilizado depende de las características del motor y el comburente utilizado es el aire, ya que es gratuito y fácil de conseguir, adicionalmente el cambio de temperatura es producido en los motores que utilizan gasolina por una chispa generada por una bujía y en aquellos que son propulsados por diésel debido al aumento de presión que proporciona el pistón.

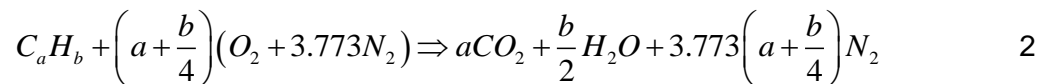
El nitrógeno que se encuentra en el aire actúa como un gas inerte debido a las bajas temperaturas (temperatura ambiente), ya que no reacciona con los demás elementos químicos presentes, sin embargo, a causa de las elevadas temperaturas que se generan en una cámara de combustión, el nitrógeno reacciona con el oxígeno produciendo óxidos de nitrógeno, los cuales son considerados como emisiones nocivas y deben reducirse.

Para el análisis de los procesos de combustión, es muy común utilizar la relación aire/combustible (*AFR*) con el objetivo de establecer la cantidad de aire que se consume durante la reacción química. Este valor es el cociente entre la masa de

aire que se utiliza por cada unidad de masa de combustible (**Ecuación 1**), y dependiendo del tipo de combustible este varía. [2]

$$AFR = \frac{\text{kg de Aire}}{\text{kg de Combustible}} \quad 1$$

La reacción química que se presenta en la combustión, varía de acuerdo a la composición de los reactivos y los productos, se rige bajo el principio de conservación de la masa y la relación aire/combustible de la misma. Si el oxígeno presente es el necesario para que todo el combustible se oxide, se conoce como una combustión completa (**Ecuación 2**), este valor se toma como la referencia y comportamiento esperado. Para que se lleve a cabo la combustión completa existe una relación aire/combustible teórica (o mínima) denominada  $AFR_T$ , la cual permite que todo el combustible se involucre en el proceso, para el caso de la gasolina convencional es aproximadamente 14.7 kg de aire/kg de combustible.



Dado que los procesos ideales son difíciles de aplicar de manera real, debido a las múltiples variables que rigen el mundo físico, la combustión completa utilizando la  $AFR_T$  no se aplica en muchos casos a los MCI, por esta razón, la combustión que se presenta en un vehículo es incompleta o completa por exceso de aire. Para el caso en el cual se presenta una combustión incompleta, la cantidad de oxígeno (aire atmosférico) no es suficiente para oxidar la totalidad del combustible o porque el tiempo en que los reactivos están en la reacción no es el suficiente, de esta manera en los productos que se generan al interior de la cámara de combustión, se presentan compuestos que afectan negativamente la calidad del aire, entre estos se encuentran el CO, los NO<sub>x</sub> y los HC. En el momento en que la combustión es completa sin importar el exceso de aire, los compuestos expulsados son los esperados más una cantidad de oxígeno que no reaccionó.

Para especificar de mejor manera la combustión se ha definido un valor global Lambda ( $\lambda$ ), el cual representa el comportamiento de la reacción sin importar el combustible que se está utilizando, se describe como el cociente entre el  $AFR$  de la combustión y el  $AFR_T$  del combustible que se está utilizando (Ver **Ecuación 3**), este valor siempre será mayor que 0 y se mantendrá normalmente entre 0.7 y 1.5. [3]

$$\lambda = \frac{AFR}{AFR_T} \quad 3$$

Bajo el criterio que proporciona  $\lambda$ , la combustión se puede dividir en tres clases dependiendo del valor que tome (Ver **Tabla 2**), esta clasificación agrupa de manera sencilla los procesos de combustión, dando una explicación de que ocurre cuando se dice que un MCI está trabajando con una mezcla rica o pobre, sin fijarse en que combustible es el utilizado.

**Tabla 2.** Clasificación de la combustión con respecto a  $\lambda$

$\lambda$	Combustión	Aire	Mezcla de combustible
> 1	Completa	Exceso	Pobre
1	Completa	Estequiométrico	Estequiométrica
< 1	Incompleta	Falta	Rica

## 1.2 CONVERTIDOR CATALÍTICO (CATALIZADOR)

Es un dispositivo que hace parte del sistema de escape de los vehículos, se encuentra ubicado inmediatamente después del múltiple de escape y su objetivo es oxidar o reducir (dependiendo del caso) las emisiones nocivas que se producen debido a la quema del combustible al interior de la cámara de combustión (HC, CO, NO<sub>x</sub>). (Ver **Figura 1**)

**Figura 1.** Convertidor catalítico o catalizador



Este proceso se logra gracias a la oxido-reducción que es acelerada por un grupo de metales preciosos que se encuentran al interior del mismo. Estos materiales son impregnados a una cerámica extruida como un panal (canales de flujo), con el propósito de que los gases de escape entren en contacto con una mayor superficie y se genere una mejor reacción catalítica.

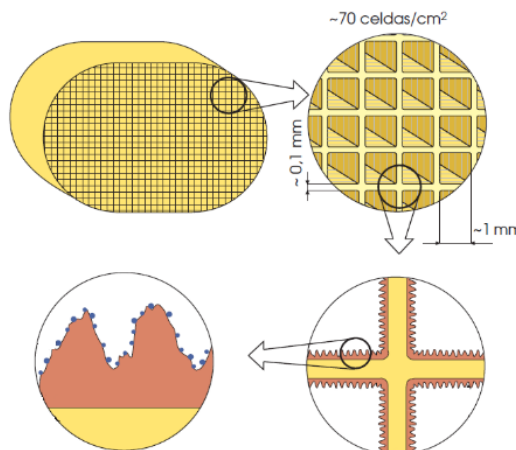


Cuando la cerámica interior del convertidor llega a obstruirse o cubrirse de carbón, aceite u otro material, la eficiencia del catalizador se reduce de manera considerable, produciendo un incremento en los niveles de emisiones nocivas.

**1.2.1 Constitución y componentes.** Exteriormente es un recipiente de acero inoxidable, frecuentemente provisto de una carcasa metálica antitérmica inoxidable, la cual protege los demás componentes del vehículo de las altas temperaturas alcanzadas.

En su interior (Ver **Figura 2**) contiene un soporte cerámico o monolito, de forma oval o cilíndrica, con una estructura de múltiples celdas en forma de panal, con una densidad de aproximadamente 450 celdas por cada pulgada cuadrada (unas 70 celdas por centímetro cuadrado). Su superficie se encuentra impregnada con una resina que contiene elementos nobles metálicos, tales como Platino (Pt) y Paladio (Pd), que permiten la oxidación de los gases productos de la combustión, y Rodio (Rh), que interviene en la reducción de los óxidos de nitrógeno. Estos metales preciosos actúan como elementos activos catalizadores; es decir, inician y aceleran las reacciones químicas entre otras sustancias con las cuales entran en contacto, sin participar ellos mismos en estas reacciones. [4]

**Figura 2.** Constitución interna del catalizador de tipo cerámico [4]



- **Platino (Pt).** Es un metal noble blanco, blando y dúctil. Los metales del grupo del platino se utilizan mucho en el campo de la química a causa de su actividad catalítica y de su baja reactividad. Gracias a sus propiedades físicas y químicas (Ver **Tabla 3**) se utiliza como catalizador, el platino se emplea en las reacciones de hidrogenación,

deshidrogenación, isomerización, ciclización, deshidratación, deshalogenación y oxidación.

El platino puede obtenerse en forma esponjosa por descomposición térmica del cloroplatinato de amonio o al reducirlo de una solución acuosa. En esta forma muestra un alto poder de absorción respecto a los gases, especialmente oxígeno, hidrógeno y monóxido de carbono. La alta actividad catalítica del platino está relacionada directamente con esta propiedad. El platino posee una fuerte tendencia a formar compuestos de coordinación. [5]

**Tabla 3.** *Propiedades físicas y químicas del Platino* [5]

Propiedades físicas y químicas	
Nombre	Platino
Numero atómico	78
Valencia	2, 4
Estado de oxidación	+ 2
Electronegatividad	2.2
Masa atómica	195.09 g/mol
Densidad	21.4 g/ml
Punto de ebullición	4 530 °C
Punto de fusión	1 769 °C
Descubridor	Julius Scaliger

- *Paladio (Pd)*. Es un metal blanco y muy dúctil semejante al platino, al que sigue en abundancia e importancia. El paladio soportado sobre carbono o alúmina se emplea como catalizador debido a sus propiedades (Ver **Tabla 4**) en ciertos procesos químicos. El hidrógeno es absorbido fácilmente por el paladio y se difunde a una velocidad relativamente rápida cuando se calienta. Esta propiedad se aprovecha en los purificadores de hidrógeno, que dejan pasar este gas, pero no otros. En atmósferas ordinarias, el paladio es resistente al deslustre, sin embargo pierde esta cualidad en atmósferas contaminadas con azufre. El monóxido de paladio, PdO, y el dihidróxido, Pd(OH)<sub>2</sub>, se emplean como fuentes de catalizadores de paladio. [6]

**Tabla 4.** Propiedades físicas y químicas del Paladio [6]

Propiedades físicas y químicas	
Nombre	Paladio
Numero atómico	46
Valencia	2, 4
Estado de oxidación	+ 2
Electronegatividad	2.2
Masa atómica	106.4 g/mol
Densidad	12 g/ml
Punto de ebullición	3 980 °C
Punto de fusión	1 552 °C
Descubridor	William Wollaston

- *Rodio (Rh)*. El rodio es un metal blanco, duro, considerablemente menos dúctil que el platino o el paladio, pero mucho más dúctil de acuerdo a sus propiedades (Ver **Tabla 5**) que cualquier otro metal de este grupo.

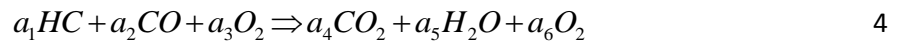
**Tabla 5.** Propiedades físicas y químicas del Rodio [7]

Propiedades físicas y químicas	
Nombre	Rodio
Numero atómico	45
Valencia	2, 3, 4, 6
Estado de oxidación	+ 2
Electronegatividad	2.2
Masa atómica	102.905 g/mol
Densidad	12.4 g/ml
Punto de ebullición	4 500 °C
Punto de fusión	1 966 °C
Descubridor	William Wollaston

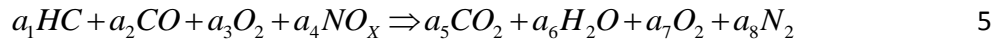
Se usa principalmente como un elemento de aleación para el platino. Es un excelente catalizador para la hidrogenación y es activo en la reformación catalítica de hidrocarburos. [7]

**1.2.2 Clasificación de los convertidores catalíticos.** Existen tres tipos de convertidores catalíticos, los cuales difieren en cierta medida, en los químicos y métodos que utilizan para realizar su función. [8]

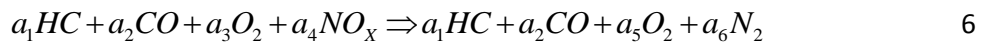
- *Convertidor de oxidación de dos vías.* Este tipo de convertidor, fue usado en algunos vehículos entre los años 1975-1980, oxida los hidrocarburos no quemados (HC) y el monóxido de carbono (CO), junto con el oxígeno libre, produciendo a la salida solo agua (H<sub>2</sub>O), bióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y una cantidad de oxígeno (O<sub>2</sub>) en un caso completamente ideal, la reacción se muestra en la **Ecuación 4**.



- *Convertidor de oxidación/reducción de tres vías.* Adicional al proceso realizado por parte del catalizador de dos vías, este tipo de convertidor reduce los óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) a nitrógeno molecular (N<sub>2</sub>), generando de esta manera un nivel de emisiones nocivas menores a las registradas con su predecesor, tal cual como se ilustra en la **Ecuación 5**.



- *Convertidor de oxidación/reducción de tres vías + aire.* Un convertidor de esta clase realiza la misma función que los de tres vías tradicionales: oxida y reduce de manera simultánea. La diferencia radica en la adición (inyección) de aire que sucede entre dos cavidades internas, lo cual mejora las propiedades de oxidación y por tal motivo aumenta la eficiencia de la reacción. En la primera parte del catalizador se realiza la reducción de los NO<sub>x</sub> (Ver **Ecuación 6**) y en la posterior se produce la oxidación (Ver **Ecuación 7**), esto se asemeja a tener dos convertidores juntos.

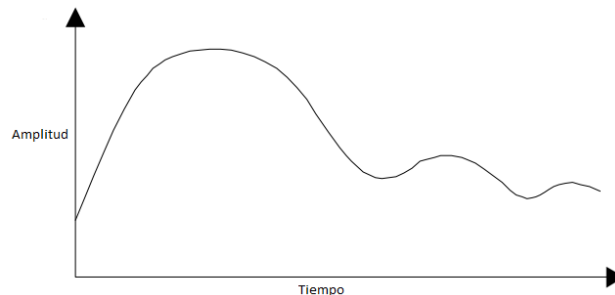


### 1.3 CLASIFICACIÓN DE LAS SEÑALES FÍSICAS

Las señales son todas aquellas representaciones físicas que conllevan información correspondiente a las entradas y/o salidas de un sistema en particular. Normalmente están definidas matemáticamente por una o más variables independientes, dentro de las cuales comúnmente se toma el tiempo. Estas pueden poseer diversas características de acuerdo a la naturaleza y el sistema físico al cual están representando. Dependiendo del comportamiento y variación de estas se clasifican en dos grupos: continuas y discretas.

**1.3.1 Señales continuas.** Son aquellas señales para las cuales su magnitud (amplitud) a lo largo del tiempo puede tomar diversos valores en el rango de los números reales, además está completamente definida dentro de un intervalo determinado de tiempo, como se puede ver en la *Figura 3*.

*Figura 3.* Señal continua en el tiempo [9]

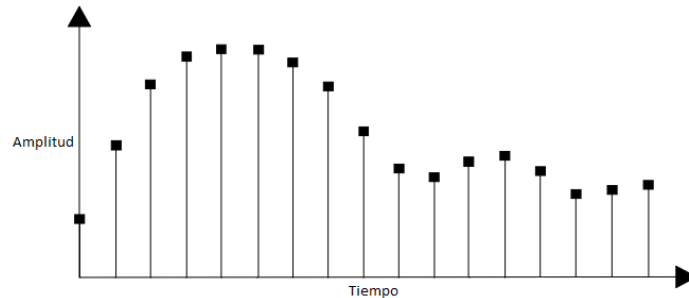


**1.3.2 Señales discretas.** Este grupo de señales, difieren en relación a las continuas en que solamente toman valores en determinados instantes de tiempo o en amplitudes de un conjunto fijo de posibilidades, por tal motivo se poseen una colección finita de puntos que describen el comportamiento de la señal, dependiendo de cuál de estas variables es discreta se clasifican en tres subgrupos.

- *Señales discretas en tiempo.* Este tipo de señales se caracterizan por solo presentar valores en determinados instantes de tiempo como se ve en la *Figura 4*, su amplitud puede estar definida en el rango de los números reales pero debido a la característica fundamental de estas, no están definidas entre cada intervalo de muestreo o toma de datos. Con el objetivo de representar de una mejor manera el

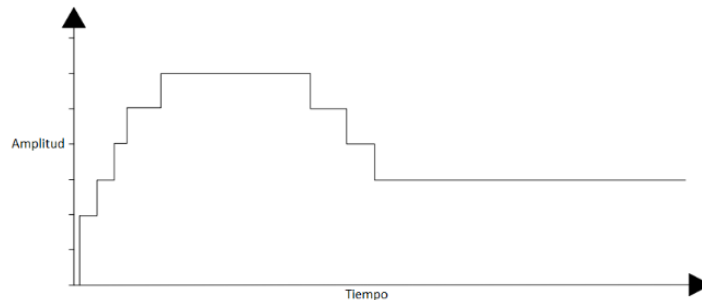
comportamiento de la señal, es muy frecuente que la distancia entre los instantes de tiempo sea suficientemente pequeña.

**Figura 4.** Señal discreta en tiempo [9]



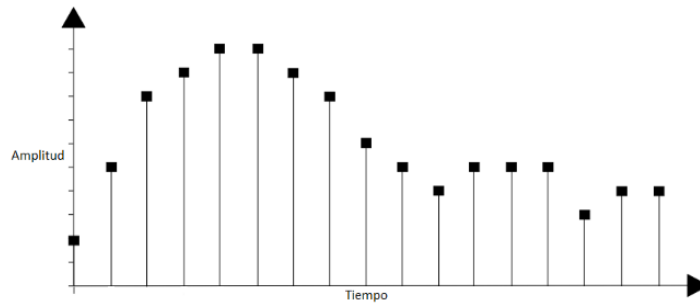
- *Señales discretas en amplitud.* Estas señales se caracterizan por tomar valor en cualquier instante de tiempo, pero a diferencia de las discretas en tiempo, su amplitud está definida dentro de un conjunto de números predeterminados como se observa en la **Figura 5**. Debido a esto, no se presentan resultados entre dos valores consecutivos del conjunto finito de valores posibles.

**Figura 5.** Señal discreta en amplitud [9]



- *Señales discretas en amplitud y tiempo.* Es una combinación de los dos tipos de señales discretas explicadas anteriormente, de manera simultánea se presentan amplitudes de un conjunto predeterminado de valores en determinados instantes de tiempo previamente establecidos (Ver **Figura 6**).

**Figura 6.** Señal discreta en amplitud y tiempo [9]



## 1.4 SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS

Se fundamenta en tomar una muestra de la señal física que se quiere estudiar, convertirla en una variable eléctrica que puede ser fácilmente transportada y digitalizarla, para posteriormente realizar el tratamiento específico de los datos por medio de un ordenador.

El tratamiento de las señales consiste en varias etapas, que buscan modificar la naturaleza de las mismas, con el objetivo de adecuarlas a cada uno de los dispositivos que intervienen en el sistema (Ver **Figura 7**). [10]

**Figura 7.** Sistema de adquisición de datos



**1.4.1 Sensor.** Es un elemento que produce una señal relacionada con la magnitud física que se pretende medir. Es muy común utilizar el término transductor para referirse a los sensores, ya que estos se definen como aquellos componentes que al someterlos a un cambio físico, experimentan una perturbación relacionada. En resumen, todos los sensores son transductores, sin embargo no todos los transductores son sensores. En un sistema de medición, se utilizan transductores además de sensores, de esta manera se varía la naturaleza de la señal con el objetivo de acondicionarla al siguiente dispositivo del sistema.

**1.4.2 Módulo Acondicionador de Señal.** Comúnmente, la señal de salida del sensor utilizado en el sistema de adquisición de datos, debe modificarse para que sea adecuada para el siguiente dispositivo, por ejemplo, la señal puede ser demasiado pequeña y es requerido amplificarla, ser analógica y es necesario digitalizarla o viceversa, ser un cambio en el valor de una corriente y convertirlo en una diferencia de potencial en una resistencia fija, etc. Todas las modificaciones que se le realizan se conocen como acondicionamiento de señal y puede ser realizada por un dispositivo o un grupo, generando de este modo un subsistema que se encargara de dicha operación. [11]

**1.4.3 Unidad de Adquisición de Datos.** El propósito de la unidad de adquisición de datos es recibir la señal del fenómeno físico como voltaje, corriente, temperatura, presión o sonido, y digitalizarla con el propósito de poder hacer uso de la información, mediante el tratamiento de datos en etapas posteriores del sistema. La adquisición de datos basada en PC utiliza una combinación de hardware, software de aplicación y un PC para realizar medidas. Mientras cada sistema de adquisición de datos se define por sus requerimientos de aplicación, cada sistema comparte una meta en común de adquirir, analizar y presentar información. [12]

**1.4.4 Instrumento Virtual (VI).** Son aquellos elementos diseñados por medio de una herramienta de programación gráfica, tienen la apariencia de instrumentos reales, pero, se realizan con analogías de funciones (pre-diseñadas) provenientes de los lenguajes de programación tradicionales. Contienen una interface interactiva, que pretende hacer amigable la presentación al usuario. Está compuesto por 2 espacios de trabajo (Panel Frontal y Diagrama de Bloques), los cuales difieren en su función dentro del instrumento. El panel frontal simula la presentación de un instrumento físico, es el que representa la interface hombre-máquina, permitiendo ingresar datos usando diferentes medios como lo son el teclado, el ratón y tener una visualización de los resultados en la pantalla. El diagrama de bloques es el espacio donde se realiza la programación como tal del instrumento, suministrando una solución gráfica a un problema en particular por medio de lógica cableada. [13]

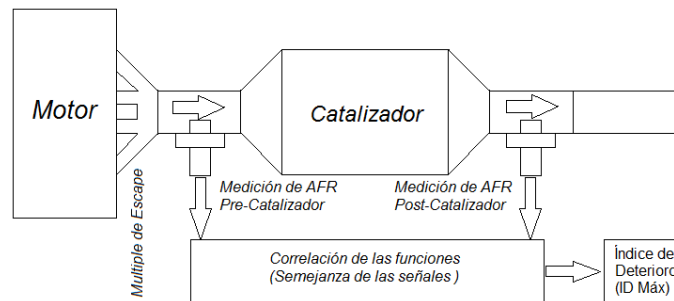


## 1.5 MÉTODO DE DIAGNÓSTICO DE DETERIORO DEL CATALIZADOR

Para determinar el desgaste del catalizador de un vehículo, se propone la aplicación de un método de diagnóstico no invasivo haciendo uso de la relación aire/combustible (*AFR*), y el concepto básico del funcionamiento del catalizador, mediante el cual se busca oxidar o reducir los productos nocivos de la combustión, el principio básico de este método se muestra en la **Figura 8**. La *AFR* se debe tomar en dos lugares para poder conocer la función que está cumpliendo el catalizador con respecto a los gases productos de la combustión, las tomas de datos corresponden a la entrada  $x(t)$  y salida  $y(t)$  del mismo.

En este proceso, los cambios de la *AFR* se miden utilizando sensores de oxígeno, lo cual permite identificar el estado de operación del catalizador, ya que si este se encuentra en un estado apropiado de funcionamiento, la *AFR* a la salida presenta una magnitud menor en comparación a la entrada. Por otra parte, si el catalizador se encuentra deteriorado, el cambio de la *AFR* no es menor, evidenciando de esta manera que no está cumpliendo con la función para la cual fue instalado.

**Figura 8.** Concepto básico del método de diagnóstico



Para poder realizar el procedimiento de manera correcta se deben cumplir algunas condiciones, entre las cuales se encuentran realizar las pruebas a diferentes regímenes estables de giro del motor, para este caso se escogieron 1000, 2000, 3000 y 4000 RPM, debido a que dependiendo de la velocidad del motor el flujo de emisiones será diferente.

Las muestras de datos se toman cerca de la entrada y la salida del catalizador respectivamente, además se asegura por medio de empaques que no exista adición de oxígeno entre los dos puntos. Con el fin de estabilizar las variables a medir, la prueba cuenta con un tiempo de estabilización de 30 segundos establecido en el diseño experimental, dado que si las mediciones se realizan durante la etapa de

calentamiento del motor, el comportamiento de las variables a medir no será estable y el catalizador no habrá llegado a su temperatura de funcionamiento.

El índice de deterioro ( $ID_{Máx}$ ), se calcula mediante el uso de dos herramientas de análisis de señales: la correlación cruzada de las señales de entrada-salida ( $R_{XY}$ ) (**Ecuación 8**) y la autocorrelación de la señal de entrada ( $R_{XX}$ ) (**Ecuación 9**). [14]

$$R_{XY} = \int x(t) * y(t-\tau) dt \quad 8$$

$$R_{XX} = \int x^2(t) dt \quad 9$$

La correlación cruzada permite conocer un valor representativo de la similitud entre las *AFR* de la entrada y de la salida del catalizador, de acuerdo a los promedios temporales y su transformada de Fourier.

Del mismo modo se aplica la autocorrelación de la entrada, determinando la relación existente en diferentes intervalos de tiempo de la *AFR* de entrada, generando de esta manera una relación de la similitud de esta a lo largo de la prueba. [15]

Durante la prueba se registran gran cantidad de resultados tanto de  $R_{XY}$  como de  $R_{XX}$ , por tal motivo, se seleccionan los valores máximos de ambas correlaciones de *AFR* y se procede al cálculo del  $ID_{Máx}$  para cada régimen de revolución probado, como se muestra en la **Ecuación 10**. [16]

$$ID_{Máx} = \frac{|R_{XY}|_{Máx}}{|R_{XX}|_{Máx}} \quad 10$$

Como cada régimen de velocidad del motor registra un  $ID_{Máx}$  diferente, este método permite conocer el comportamiento del catalizador bajo diferentes puntos de operación del motor. [14]

Como complemento a la determinación del índice de deterioro del catalizador mediante la correlación de las *AFR*, se realizó el cálculo de un índice del comportamiento de la temperatura en el catalizador ( $ID_T$ ) aplicando el mismo método de correlación con las temperaturas adquiridas a la entrada y salida del catalizador, este índice de temperatura ( $ID_T$ ) debe registrar valores diferentes a los que presenta el  $ID_{Máx}$  obtenido a partir de las *AFR*.

## 2. CARACTERIZACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE LOS SENSORES

### 2.1 SENSOR DE OXÍGENO (SONDA LAMBDA)

Este sensor es un transductor que genera una señal eléctrica (diferencia de potencial o un flujo de corriente) proporcional al Lambda ( $\lambda$ ) (Ver **Figura 9**), convencionalmente está ubicado entre el múltiple de escape y el catalizador. Se utiliza para medir la cantidad de oxígeno que contienen los gases de escape producto de la combustión, reportando información de la relación aire/combustible; señal que es enviada a la unidad de control del motor (ECU) para realizar ajustes en la inyección de combustible. En algunos vehículos actualmente se instala otro sensor de este tipo a la salida del catalizador con el propósito de evaluar el comportamiento de este dispositivo.

**Figura 9.** Sensor de oxígeno o sonda Lambda



Las condiciones de funcionamiento y operación del sensor lambda utilizado en estas pruebas están especificadas por el fabricante (Ver **Tabla 6**), por lo tanto se debe procurar por cumplir con ellas, con el propósito de realizar un conveniente acondicionamiento de las señales que permitan registrar una lectura acertada por medio del sistema de adquisición de datos. [17]

**Tabla 6.** Condiciones de operación del sensor Bosch LSU-4.2 [18]

Condiciones de operación	
Temperatura de almacenamiento	-40 °C a 100 °C
Temperatura de los gases de escape en el sensor	≤ 930 °C
Temperatura de la carcasa del sensor	≤ 570 °C
Temperatura del manguito para cable, lado del sensor	≤ 250 °C
Temperatura del manguito para cable, lado del cable	≤ 200 °C
Temperatura del cable y funda protectora	≤ 250 °C
Temperatura del conector	≤ 120 °C
Desplazamiento de la vibración	≤ 0.3 mm
Aceleración de la vibración	≤ 300 m/s
Max. Bombeo para mezcla rica	≥ -9 mA
Max. Bombeo para mezcla pobre	≤ 18 mA

Existen diversos tipos de sondas lambda, en algunas de ellas se muestra solamente un cambio brusco de la señal en el momento en que la mezcla varía el valor estequiométrico ( $\lambda=1$ ), ya que estas solo marcan dos niveles de tensión, solamente registra si se está trabajando con una mezcla rica o pobre en combustible, no presenta valores numéricos que puedan ser utilizados como medio de control. Para el caso del presente estudio, el sensor seleccionado es la sonda universal Bosch LSU-4.2, esta sonda posee unas características específicas (Ver **Tabla 7**) que permiten la generación de un voltaje que despliega una respuesta proporcional (lineal) para mezclas con  $7.35 \leq AFR \leq 22.39$  y  $0.5 \leq \lambda \leq 1.5$  para el caso de utilizar gasolina, de manera que permite un monitoreo más exacto y una respuesta rápida en diferentes condiciones de operación. [19]

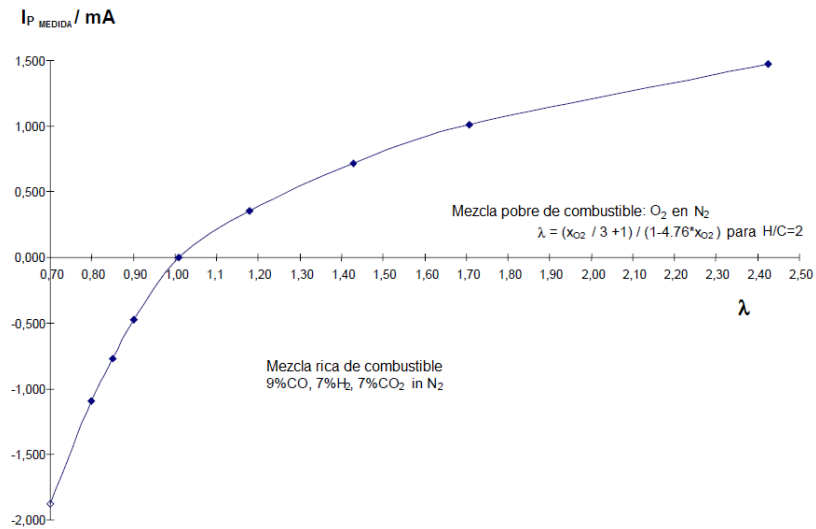
**Tabla 7.** Características generales del sensor Bosch LSU-4.2 [18]

Características generales	
Marca y tipo de sonda	Bosch LSU 4.2
Conexiones eléctricas	6
Temperatura nominal de operación	750 °C
Tensión y potencia nominal del calentador	9 V - 10 W
Resistencia nominal del calentador a 20 °C	3.2 $\Omega$
Máxima tensión efectiva del calentador	12 V
Resistencia nominal del aislamiento (carcasa-calentador)	$\geq 30 \text{ M}\Omega$
Temperatura máxima de calentamiento de las cerámicas	900 °C
Frecuencia mínima de control del calentamiento	$\geq 2 \text{ Hz}$

El funcionamiento de este sensor consiste en capturar una muestra de los gases de escape, para después compararla con la célula de concentración Nernst (siempre en  $\lambda=1$ ) y convertirla a la condición de referencia utilizando una célula de oxígeno.

La unidad de control del sensor determina el cambio de  $\lambda$  que se debe efectuar para llegar al valor de uno, generando una señal que cambia de acuerdo a los niveles de oxígeno medidos, y que es presentada al usuario por medio de una variable eléctrica (corriente), la curva del comportamiento del sensor se observa en la **Figura 10**. [17]

**Figura 10.** Curva característica del sensor Bosch LSU-4.2 [18]



## 2.2 SENSOR DE TEMPERATURA (TERMOPAR)

Este sensor es un transductor que permite medir la variación de la temperatura en los gases de escape. La señal suministrada obedece a una diferencia de potencial (mV) producida entre los materiales que componen el sensor (Ver **Figura 11**). A continuación se presenta el sensor de temperatura de gases de escape marca Autometer que se utilizó en el desarrollo de esta investigación.

**Figura 11.** Sensor de temperatura Autometer [20]



El funcionamiento de este sensor está basado en efectos termoeléctricos. Se trata de un circuito que es formado por dos metales conductores o aleaciones diferentes,

unidos en uno de sus extremos y entre los cuales existe una diferencia de temperatura que origina una fuerza electromotriz la cual es proporcional a la variación de temperatura que se presenta en la unión. El termopar Tipo K está compuesto de las siguientes aleaciones: Chromel [+] (10% cromo y 90% níquel) y Alumel [-] (2% aluminio, 90% níquel y 8% silicio-manganeso). Las características generales del sensor utilizado para la investigación se presentan en la **Tabla 8**. [17]

**Tabla 8.** Características generales del sensor de temperatura [17]

Características generales	
Tipo de sensor	Termopar Tipo K
Conexiones eléctricas	2
Colores de conexiones	Rojo – Amarillo
Rango de operación	-200 °C a 1 350 °C
Sensibilidad	≈ 41 $\mu\text{V} / ^\circ\text{C}$
Amarillo	Positivo
Rojo	Negativo

Con este tipo de sensor, se monitorea el comportamiento de la temperatura de los gases que son productos de la combustión a los diferentes regímenes de velocidad probados, con el objetivo de evidenciar las temperaturas a las cuales se ve expuesto el catalizador dependiendo de las condiciones de funcionamiento.

### 3. ACONDICIONAMIENTO DE SEÑAL Y UNIDAD DE ADQUISICIÓN DE DATOS

A las señales producto del proceso de medición se les debe realizar un acondicionamiento adecuándolas a los niveles compatibles con el elemento que hace la transformación a señal digital. El acondicionamiento suele ser necesario si la señal suministrada por el sensor no es adecuada para el dispositivo que continúa en el sistema de adquisición, en esta etapa la señal puede ser amplificada, reducida o filtrada según las necesidades.

Para este caso, el acondicionamiento de la señal lo realizan diversos dispositivos dependiendo de que variable se esté midiendo; en el caso de la señal de *AFR*, este es realizado por un controlador de banda ancha y un módulo auxiliar que permite la conexión con el chasis de la unidad de adquisición de datos.

Para la señal de temperatura solo se requiere del módulo auxiliar que permite el vínculo entre el sensor de temperatura y el chasis de la unidad de adquisición de datos de manera directa, sin la necesidad de un elemento adicional. [17]

A continuación se presenta la descripción de los dispositivos que componen el acondicionamiento de las señales medidas.

#### 3.1 CONTROLADOR DE BANDA ANCHA

El controlador de banda ancha es un dispositivo (Ver *Figura 12*) independiente que se conecta al sensor de oxígeno y se encarga de transformar la corriente emitida por el sensor en una diferencia de potencial entre cero y cinco Volts. [21]

*Figura 12.* Controlador de banda ancha (*Wideband*) [22]

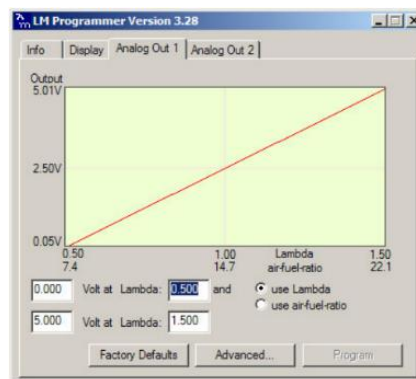




De los dos tipos de salidas que posee el controlador de banda ancha, se seleccionó para este estudio la que presenta un comportamiento lineal de voltaje con respecto al valor  $AFR$ , debido a que el rango es bastante amplio y abarca valores desde 7.35 hasta 22.39.

El equipo permite ajustar la recta de calibración (Ver **Figura 13**) de acuerdo al combustible utilizado dependiendo del valor  $AFR_T$  que requiere el combustible. En la **Tabla 9** se presentan los valores de  $AFR_T$  de algunos combustibles usados en vehículos convencionales.

**Figura 13.** Pantalla de calibración del controlador de banda ancha [21]



**Tabla 9.** Relación de aire/combustible estequiométrica de diversos combustibles [21]

Combustible	$AFR_T$ [kg de aire / kg de combustible]
Gasolina	14.7
LPG (Propano)	15.5
Metanol	6.4
Etanol	9.0
CNG (Gas natural comprimido)	17.2
Diésel	14.6

Los controladores de banda ancha poseen entre cuatro y siete cables, dependiendo del modelo y la referencia. Durante esta investigación se utilizaron dos modelos proporcionados por la empresa Innovate Motorsports:

- Modelo LC-1 que posee 6 cables.

- Modelo LC-2 que tiene 4 cables de conexión.

El resumen de la conexión de cada uno de estos dispositivos se puede observar en la **Tabla 10**.

**Tabla 10.** Conexiones eléctricas de los controladores de banda ancha [21] [23]

Color de cable	LC-1	LC-2
Rojo	Fuente 12 V	Fuente 12 V
Negro	Calibración	Tierra del sistema (0 V)
Amarillo	Salida análoga 1	Salida análoga 1
Café	Salida análoga 2	Salida análoga 2
Blanco	Tierra del sistema (0 V)	N / A
Azul	Tierra del calentador (0 V)	N / A

### 3.2 MÓDULOS DE ENTRADA/SALIDA (E/S) DE LA SERIE C

Los Módulos de E/S de la Serie C son unos dispositivos (Ver **Figura 14**) de medida autónomos, poseen en su interior los circuitos requeridos para realizar mediciones específicas, igualmente llevan a cabo la conversión de las señales, de análoga a digital y viceversa antes de que estas lleguen al chasis de la unidad de adquisición.

**Figura 14.** Módulos de E/S de la Serie C [24]



Los módulos se ubican en una plataforma de medida o chasis, la cual permite combinar diversos dispositivos con la idea de obtener un sistema de medidas personalizado, en el cual se realice la adquisición de diversas variables físicas.

Externamente los módulos son muy similares entre sí, solamente varían las entradas de las señales físicas. La plataforma permite mover los módulos entre sí, sin ninguna modificación adicional. [24]

**3.2.1 Módulo de medición de AFR.** La señal de oxígeno en los productos de combustión es obtenida como una diferencia de potencial (voltaje) que está en el rango de  $\approx 0\text{-}5$  Volts, dado que se utiliza el controlador de banda ancha. El modulo con el cual se adquiere esta señal es el **NI 9201** (Ver *Figura 15*) de la Serie C, permitiendo la entrada analógica de ocho canales a un máximo de velocidad acumulada de 500 000 muestras por segundo.

*Figura 15.* Módulo de medición de voltaje NI 9201 [25]



El módulo **NI 9201** posee las especificaciones indicadas en la *Tabla 11*, adicionalmente cuenta con protección contra picos de voltaje. [25]

**Tabla 11.** Módulo NI 9201: Resumen de especificaciones técnicas [25]

Módulo NI 9201	
Familia de productos	Industrial I / O
Tipo de medida	Voltaje
Form factor	Compact (DAQ-RIO)
Tipo de aislamiento	Canal a Tierra
Canales de una sola terminal	8
Resolución de entrada analógica	12 Bits
Rango de medida	- 10 V a 10 V
Precisión	0.015 V
Conector de E/S	Terminales de tornillo
Temperatura de operación	- 40 °C a 70 °C

**3.2.2 Modulo de medición de temperatura.** En esta investigación se contó con un módulo para la medición de la señal de temperatura se tiene el módulo de entrada de termopares **NI 9211** (Ver *Figura 16*).

**Figura 16.** Módulo de medición de temperatura NI 9211 [26]



Dentro de las especificaciones técnicas del módulo (Ver *Tabla 12*), se incluye la detección de termopares abiertos y compensación de unión fría para medidas de termopares de alta precisión. Igualmente el **NI 9211** cuenta con una doble barrera de aislamiento de canal a tierra para su seguridad e inmunidad a ruido. [26]

**Tabla 12.** Módulo NI 9211: Resumen de especificaciones técnicas [26]

Módulo NI 9211	
Familia de productos	Industrial I / O
Tipo de medida	Temperatura, Voltaje
Form factor	Compact (DAQ-RIO)
Tipos de termopares	J, K, T, E, N, B, R y S
Tipo de aislamiento	Canal a tierra
Canales de una sola terminal	4
Resolución de entrada analógica	24 Bits
Rango de medida	- 80 mV a 80 mV
Conector de E/S	Terminales de tornillo
Temperatura de operación	- 40 °C a 70 °C

### 3.3 CHASIS DE LA UNIDAD DE ADQUISICIÓN

Para poder acoplar los módulos requeridos para la adquisición de datos, se debe utilizar un chasis, el cual permite la interacción entre los sensores y el sistema de instrumentación virtual. En este caso se usa el chasis **NI cDAQ-9174** (Ver *Figura 17*), el cual es de la serie NI CompactDAQ con conexión USB de 4 ranuras diseñado para sistemas pequeños y portátiles de pruebas de medidas mixtas.

Este chasis permite hasta cuatro módulos de E/S de la Serie C, con la posibilidad de construir un sistema de medidas personalizado de entrada analógica, salida analógica y E/S digital.

**Figura 17.** Chasis de la unidad de adquisición NI cDAQ-9174 [28]



Los sistemas NI CompactDAQ combinan medidas de sensores con señales de voltaje, corriente y digital para crear sistemas personalizados de señal mixta con un solo cable USB al sistema de computación. [28]

## 4. DISEÑO Y PROGRAMACIÓN DE LA INSTRUMENTACIÓN VIRTUAL

En esta investigación se utilizó la programación gráfica, técnica basada en la realización de tareas mediante la asignación de iconos que representan: la información, el flujo de la misma, y las operaciones que realizan los distintos instrumentos del sistema. El software empleado para dicha programación fue LabVIEW, permitiendo hacer visible desde la programación el flujo de datos y facilitando la interpretación de los resultados. [17]

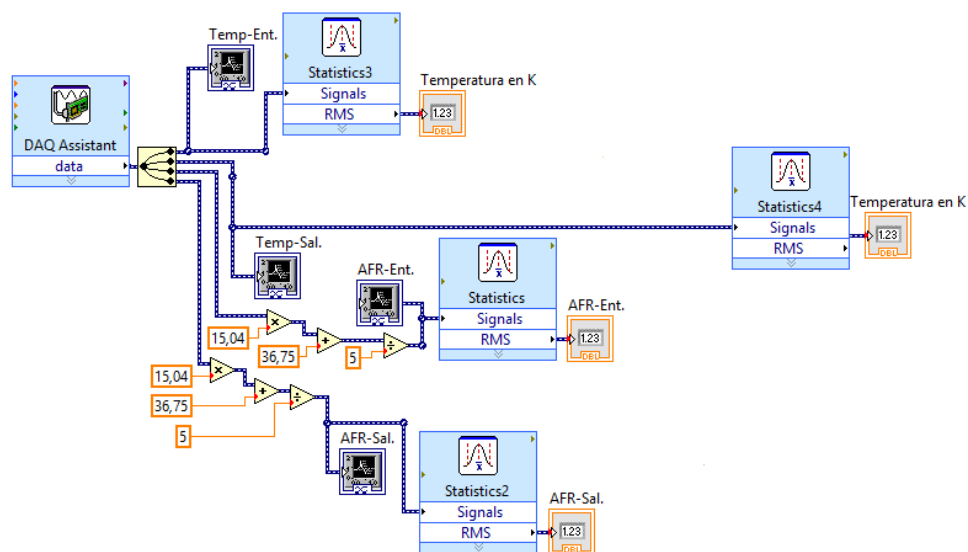
De acuerdo a los requerimientos del proyecto se tuvieron en cuenta diversas consideraciones para el buen desarrollo del mismo. Entre las consideraciones sobresalen:

- Utilizar las señales desde la unidad de adquisición.
- Leer las mediciones en tiempo real por medio de indicadores.
- Representar el comportamiento de las variables con la ayuda de gráficos a lo largo de la prueba.
- Desarrollar los métodos de diagnóstico propuestos.

En esta fase de la investigación se desarrolló un algoritmo (Ver **Figura 18**) con la finalidad de adquirir y distribuir las señales de modo que se puedan manipular independientemente, dando así el tratamiento específico a cada una de ellas.

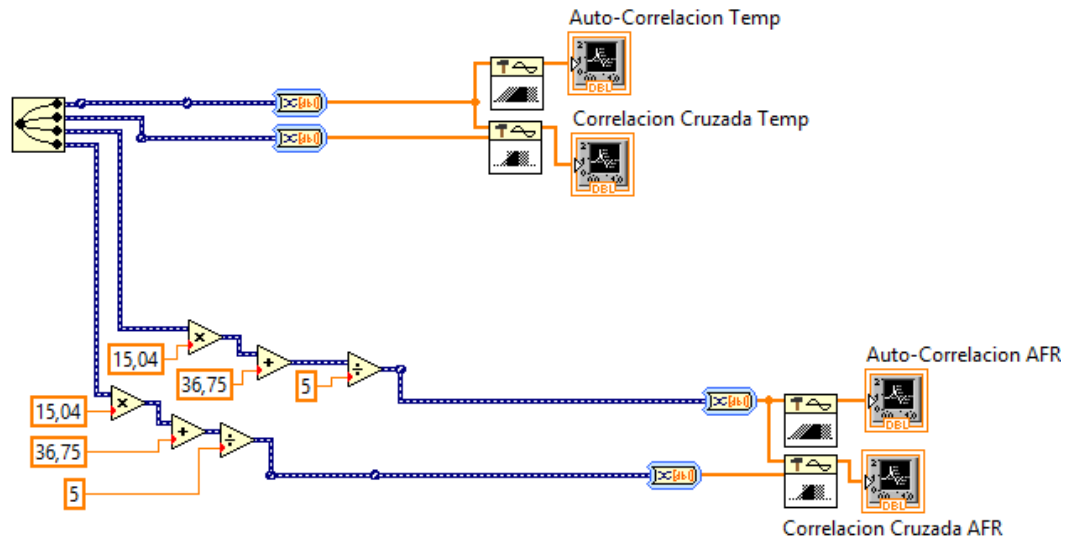
De este modo se visualiza, gráfica y almacena, el comportamiento de la AFR y la temperatura a lo largo de la prueba en los dos puntos de toma de datos.

**Figura 18.** Programación de la adquisición y visualización de datos



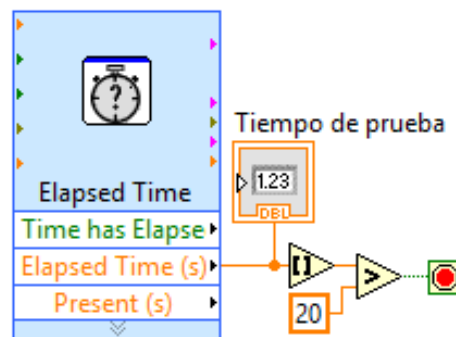
Dado que el objetivo de la investigación no consiste solamente en adquirir las señales, sino que además, se pretende realizar el cálculo de los índices de deterioro y temperatura a diferentes regímenes de funcionamiento del motor; se realizó el procedimiento descrito en el **Capítulo 1** mediante las funciones prediseñadas de LabVIEW. La programación de estos dos métodos de diagnóstico se observa conjuntamente en la **Figura 19**.

**Figura 19.** Programación de los métodos de diagnóstico



Adicionalmente se generó una configuración (Ver **Figura 20**) que permitió la adquisición de datos durante el tiempo estipulado para la prueba (20 segundos), sin la necesidad de interrumpir el proceso de adquisición de forma manual, adquiriendo solamente la cantidad de información requerida para el análisis.

**Figura 20.** Programación del temporizador de la prueba

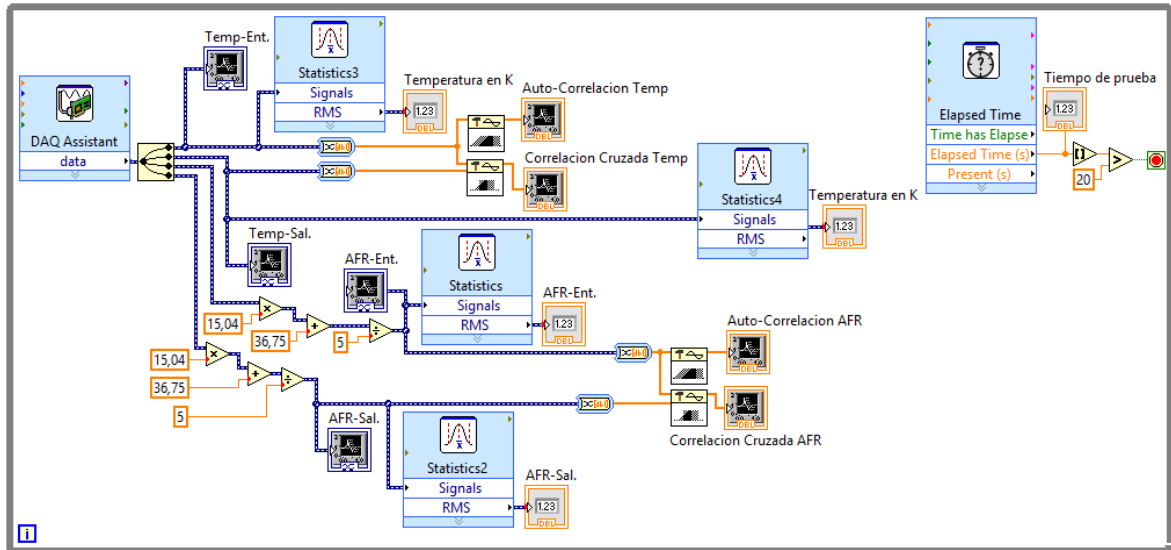




El conjunto de herramientas que permitieron el funcionamiento del instrumento, fueron articuladas para generar la adquisición y el procesamiento de datos de manera conjunta y constante; esto se logró gracias a la herramienta *While Loop* que contiene en su interior las funciones descritas y presentadas anteriormente.

En la **Figura 21** se presenta el instrumento completo utilizado para las pruebas.

**Figura 21.** Programación del instrumento virtual

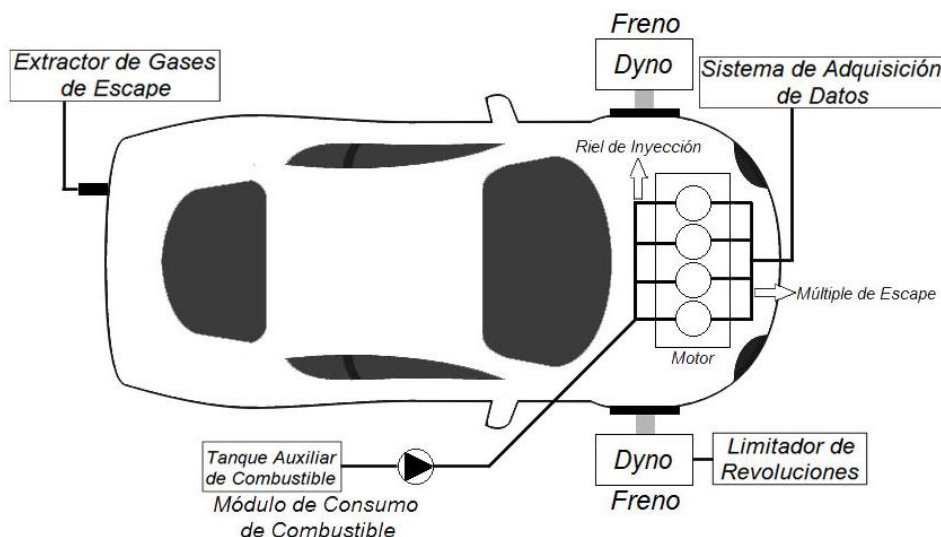


## 5. MONTAJE EXPERIMENTAL

Para el desarrollo de esta investigación se elaboró un montaje experimental mediante el cual se adecuaron diferentes dispositivos requeridos para el cumplimiento del objetivo general de este proyecto, además debido a que este tipo de ensayos de análisis de catalizadores son desarrollados por primera vez en este grupo de investigación, fue necesario el planteamiento de una metodología de pruebas.

A continuación se presenta un esquema en el cual se indica la distribución de los diferentes equipos empleados en la realización de las pruebas (Ver **Figura 22**) en el LPDA. La descripción de los equipos utilizados se realiza en las siguientes páginas.

**Figura 22.** Montaje experimental del vehículo de pruebas



### 5.1 VEHÍCULO DE PRUEBAS

Por ser el tipo de vehículo en el cual operan los catalizadores objeto de estudio, se empleó un Chevrolet Aveo 1.6 modelo 2010 (Ver **Figura 23**), uno de los cuales fue utilizado durante el proyecto Protocolo E20 por el Grupo de Investigación GENERGÉTICA las especificaciones del motor se encuentran en la **Tabla 13**.

**Figura 23.** Vehículo de pruebas Chevrolet Aveo 2010



**Tabla 13.** Especificaciones técnicas del motor [29]

Motor Chevrolet Aveo Sedan 1.6 L	
Tipo / Código	4 CIL DOHC 16 V
Posición	Delantera Transversal
Cilindrada	1 598 cm <sup>3</sup>
Potencia máxima	103 hp @ 6 000 RPM
Torque máximo	144.15 N.m @ 3 600 RPM
Relación de compresión	9.5
Diámetro / Carrera	79 cm / 81.5 cm
Combustible / Alimentación	Gasolina / MPFI

## 5.2 DINAMÓMETRO

Con el objetivo de mantener estable el régimen de giro del motor durante la prueba, se empleó un dinamómetro de cubos marca Dynapack de referencia 2 000 Nm. Para utilizar el equipo, es necesario acoplar el eje de tracción del vehículo (en este caso el delantero) a los dos cubos que cuentan en su interior con una bomba hidráulica,

un transductor de presión, una electroválvula, un depósito de aceite, un sensor óptico de revoluciones y un sistema de acople entre el eje de la bomba y la mordaza.

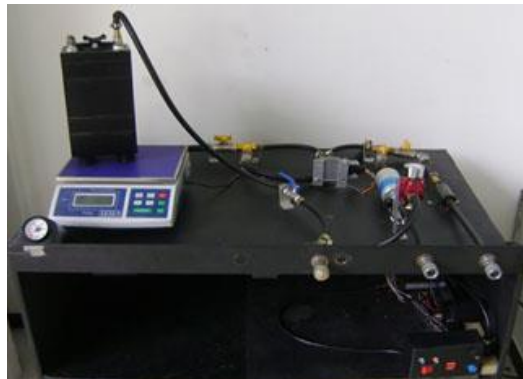
El eje de tracción del vehículo hace girar el rotor de la bomba produciendo un flujo de aceite en el interior del cubo; al operar la bomba se registra una variación en la presión del aceite proporcional a la velocidad de giro del rotor, esta variación es medida por un sensor transductor de presión que convierte la señal en una corriente eléctrica que es procesada en un módulo de tratamiento de datos del equipo, el cual entrega como resultado el par torsor del vehículo.

La electroválvula se encarga de restringir el flujo de aceite al interior del sistema, realizando el control de carga que realiza el dinamómetro sobre el vehículo, para la medición del par de torsión así como la estabilización o freno de vehículo a distintos regímenes estables de operación. [30]

### 5.3 MÓDULO DE CONSUMO DE COMBUSTIBLE

El suministro de combustible para las pruebas se llevó a cabo con un módulo externo de consumo de combustible (Ver *Figura 24*).

*Figura 24. Módulo de consumo de combustible*

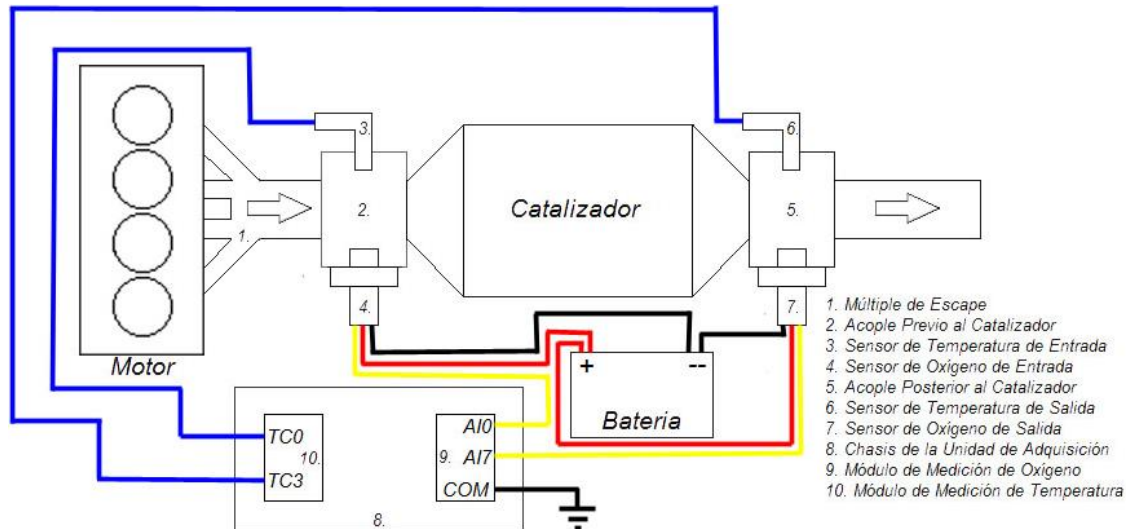


Este módulo está equipado con bombas de combustible externas, que permiten proporcionar presiones en dos rangos diferentes de operación dependiendo la tecnología de alimentación de combustible (sistema con carburador o inyección electrónica). Además cuenta con un tanque auxiliar de almacenamiento de combustible y un regulador de presión que permite ajustar la presión del sistema de alimentación de combustible, según las especificaciones del vehículo. [30]

## 5.4 MONTAJE DEL SISTEMA DE MEDICIÓN

A continuación se describe la instalación de los sensores para determinar la *AFR* y la temperatura de los gases de escape, así como las distintas conexiones de estos al sistema de adquisición de datos (Ver *Figura 25*).

**Figura 25.** Montaje experimental del sistema de adquisición de datos



Las sondas Lambda, se energizan mediante una fuente externa de 12 V y para su correcto funcionamiento es necesario conectarlas también a una tierra. El cable que transmite la señal de *AFR* se conecta a una de las entradas del módulo **NI 9201** (Ver *Capítulo 3*) y adicionalmente el puerto *COM* del módulo debe ir conectado a una referencia (0 V).

Los sensores de temperatura requieren de una conexión un poco simple debido a su naturaleza (termopar), por lo cual los dos cables deben conectarse directamente a una de las entradas del módulo **NI 9211**.

Debido a que el vehículo de pruebas, solo cuenta con una sonda Lambda proporcionada por el fabricante a la entrada del catalizador, elemento que no puede ser desconectado porque genera un error en la ECU que controla el motor; se ubicaron un par de acoples auxiliares (Ver *Figura 26*) antes y después del catalizador, que permitieron la instalación tanto de la sonda Lambda como de los sensores de temperatura.

**Figura 26.** Acoples para conexión de sensores



## 6. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE LAS PRUEBAS EXPERIMENTALES

A continuación se presentan los resultados de las pruebas experimentales (Ver **Tabla 14**) realizadas en el vehículo Chevrolet Aveo en las instalaciones del LPDA. Con estas pruebas fue posible determinar los índices de deterioro y temperatura, de un catalizador nuevo y dos usados durante 100 000 km con diferentes mezclas de etanol-gasolina.

Para determinar los valores promedio de los índices se realizaron seis repeticiones para cada prueba. No se realizó una mayor cantidad de repeticiones por razones de tiempo y costo, a pesar de que es el tamaño mínimo de muestras requerido con respecto a la teoría estadística de la distribución normal.

**Tabla 14.** Resultados de las pruebas experimentales

Régimen [RPM]	Nuevo		E20		E10	
	ID <sub>T</sub>	ID <sub>Máx</sub>	ID <sub>T</sub>	ID <sub>Máx</sub>	ID <sub>T</sub>	ID <sub>Máx</sub>
1000	0.83624	0.91564	0.72050	0.96982	0.85278	0.99870
	0.82828	0.92791	0.82236	1.00050	0.82881	1.00030
	0.85564	0.92645	0.81914	1.00054	0.83166	0.99929
	0.84621	0.93720	0.83180	1.00201	0.82476	0.99743
	0.81757	0.96758	0.83225	0.99956	0.82098	0.99783
	0.84228	0.94098	0.82913	1.00011	0,81922	0.99910
2000	0.90531	0.96977	0.87448	0.99429	0.87875	0.99116
	0.89932	0.96203	0.89473	0.99257	0.88413	0.98861
	0.90390	0.96037	0.90566	0.99046	0.88936	0.99023
	0.90545	0.96035	0.91096	0.99054	0.87604	0.98867
	0.90006	0.96032	0.90896	0.96762	0.88707	0.99277
	0.88992	0.95774	0.93297	0.98612	0.88335	0.98785
3000	0.91851	0.97059	0.97233	0.98759	0.91218	0.99035
	0.94370	0.96333	0.96849	0.98486	0.91666	0.98565
	0.93850	0.96426	0.96802	0.98465	0.91888	0.98740
	0.94344	0.96271	0.97122	0.98580	0.89909	0.99133
	0.94600	0.96369	0.96616	0.98699	0.92730	0.98795
	0.94395	0.96264	0.97113	0.98512	0.90644	0.98436
4000	0.94446	0.96777	0.98726	0.98272	0.93761	0.98239
	0.94983	0.96650	0.98823	0.98476	0.93383	0.98345
	0.96905	0.95873	0.98680	0.98489	0.93641	0.98243
	0.95599	0.96610	0.99142	0.98353	0.91169	0.98544
	0.93849	0.96990	0.98528	0.98448	0.93370	0.96220
	0.93866	0.97090	0.99048	0.98246	0.94964	0.98060

Teniendo en cuenta el reducido tamaño de la muestra, se realizó el análisis estadístico de los resultados por medio de la distribución *t-Student*; por lo general para esta cantidad de datos el nivel de confianza es superior al 80%, y debido a que se trata de un tipo de ensayo mecánico se usa un nivel de confianza de 95%. [31]

De acuerdo al valor del criterio *t-Student* para **k** grados de libertad ( $k = n-1$ ), mediante la **Ecuación 11** se determinó el valor confiable de los índices que son objeto de estudio para los regímenes de giro de motor probados.

$$N = \bar{x} \pm t \cdot \frac{S}{\sqrt{n}} \quad 11$$

Donde:

- $N$  = Intervalo de confianza.
- $\bar{X}$  = Media aritmética de los datos.
- $t$  = Valor del criterio *t-Student*.
- $S$  = Desviación estándar.
- $n$  = Numero de datos.

Para este caso, a partir del nivel de confianza utilizado (95%) y los grados de libertad (5), se determinó el valor del criterio *t-Student* utilizado (2.571).

## 6.1 RESULTADOS DEL ÍNDICE DE TEMPERATURA (ID<sub>T</sub>)

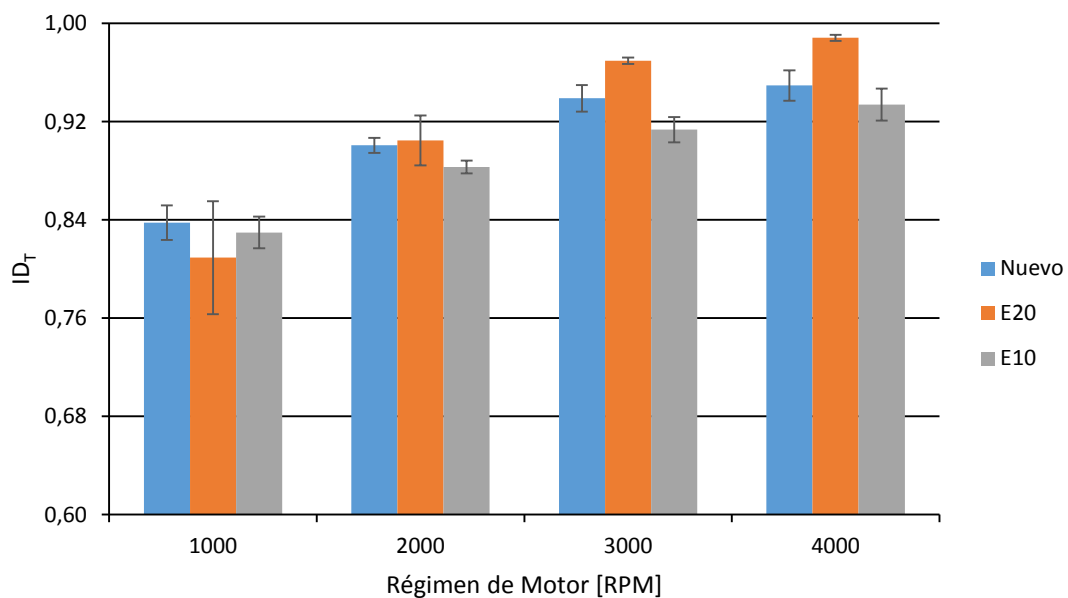
En la **Tabla 15** se muestran los valores obtenidos a partir de la aplicación de la distribución *t-Student* a los resultados del ID<sub>T</sub> de los catalizadores utilizados, se especifican los valores promedio, la desviación estándar y los límites tanto superior como inferior para los regímenes de giro de motor probados.



**Tabla 15.** Índices de temperatura

Régimen [RPM]	Variables Estadísticas	ID <sub>T</sub>		
		Nuevo	E20	E10
1000	<b>Media [<math>\bar{X}</math>]</b>	<b>0.83771</b>	<b>0.80920</b>	<b>0.82970</b>
	Des. Est. [S]	0.01350	0.04377	0.01223
	Lim. Super.	0.85187	0.85514	0.84253
	Lim. Infer.	0.82354	0.76325	0.81687
2000	<b>Media [<math>\bar{X}</math>]</b>	<b>0.90066</b>	<b>0.90463</b>	<b>0.88312</b>
	Des. Est. [S]	0.00587	0.01934	0.00500
	Lim. Super.	0.90683	0.92492	0.88836
	Lim. Infer.	0.89450	0.88433	0.87787
3000	<b>Media [<math>\bar{X}</math>]</b>	<b>0.93902</b>	<b>0.96956</b>	<b>0.91343</b>
	Des. Est. [S]	0.01035	0.00237	0.00989
	Lim. Super.	0.94988	0.97204	0.92380
	Lim. Infer.	0.92816	0.96708	0.90305
4000	<b>Media [<math>\bar{X}</math>]</b>	<b>0.94941</b>	<b>0.98824</b>	<b>0.93381</b>
	Des. Est. [S]	0.01174	0.00232	0.01234
	Lim. Super.	0.96173	0.99068	0.94676
	Lim. Infer.	0.93710	0.98581	0.92086

**Figura 27.** Comparación de los índices de temperatura



De acuerdo a la **Figura 27** se observa un incremento del  $ID_T$  en los catalizadores probados con respecto al régimen de giro del motor, esta situación se pudo presentar debido al aumento del caudal de los gases producto de la combustión, lo que no permite que la reacción al interior del catalizador se desarrolle en su totalidad. También se evidencia que en tres de los cuatro estados de operación estudiados el comportamiento de los valores es similar, donde el máximo  $ID_T$  se da en el catalizador que funcionó durante 100 000 km con la mezcla E20 y el mínimo en el que operó con la mezcla E10.

Con respecto a los valores obtenidos a 1000 RPM el comportamiento es diferente, en este régimen de giro del motor se aprecia que el máximo  $ID_T$  se da en el catalizador nuevo y el mínimo en el que funcionó durante 100 000 km con la mezcla E20. En este estado de operación también se presenta el intervalo de confianza más amplio de todas las pruebas realizadas, lo cual pudo generar que los resultados obtenidos con el catalizador que operó con la mezcla E20 difirieran con respecto a los demás regímenes probados.

Observando el comportamiento de los  $ID_T$  en los diferentes regímenes de giro probados, se aprecia un mayor índice de temperatura en el catalizador nuevo comparado con el que fue usado durante 100 000 km con la mezcla E10. Esta situación concuerda con la hipótesis planteada al inicio de esta investigación, en la cual se esperaba que el catalizador que operó con la mezcla E10 presentara una mayor transferencia de calor a través de su carcasa debido a su deterioro, por tal motivo la similitud de las temperaturas es menor.

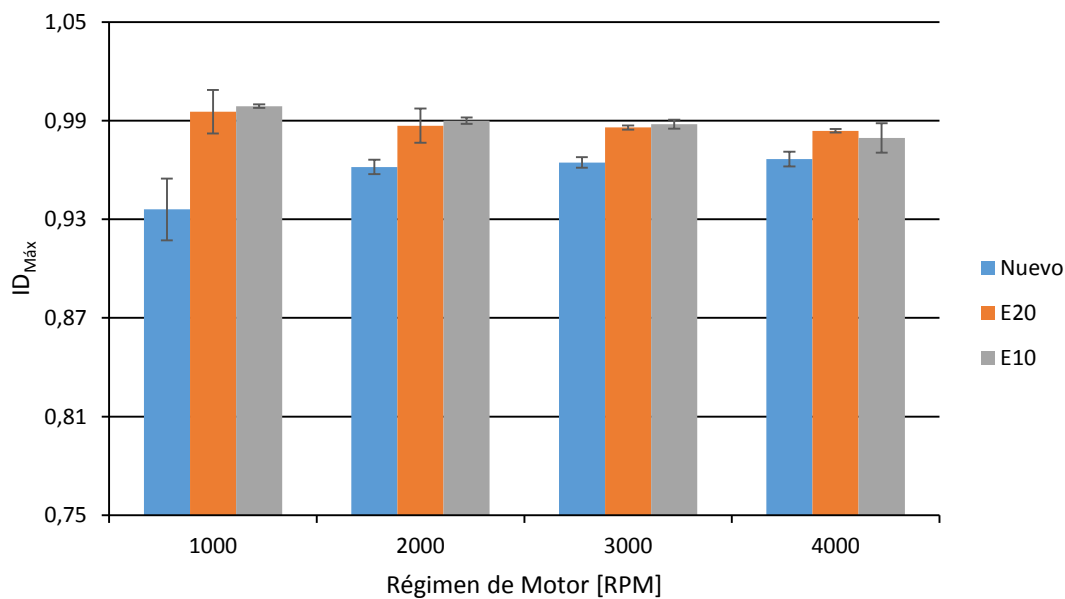
## **6.2 RESULTADOS DEL ÍNDICE DE DETERIORO ( $ID_{Máx}$ )**

De igual manera que con el  $ID_T$  se aplica la distribución *t-Student* a los resultados del  $ID_{Máx}$  obtenidos en las pruebas. En la **Tabla 16** se especifican los valores promedio, la desviación estándar y los límites para los regímenes de giro probados.

**Tabla 16.** Índices de deterioro

Régimen [RPM]	Variables Estadísticas	ID <sub>Máx</sub>		
		Nuevo	E20	E10
1000	<b>Media [<math>\bar{X}</math>]</b>	<b>0.93596</b>	<b>0.99542</b>	<b>0.99878</b>
	Des. Est. [S]	0.01786	0.01257	0.00104
	Lim. Super.	0.95471	1.00861	0.99987
	Lim. Infer.	0.91721	0.98223	0.99769
2000	<b>Media [<math>\bar{X}</math>]</b>	<b>0.96176</b>	<b>0.98693</b>	<b>0.98988</b>
	Des. Est. [S]	0.00416	0.00985	0.00186
	Lim. Super.	0.96612	0.99727	0.99183
	Lim. Infer.	0.95740	0.97660	0.98793
3000	<b>Media [<math>\bar{X}</math>]</b>	<b>0.96454</b>	<b>0.98583</b>	<b>0.98784</b>
	Des. Est. [S]	0.00302	0.00121	0.00267
	Lim. Super.	0.96771	0.98710	0.99064
	Lim. Infer.	0.96136	0.98457	0.98504
4000	<b>Media [<math>\bar{X}</math>]</b>	<b>0.96665</b>	<b>0.98381</b>	<b>0.97942</b>
	Des. Est. [S]	0.00431	0.00106	0.00859
	Lim. Super.	0.97117	0.98492	0.98843
	Lim. Infer.	0.96213	0.98270	0.97041

**Figura 28.** Comparación de los índices de deterioro



En la **Figura 28** se aprecia que el comportamiento del  $ID_{Máx}$  con respecto al régimen de giro del motor, difiere entre los catalizadores usados con respecto al nuevo. En los catalizadores que fueron usados durante 100 000 km con las mezclas E10 y E20 se presenta una pequeña disminución (el valor es similar) a medida que se aumenta el régimen de giro, mientras que en el catalizador nuevo se muestra un incremento con relación a los regímenes probados.

Se puede evidenciar que para los estados estables de operación probados, el  $ID_{Máx}$  de los catalizadores usados es superior con respecto al nuevo, adicionalmente en tres (1000, 2000, 3000 RPM) de los cuatro regímenes de giro del motor probados, el comportamiento de los resultados es similar, mostrando un índice mayor en el catalizador que operó con la mezcla E10 y siendo muy similar al que funcionó paralelamente con la mezcla E20. Este comportamiento concuerda con la hipótesis planteada al inicio de la investigación, la cual sugería que debido a la composición de la mezcla E10 el deterioro del catalizador que operó durante 100 000 km con este combustible debería ser superior.

En el mayor régimen de giro probado (4000 RPM) se observa un comportamiento diferente de los resultados con respecto a los demás estados estables de operación, en este punto el  $ID_{Máx}$  del catalizador que operó con la mezcla E20 presenta una magnitud mayor en comparación con los otros catalizadores, pero también se observa que para el catalizador que operó con la mezcla E10 el intervalo de confianza es el más amplio de las pruebas realizadas en este régimen, lo cual pudo generar las discrepancias con respecto a los resultados en este régimen de giro. Esta situación pudo ocurrir debido a las altas temperaturas que se generan, lo cual se confirma por medio de la **Tabla 15** y la **Figura 27**, donde se observa que a 4000 RPM el  $ID_T$  del catalizador que operó con la mezcla E20 es mayor, evidenciando la similitud de las temperaturas.

## 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 7.1 CONCLUSIONES

Esta investigación permitió realizar la medición de algunas variables, que por medio de un análisis de señales, indicaron el comportamiento del catalizador de un vehículo después de operar con diferentes mezclas de etanol-gasolina E10 y E20. En cumplimiento con el objetivo general, a partir de las mediciones realizadas se encontraron los índices de deterioro y temperatura de un catalizador nuevo y dos usados en cuatro estados estables de operación.

El desarrollo de esta investigación promovió el cumplimiento de los objetivos específicos que se plantearon al inicio de la misma:

- Caracterizar los sensores de oxígeno y temperatura que se instalarán en la prueba.
- Elaborar el montaje experimental, usando los sensores de oxígeno y temperatura en el convertidor catalítico.
- Registrar y analizar las mediciones ejecutadas por los sensores de oxígeno y temperatura.
- Comparar los resultados del diagnóstico de los convertidores catalíticos usados con respecto al catalizador nuevo.
- Implementar en el Laboratorio de Pruebas Dinámicas Automotrices la metodología para determinar los índices de deterioro y temperatura de un convertidor catalítico.

A partir de la prueba desarrollada, se concluye que la utilización de equipos de adquisición de datos e instrumentos virtuales, presenta ventajas en comparación a los equipos de medición tradicionales. Esto se debe a la versatilidad de aplicaciones que se pueden diseñar sin incurrir en aumento de costo ni cambios de hardware, incorporando nuevos procedimientos de acuerdo a las necesidades del usuario.

Con respecto a las variables adquiridas, las cuales permiten determinar el desempeño de los catalizadores operados con mezclas de etanol-gasolina E10 y E20, bajo diferentes regímenes de giro del motor se puede concluir que:

- La metodología propuesta en este estudio surge como una herramienta útil para determinar el desgaste de los catalizadores de los vehículos con respecto a su

estado inicial, con el objetivo identificar un dispositivo que se encuentra deteriorado.

- A bajas revoluciones de motor (1000 RPM), el comportamiento del  $ID_T$  en el catalizador que operó con mezcla E20 es menor con respecto a los otros dos, diferente a los demás regímenes de giro donde este catalizador presenta el mayor  $ID_T$ . En este estado de operación se presenta un rango de confianza más amplio debido a la presencia de un valor que difiere bastante con respecto a las demás pruebas, lo cual pudo ocurrir como consecuencia de la baja temperatura del motor al momento de iniciar la toma de datos. Esta situación pudo generarse debido a las condiciones ambientales, dado que las pruebas de cada catalizador se realizaron en días diferentes.
- El  $ID_T$  con respecto a la velocidad del motor es directamente proporcional en los tres catalizadores, debido al aumento del flujo de los gases de escape que son productos de la combustión, esto genera que la disminución de la temperatura de la salida del catalizador con respecto a la entrada sea menor, produciendo una mayor similitud entre las temperaturas de los dos puntos que son objeto de estudio. Esta condición de aumento del  $ID_T$  con respecto al régimen, representa una menor transferencia de calor al ambiente, lo cual conlleva a que el calor de los productos de la combustión permanece al interior del catalizador.
- Con respecto a la hipótesis planteada al inicio de la investigación, se comprobó que en tres de los cuatro regímenes de motor estudiados, se observa un  $ID_{Máx}$  mayor en el catalizador que operó durante 100 000 km con la mezcla E10. También se observa que en todos los regímenes estudiados el mínimo valor de  $ID_{Máx}$  se da en el catalizador nuevo, debido a que este último era el punto de referencia para el análisis.
- Los valores encontrados en los catalizadores usados durante 100 000 km, presentan  $ID_{Máx}$  muy similar en todos los regímenes de giro del motor que fueron probados. Debido al extenso tiempo en el que operaron, la diferencia entre ellos es pequeña en términos de deterioro, por lo cual no se puede concluir cuál de ellos es mejor con respecto a las emisiones de gases, debido a que faltaría la medición de estas en los regímenes probados y con cada uno de los catalizadores.

## 7.2 RECOMENDACIONES

Al finalizar esta investigación, se propone:

- Desarrollar futuros estudios, en los cuales se realicen pruebas midiendo las emisiones de gases que son producto de la combustión antes y después del catalizador con la ayuda de analizadores de gases, con el objetivo de determinar la efectividad del catalizador en relación a la concentración de los gases de escape.
- Ejecutar pruebas de emisiones de gases para múltiples estados estables de operación con los tres catalizadores que fueron usados en esta investigación y un tubo conector, para determinar la diferencia de las emisiones de gases expulsadas por el escape con cada uno de los dispositivos.
- Realizar pruebas en diferentes automóviles de un mismo tipo, pero diferente modelo, para determinar los índices de temperatura y deterioro de los catalizadores con respecto al tiempo de operación.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Banco Nacional de Desarrollo Económico y Social (BNDES) and Centro de Gestión y Estudios Estratégicos (CGEE), *Bioetanol de Caña de Azúcar: Energía para el Desarrollo Sostenible*, 1st ed. Río de Janeiro, 2008.
- [2] Y. Cengel and M. Boles, *Termodinámica*, 7th ed. México D.F., 2012.
- [3] J. Heywood, *Internal Combustion Engine Fundamentals*, vol. 21. 1988.
- [4] AS Catalizadores, “En qué consiste el catalizador,” Beriain (España), 2015.
- [5] Lenntech, “Platino - Pt,” 2015. [Online]. Disponible en: <http://www.lenntech.es/periodica/elementos/pt.htm>.
- [6] Lenntech, “Paladio - Pd,” 2015. [Online]. Disponible en: <http://www.lenntech.es/periodica/elementos/pd.htm>.
- [7] Lenntech, “Rodio - Rh,” 2015. [Online]. Disponible en: <http://www.lenntech.es/periodica/elementos/rh.htm>.
- [8] PROSIL Autopartes, “Convertidor Catalítico,” 2015. [Online]. Disponible en: [http://prosil.com.mx/files/convertidor\\_catalitico\\_web.pdf](http://prosil.com.mx/files/convertidor_catalitico_web.pdf).
- [9] S. Gomáriz, D. Biel, J. Matas, and M. Reyes, *Teoría de control. Diseño electrónico*, 1st ed. Barcelona, 1998.
- [10] J. Ramos, J. Rosell, and P. Riu, *Sistemas de instrumentación*, 1st ed. Barcelona, 1995.
- [11] W. Bolton, *Mecatrónica: Sistemas de Control Electrónico en Ingeniería Mecánica y Eléctrica*, 2nd ed. Barcelona, 2001.
- [12] National Instruments, “Adquisición de datos (DAQ),” 2015. [Online]. Disponible en: <http://www.ni.com/dataacquisition/esa/whatis.htm>.
- [13] G. Holguín, S. Pérez, and Á. Orozco, *Curso Básico de LabVIEW 6i*. Pereira, 2002.
- [14] N. Kurihara, H. Kimura, T. Ishii, and Y. Takaku, “An On-Board Diagnosis Method for Three-Way Catalyst Deterioration,” *SAE*, pp. 299–303, 1997.
- [15] A. Moreno, “Señales y Sistemas I,” 2009. [Online]. Disponible en: [ocw.upc.edu/download.php?file=15011906/tema4\\_correlaci-2742](http://ocw.upc.edu/download.php?file=15011906/tema4_correlaci-2742).



- [16] I. Arsie, G. Flauti, C. Pianese, G. Rizzo, C. Barberio, R. Flora, G. Serra, and C. Siviero, "On-Board diagnosis of SI engine catalyst efficiency a confidence level analysis," pp. 1–6, 2000.
- [17] J. Herrera, "Diseño y construcción de un modulo de instrumentacion virtual para la adquisición de señales en el motor de un automovil," Universidad Tecnológica de Pereira, 2010.
- [18] BOSCH, "Technical Customer Information: Planar Wideband Lambda Sensor," 2001.
- [19] Todo Mecanica, "Sonda Lambda y otros sensores," 2006. [Online]. Disponible en: <http://www.todomecanica.com/blog/71-sonda-lambda-y-sensores.html>.
- [20] Autometer, "Sensor EGT Autometer." [Online]. Disponible en: [http://www.autometer.com/media/catalog/product/cache/1/image/1500x/040ec09b1e35df139433887a97daa66f/5/2/5251\\_1.jpg](http://www.autometer.com/media/catalog/product/cache/1/image/1500x/040ec09b1e35df139433887a97daa66f/5/2/5251_1.jpg).
- [21] Innovate Motorsports, "LC-1 Digital Air / Fuel Ratio (Lambda) Sensor Controller Manual."
- [22] Innovate Motorsports, "LC-1 Wideband Controller." [Online]. Disponible en: [http://www.innovatemotorsports.com/products/images/LC\\_1.jpg](http://www.innovatemotorsports.com/products/images/LC_1.jpg).
- [23] Innovate Motorsports, "LC-2 Digital Air / Fuel Ratio (Lambda) Sensor Controller Manual."
- [24] National Instruments, "Módulos de E/S de la Serie C para NI CompactDAQ," 2015. [Online]. Disponible en: <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/es/nid/202546>.
- [25] National Instruments, "Manual de Especificaciones: NI 9201," 2015.
- [26] National Instruments, "Manual de Especificaciones: NI 9211," 2015.
- [27] National Instruments, "Chasis de NI CompactDAQ," 2015. [Online]. Disponible en: <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/es/nid/207533>.
- [28] National Instruments, "Manual de Especificaciones: NI cDAQ-9174," pp. 1–10, 2013.
- [29] General Motors, "Ficha Técnica Chevrolet Aveo," 2013.

- [30] S. Ospina, "Determinación de las emisiones en regímenes de estado estable de un vehículo liviano operando con mezcla de Etanol y Gasolina, E20," Universidad Tecnológica de Pereira, 2014.
- [31] G. Calle, "Determinación del error en los ensayos mecánicos," Pereira.