



**CONSTRUCCION DE UN MODULO SENSOR-TRANSMISOR PARA LAS EMISIONES
DE CO, CO₂, C₃H₈ Y OPACIDAD EN MOTORES DIESEL SIN CARGA**

**MARY LUZ MALDONADO HERRERA
INGAR EUYENI VEGA GODOY**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA**

2004



**CONSTRUCCION DE UN MODULO SENSOR-TRANSMISOR PARA LAS EMISIONES
DE CO, CO₂, C₃H₈ Y OPACIDAD EN MOTORES DIESEL SIN CARGA**

**MARY LUZ MALDONADO HERRERA
INGAR EUYENI VEGA GODOY**

**Tesis para optar por el título de
Ingeniero Químico**

**Director
Dr. EDGAR FERNANDO CASTILLO MONROY**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA**

2004

A las dos personitas más importantes en mi vida, papá y mamá, quienes con su esfuerzo y dedicación hicieron posible este sueño. A Wilson, Fernando y Nelson por acompañarme y apoyarme durante esta etapa. Y principalmente a DIOS que me permitió conocerlos, compartir y aprender de ellos y de otros, sin él nada de esto sería posible.

MARY LUZ

***A Dios, porque sin él no sería lo que soy hoy.
A mis padres, por su esfuerzo y apoyo
incondicional en los momentos más difíciles .
A mis familiares, por sus buenos consejos en el
momento apropiado.***

INGAR

AGRADECIMIENTOS

Al profesor Edgar Fernando Castillo Monroy, por su dirección y colaboración en el desarrollo del proyecto.

Al Centro de Estudios e Investigaciones Ambientales de la UIS (CEIAM), bajo la dirección del Dr. Edgar Fernando Castillo, por su apoyo y confianza.

Al Grupo de Investigación en Energía y Medio Ambiente (GIEMA), bajo la dirección del Dr. Jorge Luis Chacón Velasco, por su apoyo logístico.

A COLCIENCIAS y CINTEL por financiar proyectos de este tipo.

Al Ingeniero Jorge García por su paciencia y dedicación para ayudarnos a cumplir nuestra meta.

A la empresa Juan Barajas y Compañía por compartir sus conocimientos y experiencias fundamentales para llevar a cabo el proyecto.

A William Calderón por su ayuda y sus consejos cuando más lo necesitábamos.

A los Técnicos Henry, Gonzalo, Eduardo, Wilson y Pedro por su colaboración en la construcción del módulo.

A todas las personas que de una u otra manera contribuyeron en el desarrollo del proyecto.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	1
2. MARCO TEORICO	3
2.1 COMBUSTION EN EL MOTOR DIESEL	3
2.1.1 RELACIÓN AIRE/COMBUSTIBLE	4
2.1.2 FUNCIÓN LAMBDA (λ)	5
2.1.2.1 Variaciones de Mezcla	5
2.2 EMISIONES DE ESCAPE DEL MOTOR DIESEL	6
2.2.1 Características de las sustancias tóxicas del gas de Escape	7
2.2.1.1 Dióxido de Carbono (CO ₂).	7
2.2.1.2 Vapor de Agua (H ₂ O).	8
2.2.1.3 Monóxido de Carbono (CO).	8
2.2.1.4 Hidrocarburos (HC)	8
2.2.1.5 Óxidos de Nitrógeno (NO _x).	8
2.2.1.6 Óxidos de Azufre (SO _x).	9
2.2.1.7 Material Particulado (MP).	9
2.2.2 Formación y causas de las sustancias tóxicas	9
2.2.2.1 Dióxido de Carbono	9
2.2.2.2 Monóxido de Carbono	10
2.2.2.3 Hidrocarburos no quemados	10
2.2.2.4 Óxidos de Nitrógeno. (NO _x)	12
2.2.2.5 Hollín.	13
2.2.2.6 Partículas Diesel.	15
2.3 ANALISIS DE GASES	16
2.3.1 Clasificación de métodos de medición	16
2.3.1.1 Según su forma de operación	16
2.3.1.2 Según el método utilizado	16

2.3.1.3 Según el volumen sobre el que se promedia	17
2.3.1.4 Según sean considerados métodos de referencia o equivalentes	17
2.3.2 Criterios de selección	18
2.3.2.1 Parámetros Técnicos.	18
2.3.2.2 Parámetros Operacionales	19
2.3.3 Técnicas para medir emisiones	19
2.3.3.1 Absorción Infrarroja no dispersiva (NDIR).	19
2.3.3.2 Cromatografía.	21
2.3.3.3 Polarografía	21
2.3.3.4 Paramagnética.	22
2.3.3.5 Detector de Ionización de llama.	23
2.3.3.6 Método de Microbalanza Oscilante.	24
2.3.3.8 Método gravimétrico manual	25
2.3.3.8 Método de Opacidad.	25
3. CONSTRUCCION DEL MODULO SENSOR-TRANSMISOR	28
3.1 DESCRIPCION GENERAL	28
3.2 HARDWARE	30
3.2.1 Análisis de gases	30
3.2.1.1 Sensores	31
3.2.1.2 Sistema de Filtración	34
3.2.1.3 Sistema de Transporte	36
3.2.1.4 Sistema de Calibración	38
3.2.1.5 Ensamble del Analizador	39
3.2.2 Opacidad	42
3.2.2.1 Opacómetro de tipo Muestreo	42
3.2.2.2 Principales partes del Opacómetro	44
3.2.2.3 Sonda de Muestreo	45
3.2.3 Flujo de Gas de Escape	46
3.2.3.1 Sensor de Presión Diferencial	46
3.2.3.2 Transductor de Presión	47
3.2.3.3 Sensor de Temperatura	48

3.2.3.4 Instalación del Medidor	48
3.2.4 Tratamiento y adquisición de señales	49
3.2.4.1 Acondicionamiento de Señal	49
3.2.4.2 Adquisición de Señales y Datos	51
3.3 SOFTWARE	52
3.3.1 Algoritmo	53
3.3.1.1 Revisar Comunicaciones	53
3.3.1.2 Recibir Datos del Sistema de Adquisición	53
3.3.1.3 Inicializar el Analizador y el Opacímetro	53
3.3.1.4 Procesar y Visualizar los Datos	55
3.3.1.4.1 Variables	55
3.3.1.4.2 Estados de Operación	59
3.3.1.4.3 Estados del modulo	60
3.3.2 Lenguaje de programación	61
3.3.3 Interfaz grafica	62
4. PROCEDIMIENTO DE OPERACIÓN DEL MODULO SENSOR- TRANSMISOR	66
4.1 CALIBRACIÓN DEL MODULO	66
4.1.1 Analizador	66
4.1.1.1 Calibración con mezcla de gas patrón.	66
4.1.1.2 Calibración con aire	67
4.1.2 Opacimetro	67
4.1.3 Medidor de flujo	67
4.2 ETAPA EXPERIMENTAL	68
4.2.1 Montaje del módulo	68
4.2.2 Preparación del módulo sensor-transmisor	71
4.2.3 Procedimiento de medición	71
5. RESULTADOS Y ANÁLISIS	73
5.1 CALIBRACION	73
5.1.1 ANALIZADOR	73
5.1.2 Opacímetro	77

5.1.3 Medidor de flujo	78
5.2 PARTE EXPERIMENTAL	79
5.2.1 Características del módulo	79
5.2.2 Tiempos de retardo del módulo	79
5.2.2.1 Analizador de Gases.	79
5.2.3 Emisiones producidas por el motor diesel	83
5.2.3.1 Prueba No. 1	83
5.2.3.2 Prueba No. 2	85
5.2.3.3 Prueba No. 3	86
6. CONCLUSIONES	97
7. RECOMENDACIONES	100
BIBLIOGRAFIA	101
ANEXOS	103

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Comparación de Emisiones Tóxicas	7
Figura 2. Proceso de Formación de Hidrocarburos no quemados	12
Figura 3. Proceso de Formación del Hollín	14
Figura 4. Composición de las Partículas Diesel	15
Figura 5. Absorción Infrarroja no Dispersiva	20
Figura 6. Sensor Analizador de Oxígeno Polarográfico	22
Figura 7. Cuerpo del Analizador Paramagnético	23
Figura 8. Detector de Ionización de Llama	24
Figura 9. Método de Opacidad	25
Figura 10. Diagrama General del Módulo Sensor-Transmisor	29
Figura 11. Configuración Hardware y Software del Sistema	30
Figura 12. Diagrama General de Análisis de Gases	31
Figura 13. Espectro de Absorción	32
Figura 14. Operación del Banco de Gases	32
Figura 15. Banco de Gases	33
Figura 16. Sensor Electroquímico de Oxígeno	34
Figura 17. Filtros de Material Particulado	35
Figura 18. Filtro de Sílica gel y Filtro Mahle	35
Figura 19. Punta de Sonda de Muestreo del Analizador	36
Figura 20. Bomba de Diafragma	37
Figura 21. Sensor de Presión	37
Figura 22. Filtro de Carbón Activado	38
Figura 23. Válvula Solenoide	38
Figura 24. Diagrama de Flujo del Analizador de Gases	39
Figura 25. Sistema de Filtración y Transporte de Muestra	40
Figura 26. Diagrama Eléctrico	41

Figura 27. Opacómetro de Tipo Muestreo	43
Figura 28. Funcionamiento del Opacómetro	44
Figura 29. Sonda de Muestreo del Opacómetro.	45
Figura 30. Tubo Pitot Tipo S	47
Figura 31. Transmisor de Presión Diferencial	47
Figura 32. Instalación del Medidor de Flujo	49
Figura 33. Tarjeta Acondicionadora de Señales	51
Figura 34. Tarjeta y Conector para Adquisición de Señales	51
Figura 35. Algoritmo	54
Figura 36. Panel Frontal y Ventana de Programación	62
Figura 37. Sección Emisiones del Panel Frontal	63
Figura 38. Gráficas de Variables Medidas	64
Figura 39. Valores Estadísticos de las Variables Medidas	65
Figura 40. Montaje del Módulo Sensor-Transmisor.	70

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Compuestos Orgánicos Volátiles	11
Tabla 2. Variables a Medir	55
Tabla 3. Especificaciones de Fuera de Rango	60
Tabla 4. Gases de Calibración según la Norma BAR 90	66
Tabla 5. Datos de Calibración con Mezcla de Gas Patrón de baja concentración	74
Tabla 6. Valores promedio, precisión, sesgo, probabilidad y error en la calibración con mezcla de baja concentración	74
Tabla 7. Datos de Calibración con Mezcla de Gas Patrón de Alta Concentración	74
Tabla 8. Valores promedio, precisión, sesgo, probabilidad y error en la calibración con mezcla de baja concentración.	75
Tabla 9. Calibración con Nitrógeno	76
Tabla 10. Datos de Calibración con Aire	76
Tabla 11. Datos de Calibración del Opacímetro	77
Tabla 12. Porcentaje de Error del Medidor de Flujo respecto al Termo-Anemómetro	78
Tabla 13. Estadísticas de las Emisiones en Ralentí. Prueba N°1	83
Tabla 14. Estadísticas de los Flujos en Ralentí. Prueba N°1	83
Tabla 15. Estadísticas de las Emisiones, Primera Aceleración. Prueba N°1	84
Tabla 16. Estadísticas de los Flujos, Primera Aceleración. Prueba N°1	84
Tabla 17. Estadísticas de las Emisiones, Segunda Aceleración. Prueba N°1	84
Tabla 18. Estadísticas de los flujos, Segunda Aceleración. Prueba N°1	84
Tabla 19. Estadísticas de las Emisiones, Tercera Aceleración. Prueba N°1	84
Tabla 20. Estadísticas de los Flujos, Tercera Aceleración. Prueba N°1	84
Tabla 21. Estadísticas de las Emisiones en Ralentí. Prueba N°2	85

Tabla 22. Estadísticas de los Flujos en Ralentí. Prueba N°2	85
Tabla 23. Estadísticas de las Emisiones, Primera Aceleración. Prueba N°2	85
Tabla 24. Estadísticas de los Flujos, Primera Aceleración. Prueba N°2	85
Tabla 25. Estadísticas de las Emisiones, Segunda Aceleración. Prueba N°2	85
Tabla 26. Estadísticas de los Flujos, Segunda Aceleración. Prueba N°2	86
Tabla 27. Estadísticas de las Emisiones, Tercera Aceleración. Prueba N°2	86
Tabla 28. Estadísticas de los flujos, Tercera Aceleración. Prueba N°2	86
Tabla 29. Estadísticas de las Emisiones en Ralentí. Prueba N°3	86
Tabla 30. Estadísticas de los Flujos en Ralentí. Prueba N°3	86
Tabla 31. Estadísticas de las Emisiones, Primera Aceleración. Prueba N°3	86
Tabla 32. Estadísticas de los Flujos, Primera Aceleración. Prueba N°3	87
Tabla 33. Estadísticas de las Emisiones, Segunda Aceleración. Prueba N°3	87
Tabla 34. Estadísticas de los Flujos, Segunda Aceleración. Prueba N°3	87
Tabla 35. Estadísticas de las Emisiones, Tercera Aceleración. Prueba N°3	87
Tabla 36. Estadísticas de los Flujos, Tercera Aceleración. Prueba N°3	87

LISTA DE GRAFICAS

	Pág.
Gráfica 1. Comportamiento del CO durante la calibración	75
Gráfica 2. Curva de Calibración del Opacímetro	77
Gráfica 3. Curva de Calibración del Medidor de Flujo	78
Gráfica 4. Tiempo de Retardo en la determinación de Propano	80
Gráfica 5. Tiempo de Retardo en la determinación de Monóxido de Carbono	80
Gráfica 6. Tiempo de Retardo en la determinación de Dióxido de Carbono	81
Gráfica 7. Tiempo de Retardo en la determinación de Oxígeno	81
Gráfica 8. Tiempo de Retardo en la determinación de la Opacidad	82
Gráfica 9. Tiempo de Retardo en la determinación del Flujo	82
Gráfica 10. Variación de las Emisiones respecto a la Variación de la Velocidad. Prueba N°1	88
Gráfica 11. Variación de las Emisiones respecto a la Variación de la Velocidad. Prueba N°2	90
Gráfica 12. Variación de las Emisiones respecto a la Variación de la Velocidad. Prueba N°3	92
Gráfica 13. Factores de Emisión. Prueba N°1	94
Gráfica 14. Factores de Emisión. Prueba N°2	95
Gráfica 15. Factores de Emisión. Prueba N°3	96

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Especificaciones	104
Anexo B. Cálculos	108
Anexo C. Software	115

TITULO: CONSTRUCCION DE UN MODULO SENSOR-TRANSMISOR PARA LAS EMISIONES DE CO, CO₂, C₃H₈, O₂ Y OPACIDAD EN MOTORES DIESEL SIN CARGA.*

**Autores: MARY LUZ MALDONADO HERRERA **
INGAR EUYENI VEGA GODOY ****

Palabras Claves: Motor Diesel, Emisiones , Flujo de gas de Escape.

RESUMEN

El presente proyecto contiene el desarrollo de un sistema para medir las emisiones de monóxido de carbono, dióxido de carbono, hidrocarburos en base propano, oxígeno, material particulado en porcentaje de opacidad y el flujo de gas de escape de los motores diesel sin carga en condiciones de ralentí y aceleración. La unidad utiliza sensores infrarrojos, electroquímicos y un método indirecto para determinar el flujo.

Para el desarrollo se construyó un modulo sensor-transmisor que incluye: toma, acondicionamiento y transporte de la muestra hacia los sensores, adquisición y tratamiento de las señales generadas, así como una interfaz hombre máquina.

En general, el módulo utiliza un método de medición continuo o automático, químico-físico y puntual. Consta de un tubo pitot con un transductor diferencial de presión para medir el flujo total de los gases, un opacímetro de flujo parcial, para determinar el porcentaje de opacidad, un banco analizador de gases para detectar las concentraciones del gas, y una interfaz gráfica en LabVIEW, que permite visualizar las variables obtenidas y su comportamiento respecto a las condiciones de operación del motor (revoluciones por minuto y temperatura del aceite del cárter).

El objetivo de la investigación es tener un módulo sencillo y fácil de operar que permita monitorear los gases de escape de cualquier motor bajo diferentes condiciones y compararlos con otras variables del motor para hacer un diagnóstico preliminar del estado del motor.

* Proyecto de Grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director, Dr. Edgar Fernando Castillo Monroy. (UIS)

TITLE: CONSTRUCTION OF A SENSOR-TRANSMITTER MODULE FOR THE CO, CO₂, C₃H₈ AND O₂ EMISSIONS AND OPACITY MEASUREMENT FOR DIESEL ENGINES WITHOUT LOAD.*

Authors: MARY LUZ MALDONADO HERRERA**

INGAR EUYENI VEGA GODOY **

Keywords: Diesel Engine, Emissions, Exhaust gas flow.

ABSTRACT

This project is about the development of a system for the measurement of diesel emissions, such as carbon monoxide, carbon dioxide, hydrocarbons in propane base, oxygen, particulate material in opacity percentage and exhaust gas flow of these kind of engines out on load and under both idle and maximum speed conditions. The unit employs nondispersive infrared and electrochemical sensors, and an indirect method for exhaust gas flow measurement.

For the development, was built a sensor-transmitter module which includes: taking, conditioning and transporting of sample towards sensors, acquisition, treatment signals, and a human-machine interface.

In general, the module utilizes an automatic chemical-physical measurement method. It consists of a Pitot tube with a differential pressure transducer for total flow gas measurement, a partial flow opacimeter for opacity percentage calculation, a gas analyzer bench for detecting gas concentrations, and a graphical interface built in LabVIEW, which allow variable visualization and its behavior under engine operation conditions, such as revolutions per minute and crankcase oil temperature.

The research goal is to have a simple and easy-to-use module which allows monitoring the exhaust gases of any engine under different conditions and comparing them with other engine variables in order to do a preliminary diagnostic of the engine state.

* Proyecto de Grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director, Dr. Edgar Fernando Castillo Monroy. (UIS)

INTRODUCCION

Es reconocida la influencia que la contaminación atmosférica tiene sobre la calidad del aire, especialmente en las grandes ciudades. Esta contaminación es generada por fuentes fijas representadas por el sector industrial y fuentes móviles, principalmente los automotores de tipo público y privado, que emiten niveles de CO, CO₂, hidrocarburos entre otros, de los cuales los vehículos a Diesel, producen gran cantidad de material particulado cuyo nivel se ve incrementado, debido a que la mayoría de los vehículos Diesel en Colombia están dotados de tecnología obsoleta y a la carencia de una cultura de mantenimiento preventivo.

Este problema generado por los vehículos Diesel, justifica el desarrollo de acciones que permitan la valoración del estado real de operaciones de los motores de estos vehículos, mediante técnicas no invasivas (sin necesidad de desmontarles ningún elemento) de uso sencillo, que ayuden en la disminución de los niveles de emisión de los contaminantes de estos motores.

Por ello, COLCIENCIAS, las Escuelas de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Telecomunicaciones y el Centro de Estudios e Investigaciones Ambientales se unieron con el fin de desarrollar el proyecto interdisciplinario correspondiente al “Diseño y desarrollo de un prototipo para el monitoreo y diagnóstico del estado de motores Diesel a partir de técnicas no invasivas. Fase I”, el cual pretende implementar una metodología de diagnóstico que permita determinar de manera rápida y eficaz el funcionamiento del motor y así mejorar el nivel de inspección de los vehículos diesel, los cuales cuando el motor se encuentra fuera de su condición normal, pueden consumir más combustible, más aceite, causar daños a otras partes del vehículo y generar más contaminación.

Por tanto, se hace indispensable el análisis de los gases emitidos por estos motores que junto con otras técnicas como: la determinación de potencia del motor, vibraciones en el bloque, presión en las líneas de inyección, medición de corriente, velocidad angular, permitirán el diagnóstico preliminar del motor en esta fase.

Este proyecto busca construir el módulo sensor-transmisor que haga el análisis de los gases, opacidad y flujo de los motores Diesel y sea una herramienta para el desarrollo de los planes operativos de mantenimiento preventivo y correctivo aplicables por el prototipo de diagnóstico general para el sector de transporte público en Bucaramanga.

El capítulo dos presenta los aspectos más significativos, de las causas y características de las emisiones de un motor Diesel; los métodos de medición de gases, el principio en el cual se basan, su clasificación según la forma de operación, según el volumen sobre el que se promedia la medición y según sean considerados como métodos de referencia o equivalencia. También se mencionan las técnicas más importantes para analizar los gases a medir.

El capítulo tres es una descripción detallada del módulo sensor-transmisor, sus partes y su funcionamiento. Se explica todo lo relacionado con el hardware necesario para medir los niveles de monóxido de carbono, dióxido de carbono, propano, oxígeno, opacidad y flujo; para acondicionar y adquirir las señales; y el procedimiento de ensamble de todos los medidores. También se describe el algoritmo y el lenguaje de programación utilizado para el manejo y procesamiento de los datos recibidos y para la operación del módulo.

El capítulo cuatro presenta la forma de operar del módulo; el proceso de calibración del analizador, opacímetro y medidor de flujo; su montaje en el motor y el procedimiento de medición de los niveles de las emisiones. El capítulo cinco corresponde a los resultados obtenidos durante el proceso de operación del módulo, su análisis estadístico y gráfico. El capítulo seis presenta las conclusiones y el siete las recomendaciones.

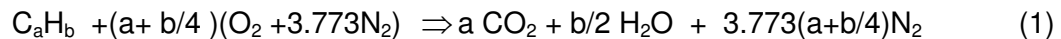
2. MARCO TEORICO

2.1 COMBUSTION EN EL MOTOR DIESEL

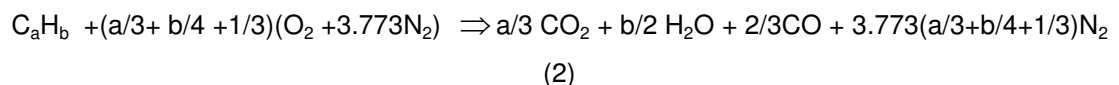
La combustión de la mezcla aire combustible dentro del cilindro del motor es uno de los procesos que controlan la potencia, la eficiencia y las emisiones. Por combustión, se entiende toda reacción química, exotérmica, que se realiza con una determinada velocidad. Es el resultado de la combinación rápida de oxígeno y combustible. En el motor, el aire provee el oxígeno necesario para la combustión apropiada.

Cualquier proceso de combustión en el motor involucra oxidación. Normalmente, los motores usan combustibles que están compuestos por mezclas que involucran un gran número de hidrocarburos diferentes.

Un hidrocarburo puede ser “completamente” oxidado si se dispone de suficiente oxígeno. El carbono del combustible, en teoría se convierte en dióxido de carbono y el hidrógeno en agua. Este tipo de combustión, se llama combustión completa y perfecta:



Si el aire de carga es insuficiente o se mezcla insuficientemente con el combustible, reaccionará parte del carbono para formar monóxido de carbono (CO). Esta combustión es combustión incompleta:



De la primera ecuación se puede, aplicando la estequiometría más simple, obtener valiosa información:

- Un kmol de C_aH_b requiere para su combinación completa **(a + b/4)** kmol de Oxígeno y producen **a** kmol de CO_2 y **b/2** kmol de vapor de H_2O .
- Como la masa molar del CH vale **(12a + b)** kg, la de oxígeno 32 kg, la de CO_2 44 kg y la del agua 18 kg, puede hacerse la siguiente lectura : la combustión de 1 kg de C_aH_b requiere el consumo de:

$$\frac{8(4a + b)}{12a + b} \text{ kg de } O_2 \text{ y produce}$$

$$\frac{44a}{12a + b} \text{ kg de } CO_2 \text{ y } \frac{9a}{12a + b} \text{ kg de } H_2O$$

2.1.1 Relación Aire/Combustible. Es la relación entre el aire y el combustible suministrados para que ocurra la combustión.

$$\frac{A}{F} = \frac{Aire_{SUMINISTRADO}}{Combustible_{SUMINISTRADO}} \quad (3)$$

Cuando el contenido del aire es apenas lo suficiente para convertir todo el combustible en productos completamente oxidados, se habla de **relación estequiométrica** (teórica o químicamente correcta) definida por la reacción de combustión dada por la ecuación N° 1. Las relaciones estequiométricas aire/combustible (A/F) o combustible /aire (F/A) dependen de la composición del combustible.

Las mezclas de aire-combustible con mayor o menor contenido de aire que el estequiométrico, también se pueden quemar. Con exceso de aire, **combustión pobre** de combustible, el aire extra aparece en los productos sin modificación alguna.

Con menos del aire estequiométrico requerido, es decir con **combustión rica** en combustible, hay insuficiente oxígeno para oxidar totalmente el combustible; carbono e hidrógeno, a CO₂ y H₂O con monóxido de carbono e hidrógeno (también N₂).

2.1.2 Función Lambda (λ). Índice de relación de aire. Expresa en qué punto, se encuentra la mezcla en proporción al aire disponible para la combustión, con respecto al aire teórico necesario para la combustión completa.

$$\lambda = \text{masa aire proporcionada} / \text{masa aire necesaria}$$

De la ecuación (3) se tiene:

$$\lambda = \frac{\left(\frac{A}{F}\right)_{\text{proporcionada}}}{\left(\frac{A}{F}\right)_{\text{estequiométrica}}} \quad (4)$$

$\lambda = 1$ Si la cantidad de aire proporcionada es igual a la cantidad de aire necesaria.

2.1.2.1 Variaciones de Mezcla. Las variaciones de mezcla se establecen con respecto a la relación estequiométrica, de la siguiente forma:

- **Mezcla Rica $\lambda < 1$.** Cuando la proporción de combustible es mayor que la ideal, o bien cuando la cantidad de aire es menor que la requerida para una combustión completa. Por ejemplo:

$\lambda = 0.9 = (13.23:1)$ Expresa un 10% de exceso de combustible.

- **Mezcla Pobre $\lambda > 1$.** Cuando la cantidad de combustible es menor que la ideal, o bien cuando la cantidad de aire es mayor que la que existe en la requerida para una combustión completa. Por ejemplo:

$\lambda = 1.1 = (16.17: 1)$ Expresa un 10% de exceso de aire.

La función lambda es usada para determinar el tipo de mezcla y el avance de la reacción.

En motores a Gasolina λ 0.8 - 1.15 y

En motores a Diesel λ 1.2 – 1.7.

En la práctica, dentro de los motores Diesel se debe agregar aire por encima de la proporción estequiométrica, para que se queme la mayor parte del combustible. Este exceso puede ser de 25 a 90%, a plena carga, según el tipo del motor y los medios que se emplean para efectuar una mezcla rápida y perfecta del combustible. Si el combustible de inyección y la cámara de combustión están proyectados de modo que el combustible y el aire se mezclen rápido y completamente, el exceso de aire puede ser pequeño.

2.2 EMISIONES DE ESCAPE DEL MOTOR DIESEL

Una variedad de diferentes compuestos se forman cuando el combustible es quemado. Estos productos de la reacción son dependientes del diseño del motor, de la potencia y de la carga de trabajo.

La combustión completa del combustible reduce la formación de sustancias tóxicas. Es apoyada por el cuidado con que se haga la mezcla aire-combustible, la precisión que se tenga en el proceso de inyección y la turbulencia de la mezcla. En primer lugar se generan agua (H_2O) y dióxido de carbono (CO_2). Y también en concentraciones relativamente bajas, se producen las siguientes sustancias:

Monóxido de Carbono (CO)

Hidrocarburos no quemados (HC)

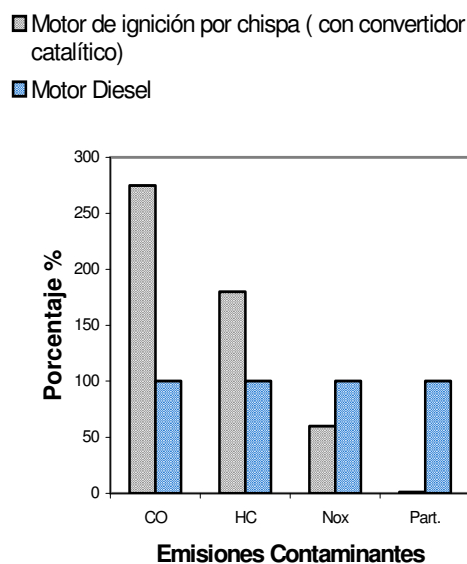
Oxidos de nitrógeno (NO_x)

Dióxido de azufre (SO_2) y Acido sulfúrico (H_2SO_4)

Partículas de Hollín.

El bajo consumo de combustible, junto con el bajo nivel de emisiones de agentes contaminantes en el gas de escape, resalta la importancia del motor Diesel¹. La Figura 1, compara las emisiones de un motor de encendido por chispa con convertidor catalítico con un motor diesel.

Figura 1. Comparación de emisiones Tóxicas



2.2.1 Características de las sustancias tóxicas del gas de escape.

2.2.1.1 Dióxido de Carbono (CO₂). Gas inerte, responsable del efecto invernadero ya que al no reaccionar con otros compuestos, permanece en la atmósfera y evita que el calor generado en la tierra salga al espacio, incrementando la temperatura del planeta. Producto principal de la combustión, ya que en su formación se genera la mayor cantidad de calor en el proceso e índice de la eficiencia de la combustión. No tiene un efecto directo sobre el hombre en las concentraciones presentes en la operación del motor. Altas concentraciones pueden provocar sofocamiento.

¹ SCHÄFER, Fred y BASSHUYSEN, Richard Van. Reducer Emissions and Fuel Consumption in Automobile Engines.

2.2.1.2 Vapor de Agua (H₂O). Formado por la unión del hidrógeno contenido en los hidrocarburos y el oxígeno presente en el aire. Gas oxidante y corrosivo, que al unirse con los óxidos forma ácidos, responsables del daño en los exhostos y de la lluvia ácida. El vapor de H₂O, es el elemento que se encuentra en mayor cantidad en los gases de escape.

2.2.1.3 Monóxido de Carbono (CO). Es el producto de un mal proceso de combustión. Es un gas tóxico, inoloro e inoloro. Su adherencia a la hemoglobina (el portador de O₂ de la sangre), es más fuerte que la del oxígeno. Incluso bajas concentraciones pueden ser suficientes para causar asfixia.

En la alta atmósfera, el monóxido de carbono reacciona con el ozono produciendo dióxido de carbono y afectando la capa de ozono. En la formación de este gas se pierde eficiencia en el funcionamiento del motor, se pierde un 72% de energía calórica con respecto a la formación de CO₂.

2.2.1.4 Hidrocarburos (HC). Su presencia en los gases que salen por el exhosto, es un indicativo de combustión incompleta. Dependiendo de su composición tienen un mayor o menor efecto narcótico e irritan las membranas mucosas. Ciertos componentes tienen un efecto cancerígeno (aromáticos, por ejemplo: 3-4 benzapireno y benceno). Se encuentran clasificados en 3 categorías:

THC: Hidrocarburos totales

NMHC: Hidrocarburos sin componentes con bases en metano, o VOC compuestos volátiles, o ROG gases reactivos, o ROC gases reactivos no volátiles.

NEHC: Hidrocarburos sin componentes con base en etanos.

2.2.1.5 Óxidos de Nitrógeno (NO_x). Se forman gracias a las altas temperaturas que se alcanzan en las cámaras de combustión y a las altas relaciones de compresión. Elemento nocivo para la salud, bajas concentraciones son suficientes para causar

irritaciones en los pulmones y dañar las membranas mucosas. En presencia de hidrocarburos no quemados y luz solar, incrementa la formación del smog.

2.2.1.6 Oxidos de Azufre (SO_x). Su presencia depende de la calidad del combustible. Cuando la temperatura es suficientemente alta, forma óxidos, utilizando el oxígeno necesario en la formación de CO₂, incrementando la formación de CO. En combinación con el agua, forma ácido sulfúrico H₂SO₄, precursor de la lluvia ácida.

2.2.1.7 Material Particulado (MP). Compuestos sólidos o líquidos de carbono, hollín, sulfatos, hidrocarburos, agua y otros. Se forman debido a que no todo el combustible es quemado durante la combustión. El principal daño de salud es su deposición en el sistema respiratorio. Actúan como catalizador en la formación de H₂SO₄ y HNO₃.

Las partículas emitidas por los motores a Diesel dado su diminuto tamaño y su composición, representan un factor de toxicidad por estar constituidas de hidrocarburos policíclicos aromáticos de los cuales los pirenos, fenantrenos y antracenos son cancerígenos.

Usualmente, es mencionado como MP10 o MP2.5.

MP10 Partículas respirables menores de 10µm.

MP2.5 Partículas respirables menores de 2.5 µm.

2.2.2 Formación y causas de las sustancias tóxicas.

2.2.2.1 Dióxido de Carbono. La producción de CO₂ es inevitable, dado que es inherente al proceso mismo de oxidación del combustible. Es un eficiente indicador de la operación del sistema de combustible y de la eficiencia de quemado de la mezcla. Su máxima concentración se encuentra en $\lambda = 1$. Un bajo valor de CO₂, es un indicativo de problemas eléctricos o de un funcionamiento del motor con mezcla pobre o rica, daños en el sistema de inyección, baja compresión en el motor o fugas en el exhosto.

2.2.2.2 Monóxido de Carbono. El CO, es una especie importante en los productos de la combustión rica y una especie de menor importancia en productos de combustión pobre. Está influenciado principalmente por la relación aire/combustible. Una carencia de aire ($\lambda < 1$), resulta en altas concentraciones de CO. La relación promedio aire / combustible, que está presente en la cámara de combustión para cada ciclo, es mucho más alta en el motor Diesel que en un motor de encendido por chispa. No obstante debido a la escasa homogeneidad de la mezcla acumulada por estratificación, se presentan zonas locales extremadamente “ricas”. Esto produce altas concentraciones de CO que son reducidas en una mayor o menor extensión mediante post-oxidación.

En muchos casos, donde se queman hidrocarburos, las reacciones de oxidación progresan rápidamente hasta el punto, donde se forma el CO y luego progresa lentamente hasta su total combustión. El CO se produce por la combustión incompleta de los combustibles especialmente los sólidos o líquidos.

La parafina o los alcanos, son hidrocarburos con la fórmula general C_nH_{2n+2} . Para $n > 2$ el proceso de oxidación se puede caracterizar por tres procesos secuenciales:

- La molécula de combustible, es atacada por átomos de oxígeno e hidrógeno, rompiéndose y formando principalmente olefinas (hidrocarburo con el enlace doble del carbón) e hidrógeno. El hidrógeno, se oxida a agua dependiendo del oxígeno disponible.
- Las olefinas insaturadas se oxidan después a CO y H_2 . Esencialmente, todo el H_2 es convertido en agua
- El CO se quema siguiendo la reacción $CO + OH \Rightarrow CO_2 + H$. Casi todo el calor desprendido asociado al proceso total de la combustión ocurre en este paso.

2.2.2.3 Hidrocarburos no quemados. Más de 400 especies diferentes de hidrocarburos han sido identificadas en el escape del vehículo. El término “hidrocarburo no quemado”, implica generalmente que todo el combustible no reaccionó completamente, comprendiendo los alcanos, alquenos, compuestos carbonil y peróxidos. Muchos de

estos compuestos experimentan reacciones rápidas en la atmósfera y están involucrados en la formación del smog fotoquímico.

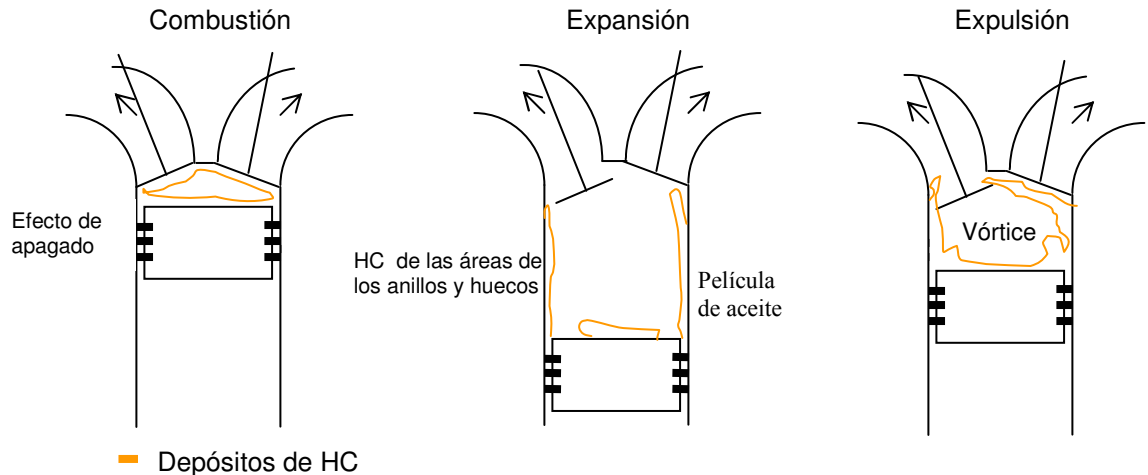
La mayoría de hidrocarburos no quemados son compuestos orgánicos volátiles (VOC). Un VOC, está definido como un hidrocarburo con un punto normal de ebullición por debajo de 100°C. Debido a su baja reactividad, el metano no es considerado un VOC. Los VOC pueden participar en reacciones de smog fotoquímico, produciendo hidrocarburos dañosos y ozono asociados con el smog urbano. Los compuestos pueden no ser dañosos por sí solos, pero ellos reaccionan con los óxidos de nitrógeno, oxígeno y la luz solar para formar aldehídos y otros hidrocarburos oxigenados que contribuyen al smog urbano. En la tabla 1 se muestran algunos ejemplos de VOC.

Tabla 1. Compuestos Orgánicos Volátiles

VOC Típicos					
Isobutano	n-butano	Tolueno	propano	etano	n-pentano
Etileno	m-xileno	2-metilpentano	isobutano	acetileno	Benzeno

El motor de combustión interna, es responsable de la mayor parte de las emisiones de hidrocarburos de los sistemas de combustión. Las fuentes importantes de hidrocarburos no quemados en motores son aquellas áreas, donde la llama no se propaga, como es el caso de las zonas frías, las ranuras entre el pistón y la pared del cilindro. Las emisiones de HC, también son formadas si el intercambio de calor del gas en la pared del cilindro es lo suficientemente grande para extinguir la llama (efecto de apagado). Otras fuentes de HC no quemados, son la presencia del aceite lubricante en las paredes del cilindro y cambios en la relación aire/combustible. El proceso de formación de HC, es mostrado esquemáticamente en la Figura 2.

Figura 2. Proceso de Formación de Hidrocarburos no quemados



Solamente, alrededor de una tercera parte de los hidrocarburos no quemados encontrados en el gas de escape, son moléculas de combustible. El resto, son producto de la oxidación parcial y pirólisis del combustible. La oxidación parcial de hidrocarburos resulta en la producción de CO, aldehídos y otros compuestos particularmente indeseables. En operaciones con mezclas pobres, la oxidación parcial en las ranuras del aceite de lubricación y del depósito de hidrocarburos en las paredes, es la mayor fuente de CO.

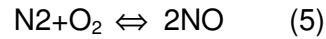
2.2.2.4 Óxidos de Nitrógeno. (NO_x). Como el proceso de combustión Diesel involucra grandes cantidades de aire, se producen varios óxidos de nitrógeno, aunque sólo dos de ellos en cantidades significativas: NO y NO₂.

En el motor, debido a las altas temperaturas de combustión y altas relaciones de compresión prevalece, casi exclusivamente, la formación de NO, ya que el oxígeno a altas temperaturas presenta mayor afinidad por el nitrógeno N₂.

No obstante, a la salida de gases a la atmósfera, el NO es oxidado a NO₂, a través de una complicada reacción fotoquímica con el oxígeno atmosférico. Para la formación de NO en

los procesos de combustión del motor, las reacciones de Zeldovic o formación de NOx térmico son de importancia.

La reacción de formación de NOx térmico se puede resumir en:



Debido al carácter endotérmico de esta oxidación con energía de activación elevada se requiere una temperatura alta, por lo que a medida que aumenta la temperatura de la zona de combustión aumenta la conversión del nitrógeno en NO.

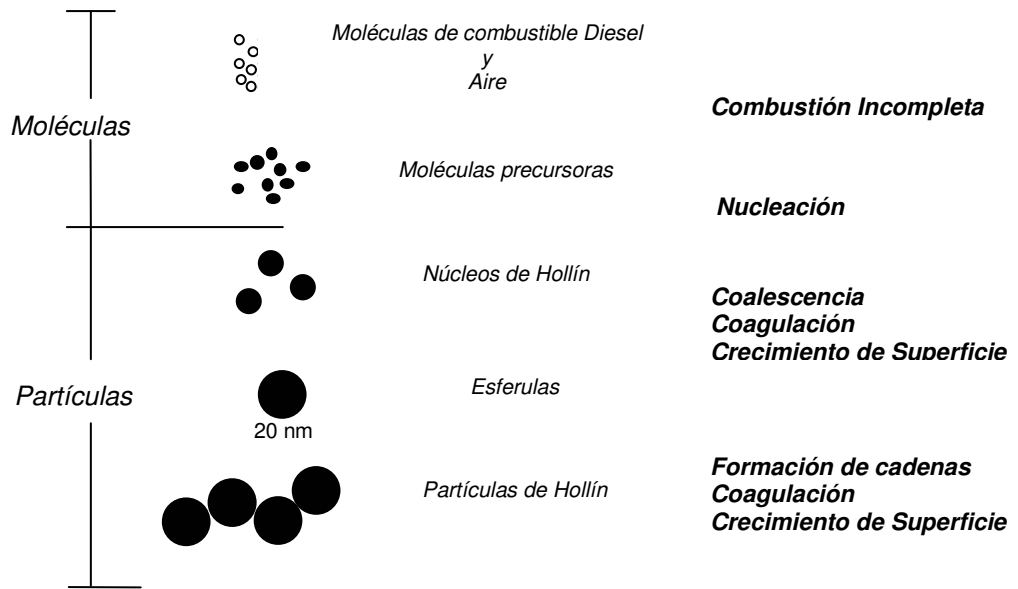
2.2.2.5 Hollín. El hollín, es básicamente carbón. Los dos mecanismos básicos para la formación del hollín son pirólisis y pirosíntesis. El mecanismo exacto que ocurre desde las pequeñas moléculas de hidrocarburos a las partículas de hollín más grandes es incierto. Entre los mecanismos probables de la formación del hollín, se encuentran dos posibilidades:

- Pirólisis del combustible a carbón atómico o hidrocarburos más pequeños, seguido por condensación a partículas de hollín y
- Pirosíntesis para unas moléculas muy grandes de hidrocarburos que posteriormente se deshidrogenan para formar hollín.

El proceso de la formación del hollín (figura 3) se puede considerar en cuatro pasos:

1. Formación de especies precursoras.
2. Incepción de la partícula
3. Crecimiento de la superficie y aglomeración de partículas.
4. Oxidación de la partícula.

Figura 3. Proceso de Formación del Hollín



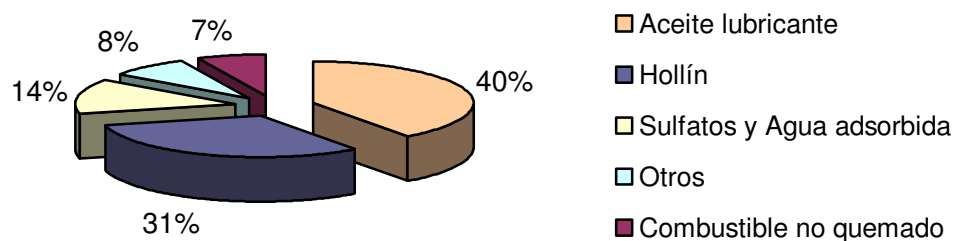
En el primer paso, la formación de especies precursoras del hollín, los hidrocarburos policíclicos aromáticos (PAH) son intermediarios importantes entre la molécula original de combustible y la partícula de hollín primaria. El paso de inceptión de partícula involucra, la formación de partículas pequeñas de tamaño crítico (3000-10000 unidades de masa atómica) para crecer por medios químicos y coagulación. Es en este paso, donde las moléculas grandes son transformadas a, o identificadas como, partículas.

Cuando las pequeñas partículas primarias de hollín continúan siendo expuestas al baño de especies del combustible pirolizado, experimentan crecimiento superficial y aglomeración.

2.2.2.6 Partículas Diesel. Se forman debido a que no todo el combustible es quemado durante la combustión. La materia de las partículas se puede analizar en tres componentes, a saber: hollín, fracción soluble orgánica (SOF), y óxidos. El hollín es el material carbonoso, que resulta principalmente de la combustión incompleta del combustible y, en un menor grado, del aceite lubricante. Es esencialmente carbón y produce el humo negro en el gas de escape. La fracción soluble orgánica SOF es básicamente hidrocarburos no quemados del combustible y del aceite lubricante, siendo el aceite lubricante la parte dominante. La parte del óxido es principalmente el sulfato, asociado con el agua, producto del azufre en el combustible. Por lo tanto, hay una relación directa entre la emisión de partículas y el nivel de azufre en el combustible.

El tamaño de tales partículas, es aproximadamente 0,01 a 1 μm y superior. La mayoría de las partículas tienen un tamaño inferior a 0,3 μm y algunas de ellas pueden, por tanto, penetrar en los pulmones. La composición de las partículas, es ampliamente dependiente del punto de operación y el proceso de combustión. La figura 4, muestra una composición típica de las partículas Diesel.

Figura 4. Composición de las Partículas Diesel.



La cantidad de humo generada depende de muchos factores por ejemplo: carga del motor, velocidad del motor, condición del motor, eficiencia de la mezcla combustible/aire, masa de aire disponible y calidad del combustible. El humo excesivo, es significado de un

rendimiento pobre y está relacionado con la condición del motor. El humo negro tradicional observado en las emisiones Diesel, es debido al hollín de las partículas.

2.3 ANALISIS DE GASES

El fin primordial del análisis de gases, es el de determinar el valor y comportamiento de los diferentes gases de escape y relacionarlos con mediciones en un proceso de combustión eficiente. Con un análisis de gases, es posible determinar las fallas en los requisitos requeridos en un buen proceso de combustión, además, determinar si las emisiones de gases que genera el motor están dentro de los rangos correctos.

El analizador de gases no interpreta las emisiones, sólo las mide. La interpretación corre a cargo del operario. De los valores que el analizador suministra, se puede comenzar a diagnosticar cuáles sistemas se encuentran funcionando fuera de especificaciones o con ajustes imprecisos, verificando los niveles que están muy altos o muy bajos.

2.3.1 Clasificación de los métodos de medición. Los métodos de medición de concentración de gases se pueden clasificar de diferentes maneras:

2.3.1.1 Según su forma de operación:

Métodos discontinuos. Son, en términos generales, métodos manuales para los cuales la toma de muestra en el lugar y el análisis en el laboratorio, son dos pasos separados. Pueden existir mediciones discontinuas que pueden realizarse con equipos automáticos tanto en la toma de muestra como en el análisis de laboratorio.

Métodos continuos o automáticos. Típicamente involucran equipamientos automáticos en un lugar fijo que realiza ambos procesos, toma de muestra y análisis.

2.3.1.2 Según el método utilizado:

Químicos-físicos. El contaminante sufre una transformación química y el producto de la reacción se determina por una técnica analítica apropiada.

Físicos. Se mide una propiedad física, o su variación, para cada contaminante en forma selectiva, sin que se produzcan cambios en la composición de la muestra de aire.

2.3.1.3 Según el volumen sobre el que se promedia la medición:

Métodos puntuales. La muestra de gas se toma en forma continua en un punto determinado y se hace pasar ésta por el detector. La mayoría de los equipos actualmente disponibles se basan en este concepto. Los sensores necesitan una cantidad finita de aire contaminado antes que puedan responder y un intervalo de tiempo finito antes que pueda ser observado un valor de la concentración. Se necesita un equipo para cada contaminante.

Métodos zonales. Miden la concentración promedio de los contaminantes directamente en una sección de la atmósfera, a través de la pérdida de intensidad de un haz de luz por absorción molecular de los contaminantes. Se pueden medir simultáneamente todos los gases que tengan valores suficientemente diferentes de longitud de onda de absorción. Mide a lo largo de una zona relativamente grande, mínimo de 100 m por problema de sensibilidad, y el método es aplicable hasta espesores de atmósfera, o lo que es equivalente distancia entre emisor y receptor, de 1.500 metros. No sirve para material particulado.

2.3.1.4 Según sean considerados métodos de referencia o equivalentes:

Métodos de referencia. Son dados para las mediciones de cada uno de los gases contaminantes más importantes y se los considera de referencia para determinar el cumplimiento de las normas. Generalmente son métodos manuales, pocos automatizados y que requieren la colección de muestra por un tiempo discreto relativamente largo.

Métodos equivalentes. Se han desarrollado equipos de medición continua o automáticos que permiten obtener datos en forma prácticamente continua (intervalo de medición de un minuto) y conectados “en línea” con el centro de información, lo cual es sumamente útil para detectar accidentes y actuar en forma inmediata. Deben pasar una prueba que determine que son adecuados frente a los métodos de referencia, la cual es realizada por instituciones autorizadas. Han sido desarrollados solo para los contaminantes más importantes.

2.3.2 Criterios de selección de equipos de medición. Se deben tener en cuenta parámetros técnicos como: selectividad, especificidad, sensibilidad, exactitud, facilidad de calibración del instrumento, disponibilidad de gases de calibración, volumen de gas necesario para la determinación, tiempo de respuesta del instrumento y parámetros operacionales como: disponibilidad de los sensores, mantenimiento, porcentaje de intervalo de tiempo fuera de operación, equipamiento adicional necesario, mano de obra especializada requerida para operación y mantenimiento.

En términos generales, hay ciertos parámetros técnicos y operacionales que deben ser considerados al evaluar la aptitud y utilidad de una técnica analítica o un equipo de medición:

2.3.2.1 Parámetros Técnicos.

- **Selectividad:** indica el grado de independencia de interferencias del método.
- **Especificidad:** indica el grado de interferencias en la determinación.
- **Límite de detección**
- **Sensibilidad:** tasa o amplitud del cambio de la lectura del instrumento con respecto a los cambios de los valores característicos de la calidad del aire.
- **Exactitud:** grado de acuerdo o semejanza entre el valor real o verdadero y el valor medio o medido. Depende tanto de la especificidad del método, como de la exactitud de la calibración; esta última depende de la disponibilidad de estándares

primarios y de la forma como es calibrado el equipo. Denota en que manera, están ausentes errores por predisposición o sesgo, o por azar.

- **Precisión o reproducibilidad de las medidas:** grado de acuerdo o semejanza entre los resultados de una serie de mediciones, aplicando un método bajo condiciones pre-descritas y el valor medio de las observaciones.
- **Facilidad de calibración del instrumento:** está asociada a la disponibilidad de gases de calibración en el mercado (estándares primarios) y a su aplicación en el sistema de muestreo, así como a la necesidad de la frecuencia de su empleo.
- **Disponibilidad de gases de calibración:** gases primarios o secundarios.
- **Volumen de gas necesario para la determinación:** depende del comportamiento de las concentraciones de sustancias a medir.
- **Tiempo de respuesta del instrumento:** corresponde al tiempo necesario para que el monitor responda a una señal dada, o sea el período transcurrido desde la entrada del contaminante al instrumento de medición hasta la emisión del valor de la medición. Se suelen distinguir dos partes: a) tiempo de retraso, aquel en que se alcanza el 10 % del cambio final en el instrumento de lectura, b) tiempo de crecimiento o caída, durante el cual se pasa del 10 % al 90 % del cambio final en el instrumento de lectura.

2.3.2.2 Parámetros Operacionales.

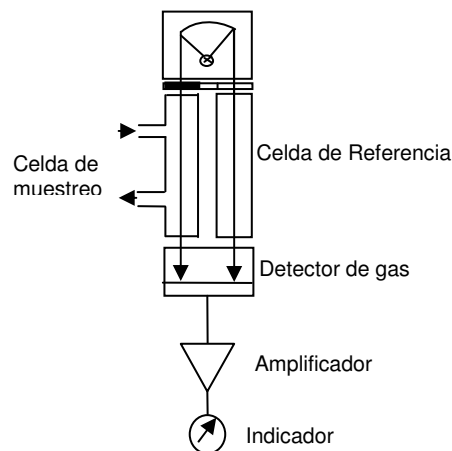
- Disponibilidad de los sensores.
- Mantenimiento.
- Porcentaje de intervalo de tiempo fuera de operación.
- Equipamiento adicional necesario.
- Mano de obra especializada requerida para operación y mantenimiento.

2.3.3 **Técnicas para medir emisiones de gas de escape.**

2.3.3.1 Absorción Infrarroja no dispersiva (NDIR). Este método es usado principalmente, para determinar las concentraciones de CO, CO₂ e hidrocarburos como propano y

hexano, en el gas de escape. Hace uso del principio que las moléculas de gas absorben bandas discretas de energía infrarroja. La radiación infrarroja, se hace pasar a través de una celda conteniendo el gas de muestra que se desea analizar, y la absorción cuantitativa de energía por el gas, es medida por un detector apropiado en el fotómetro no dispersivo. Se utiliza un doble haz de radiación infrarroja que pasa a través de dos celdas, una es la de medición llena con el gas de muestra y la otra, de referencia, llena con un gas no absorbente. En la primera, hay absorción del componente a medir y en la segunda, no hay absorción. Una rueda interruptora (“chopper”), permite que el haz llegue alternativamente al detector. El detector, consiste en dos compartimientos separados por un diafragma a los que llega la radiación no absorbida en las celdas, llenos con el mismo tipo de gas que se analiza. Este absorbe la energía radiante del haz (mayor, en la parte que recibe el haz que pasó por la celda de referencia), aumentando su temperatura y ejerciendo una presión sobre el diafragma. La modulación producida por la rueda interruptora (“chopper”), produce variación periódica de presión en la cámara. Estas señales son detectadas y convertidas a señal eléctrica. Figura 5.

Figura 5. Absorción Infrarroja no dispersiva.



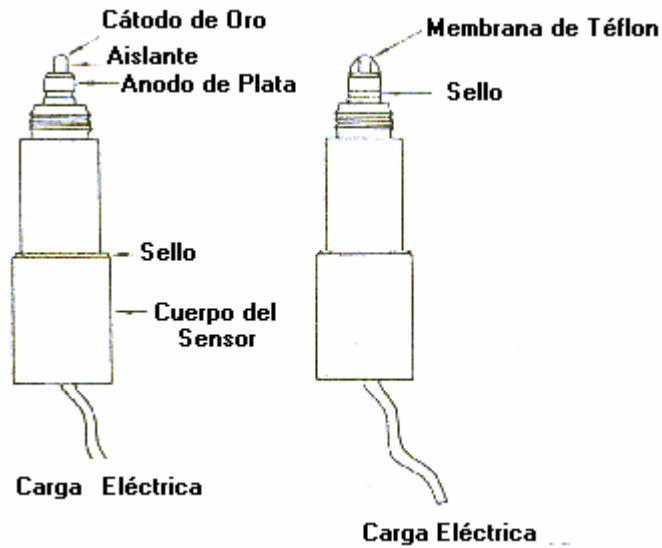
2.3.3.2 Cromatografía. El hecho que distingue la cromatografía gaseosa o líquida de otros métodos físicos o químicos de separación, es que dos fases mutuamente inmiscibles, son puestas en contacto; una fase es estacionaria y la otra móvil. Las dos

fases se eligen de forma tal que los componentes de la muestra que se quiere analizar se distribuyen de modo distinto entre la fase móvil y la estacionaria. Una muestra introducida en la fase móvil es llevada a través de una columna (múltiple) conteniendo una fase estacionaria distribuida. Especies en la muestra, son sometidas a repetidas interacciones (particiones) entre la fase móvil y la estacionaria. Al final del proceso, emergen componentes separados en función de la diferencia de interacción con la fase estacionaria. El componente menos retardado emerge primero. El componente más fuertemente retenido emerge último.

La columna de separación, es el corazón de la cromatografía. Provee versatilidad en los tipos de análisis que pueden realizarse. Esta versatilidad, debido a la amplia elección de materiales para las fases estacionaria y móvil, hace posible separar las moléculas que difieren levemente en sus propiedades físicas y químicas. La fase móvil puede ser un gas o un líquido, mientras que la fase estacionaria puede ser solamente líquida o sólida. Cuando la fase móvil es un gas, se denomina **cromatografía gaseosa** y cuando la fase móvil es un líquido, **cromatografía líquida**.

2.3.3.3 Polarografía. También llamada electroquímica. Es usada para analizar el contenido de O_2 en el gas. El método se basa en el principio que los gases pueden ser reducidos a diferentes potenciales de voltaje. De los gases normalmente encontrados en el gas de escape, el O_2 es reducido en el potencial más bajo y puede por lo tanto ser medido rápidamente. El analizador consta de dos unidades básicas, un sensor y un amplificador. El sensor (Figura 6) consta de un cátodo de oro aislado y un ánodo de plata, entre los cuales se aplica un voltaje de 0.8 voltios. El ánodo, es eléctricamente conectado al cátodo por un gel de cloruro de potasio. El montaje completo es separado de la muestra por una membrana de teflón permeable al gas.

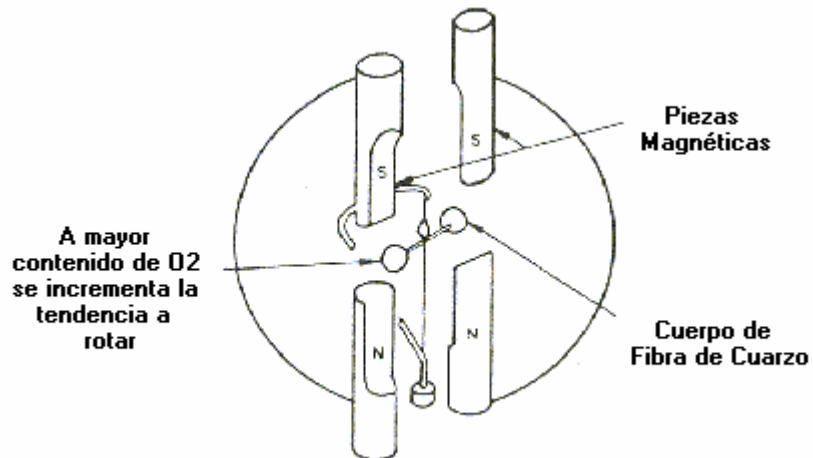
Figura 6. Sensor Analizador de Oxígeno Polarográfico.



En operación, el sensor es colocado en la corriente de muestra y el oxígeno se difunde a través de la membrana de teflón y es reducido por los 0.8 voltios, en el cátodo. Esta reducción causa un flujo de corriente el cual es proporcional a la presión parcial del oxígeno en la muestra.

2.3.3.4 Paramagnética. Principalmente usada para el análisis de O_2 en gases. Los analizadores paramagnéticos de oxígeno miden la presión parcial del oxígeno de una muestra de gas midiendo su susceptibilidad magnética. Este tipo de medida es posible, debido a que el oxígeno es fuertemente paramagnético, mientras que los otros gases con excepción del NO y NO_2 son débilmente diamagnéticos. La susceptibilidad magnética del oxígeno puede ser considerada como una medida de la habilidad de una molécula de oxígeno para volverse un imán temporalmente, cuando es colocado en un campo magnético.

Figura 7. Cuerpo del analizador paramagnético

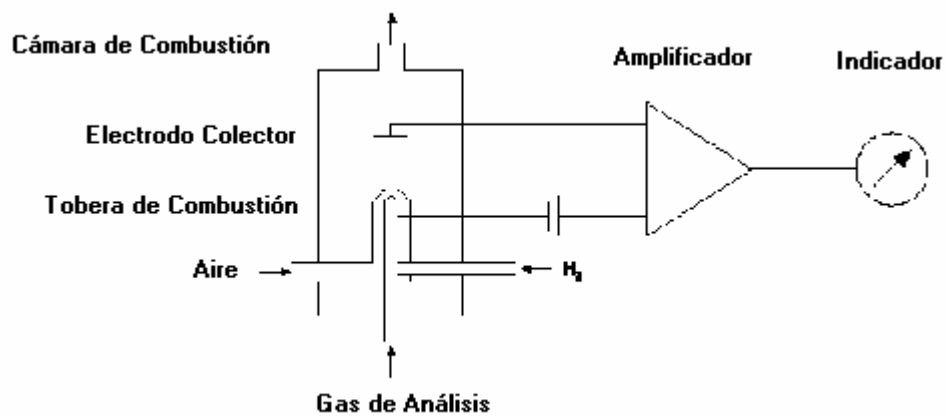


La medida es hecha en una celda de análisis donde un cuerpo de fibra de cuarzo es suspendido en un campo magnético no uniforme. Cuando la presión parcial del oxígeno en la muestra de gas que rodea al cuerpo de prueba cambie, el cuerpo rotará. Un sistema óptico el cual sensa esta rotación causa un voltaje que es aplicado al cuerpo para mantenerlo en la posición inicial (Figura 7). Este voltaje, es el de salida del circuito amplificador, y es el requerido para mantener el cuerpo estable contra las fuerzas ejercidas por el campo magnético.

2.3.3.5 Detector de Ionización de Llama. El detector de ionización de llama, es usado para medir el contenido de hidrocarburos totales de mezcla compleja de hidrocarburos. La técnica de medición por ionización de llama se basa en la medición de los iones de una muestra de gas determinado que son formados durante la combustión de hidrógeno. En una cámara de ionización, la nube de iones formados es extraída aplicando un campo eléctrico, vía electrodos, produciendo una corriente eléctrica. Esta corriente es aproximadamente proporcional al caudal de masa del gas, proporcional a su concentración. Es necesario realizar una calibración con muestra patrón.

El detector de ionización de llama, consiste de una cámara de combustión (ver Figura 8). A través de una boquilla o tobera se introduce hidrógeno puro (combustible), y por un tubo que rodea la tobera aire atmosférico (oxidante) para la combustión. La llama de hidrógeno (2.660 °C) produce una pequeña densidad de iones (valor cero) en la ausencia de la muestra de gas. Los electrodos necesarios para la extracción de la nube de iones son dispuestos cerca de la llama. La misma tobera puede ser usada como uno de los electrodos. Se emplea un amplificador sensible a corriente continua para lograr una señal de amplitud adecuada. Por una entrada adicional se introduce en la tobera el gas de muestra. Para mediciones continuas se debe mantener constante la temperatura y el caudal de la muestra de gas.

Figura 8. Detector de ionización de llama



2.3.3.6 Método de Microbalanza Oscilante. Para la medición de material particulado en suspensión por el método de microbalanza oscilante, se hace pasar una muestra de aire a través de un filtro, el cual es parte de un sistema vibrante u oscilante con su resonancia característica. El material particulado colectado sobre el filtro aumenta la masa vibrante y por lo tanto, decrece la frecuencia de resonancia. Un sistema electrónico monitorea continuamente la frecuencia de resonancia. La concentración de material particulado en

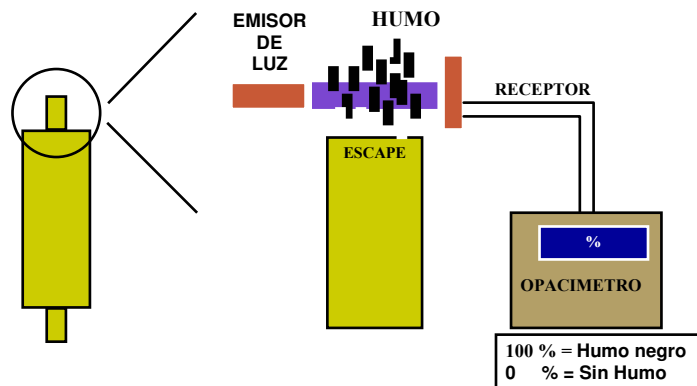
suspensión, se calcula por una calibración entre la frecuencia de resonancia y la cantidad de material depositado, teniendo en cuenta el volumen medido de gas de muestra.

2.3.3.7 Método Gravimétrico Manual. Es un método de referencia para determinación de material particulado, que incluye todo material que condense arriba de la temperatura de filtrado, que puede ser empleado para calibrar métodos continuos. La cantidad de material particulado, es función de la temperatura y la presión, por lo que éstas deben ser medidas.

La muestra de gas debe ser extraída isocinéticamente del conducto por donde sale el gas, haciéndola incidir sobre un filtro de fibra de vidrio manteniendo la temperatura del conducto de extracción y del filtro en el intervalo de 120 ± 4 °C, una temperatura que sea especificada para una aplicación particular; el contenido en el filtro es luego secado. Se determina el peso de material particulado por diferencia con el peso del filtro previamente pesado y se calcula la concentración midiendo el volumen del gas de muestra extraído. Para asegurar que las muestras son características, se deben sacar las mismas, de un número de posiciones preseleccionadas en la sección transversal del conducto.

2.3.3.8 Método de Opacidad. Se aplica a la determinación de concentración de material particulado. Es un método relativo, no da valores absolutos.

Figura 9. Método de Opacidad



Se mide la atenuación (o la transmisión) de un haz de luz al pasar a través de un flujo de gas conteniendo material particulado en suspensión. El método se basa en el principio que parte de la luz, es absorbida por las partículas o deflectadas por refracción en éstas. Mientras mayor es la cantidad de material particulado en el flujo de gas, mayor es la pérdida de radiación y menor la transmisión. La transmisión (T) se expresa como la relación entre la intensidad de la luz emitida (I_0) y la intensidad de la luz recibida (I): $T = I/I_0$. El haz de luz generado por una lámpara incandescente, es emitido en línea recta a través del lente objetivo y posteriormente de la chimenea (y por lo tanto del gas) hacia el reflector. El haz de luz retorna usando el mismo camino hacia el receptor. Tanto el haz de referencia como el transmitido, generan en el receptor un voltaje que es proporcional a la cantidad de luz recibida. Su relación es proporcional a la transmisión.

A fin de facilitar las comparaciones de los datos de opacidad de humo de diferentes fuentes, se deben reportar valores de opacidad en longitudes de trayectoria óptica efectiva estándar.

Para propósitos de medición del humo Diesel, se puede utilizar una ecuación que expresa la relación entre la opacidad de una corriente de humo, la longitud de trayectoria óptica efectiva estándar a través de la corriente, y la opacidad del humo por unidad de longitud de trayectoria. Esta relación es conocida como la Ley de Beer-Lambert:

$$T = \text{Luz transmitida} / \text{Luz incidente} = e^{-KL} \quad (6)$$

Donde (K) es el "Coeficiente de extinción de luz" o "Coeficiente de absorción de luz". Dicho coeficiente, es una función del número de partículas de humo por unidad de volumen de gas, la distribución por tamaño de las partículas de humo, y las propiedades de absorción y dispersión de las partículas; y L es la longitud del haz de luz entre el emisor y el detector que es interceptado por la corriente de escape, expresada en metros, m.

La relación entre los parámetros de transmitancia y opacidad, puede definirse como se muestra en la Ecuación (7).

$$N (\%) = 100 * (1 - T) \quad (7)$$

A partir de las Ecuaciones (6) y (7) se pueden derivar las siguientes relaciones importantes:

$$N_s = 100 * (1 - ((1 - (N_m/100))^{(L_s/L_m)})) \quad (8)$$

$$K = - (1/L) \ln (1 - N/100) \quad (9)$$

Donde: N_s es la opacidad estándar

N_m es el valor de la opacidad medida

L_s es la longitud de trayectoria óptica estándar (m)

L_m es la longitud de trayectoria óptica efectiva (m)

2.3.3.8.1 Tipos de Opacímetros.

Flujo Total. Mide la opacidad de la totalidad de la corriente de humo. Pueden ser del tipo tubo de escape (en línea) o del tipo al final del tubo de escape (fuera de línea), instalación directa en el escape, medida dependiente del tamaño del tubo, comparación de medidas posibles si el diámetro es el mismo. Presenta inconvenientes con forma de escapes no circulares.

Flujo Parcial. Instalación directa en el escape, medida independiente del tamaño del tubo y de su forma pero relacionada con el equipo, comparación de medidas del mismo equipo posible, apto para campo y laboratorio.

Flujo libre. La instalación no es directa en el escape, la corriente de humo pasa libremente a través de dos lentes, por ello, la medida es independiente de la forma y tamaño del tubo de escape, pero está sujeta a errores.

3. CONSTRUCCION DEL MODULO SENSOR-TRANSMISOR

Se construyó el módulo sensor-transmisor para que haga el análisis de los gases, opacidad y flujo de los motores Diesel y sea una herramienta para el desarrollo de los planes operativos de mantenimiento preventivo y correctivo aplicables por el prototipo de diagnóstico general para el sector de transporte público en Bucaramanga.

3.1 DESCRIPCION GENERAL

El módulo sensor-transmisor realiza la medición de ciertas variables (propiedades químicas y físicas de los gases) como: absorción de energía de ciertas moléculas, potencial de reducción, temperatura y caída de presión; por medio de sensores que se conectan físicamente a transmisores, los cuales captan la salida del sensor y la convierten en señales lo suficientemente intensas como para transmitir las al registrador. Estas señales pueden ser eléctricas, electrónicas y/o digitales (unos y ceros) y deben ser tratadas de tal manera que se puedan determinar las concentraciones de CO, CO₂, O₂, en porcentaje a volumen; C₃H₈, en partes por millón; material particulado en % de Opacidad y caudal de los gases de escape de un motor diesel.

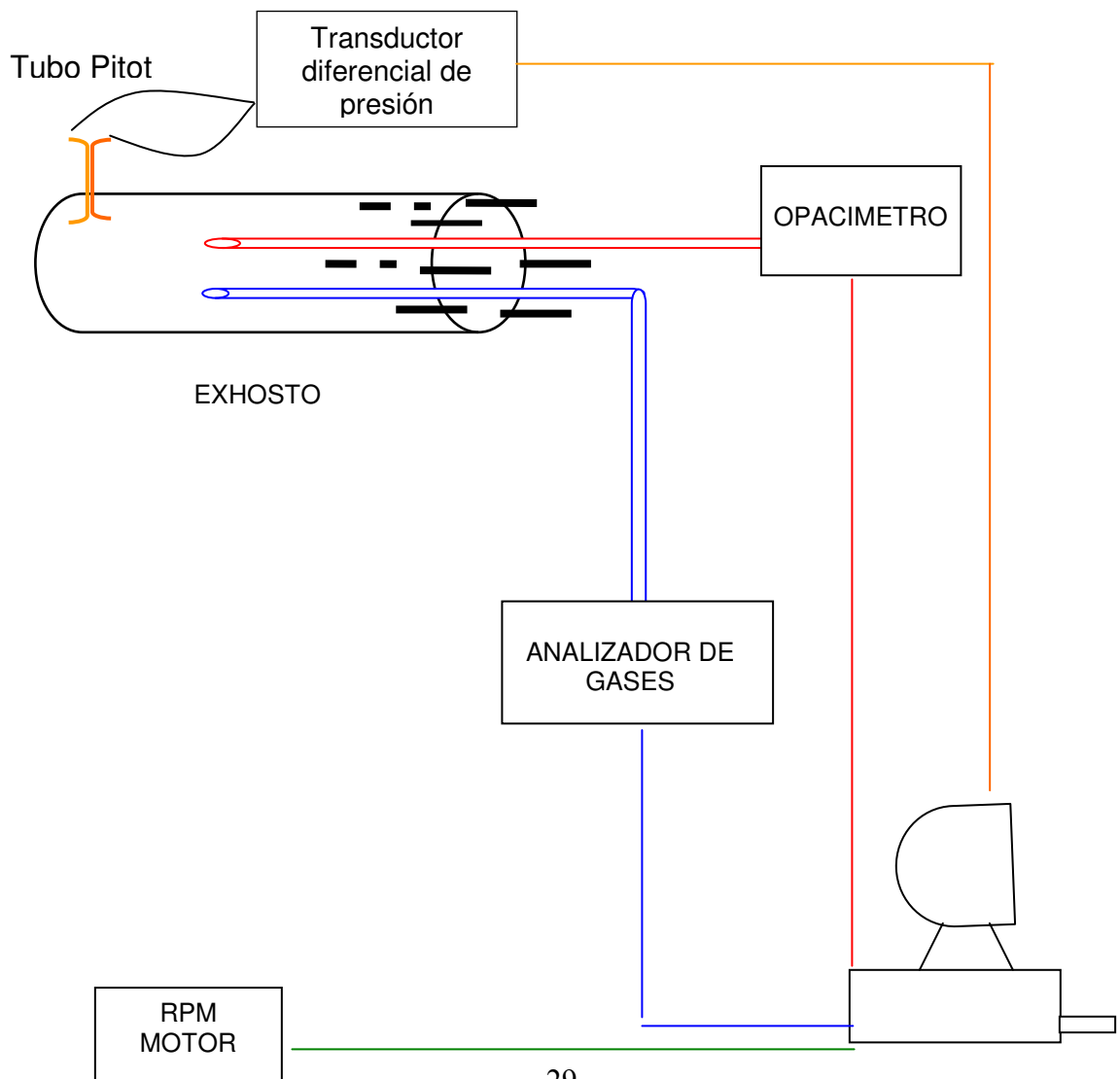
En general el módulo utiliza un método de medición continuo o automático, químico-físico y puntual. Consta de un tubo pitot con un transductor diferencial de presión para medir el flujo total de los gases, un opacímetro de flujo parcial, para determinar el porcentaje de opacidad, un banco analizador de gases para detectar las concentraciones del gas, y una interfaz gráfica que permitirá visualizar las variables obtenidas y su comportamiento respecto a las condiciones de operación del motor (RPM).

La función del módulo será determinar las concentraciones de los gases mencionados, el % de opacidad y caudal del gas de escape cuando el motor se encuentra sin carga en

ralentí, que es la velocidad del motor establecida por el fabricante o ensamblador del vehículo requerida para mantenerlo funcionando en neutro (para cajas manuales) y en parqueo (para cajas automáticas); y cuando es acelerado a su máxima velocidad.

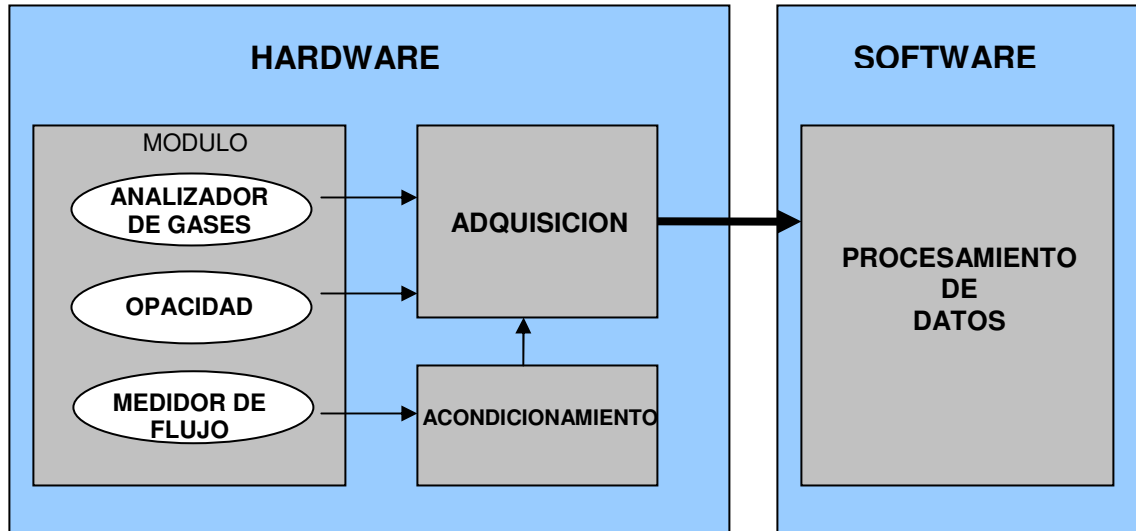
Debido a diferencias en las características de los sensores de opacidad y análisis de gases y a diferencias en las condiciones necesarias de la muestra que analizan, estos sensores se ubican en líneas diferentes. Ver figura 10.

Figura 10. Diagrama General del Módulo Sensor-Transmisor



El módulo está compuesto por componentes de hardware y software; el hardware es el encargado de medir, acondicionar y adquirir las señales para que sean procesadas por el software. Ver figura 11.

Figura 11. Configuración hardware y software del Sistema

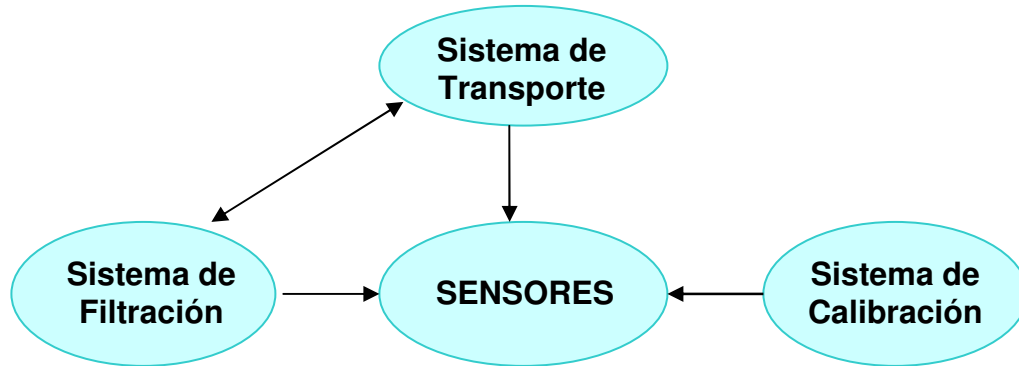


3.2 HARDWARE

Es el equipo físico que conforma el módulo sensor-transmisor, como los aparatos y componentes mecánicos, eléctricos o electrónicos; distintos a los programas (software) que se ejecutan o son sistema. El hardware del módulo está dividido principalmente en: análisis de gases, opacidad, flujo del gas de escape, tratamiento y adquisición de señales.

3.2.1 Análisis de Gases. El analizador de gases es el conjunto completo de todos los elementos y accesorios necesarios para detectar las concentraciones de CO, CO₂, C₃H₈ y O₂ en el gas de escape y todos los elementos necesarios para su calibración. Consta principalmente de: sensores, sistema de transporte para llevar el gas desde el exhosto hasta los sensores, sistema de filtración para retirar el material particulado y el agua presente en la muestra, y sistema para la calibración del equipo. Figura 12.

Figura12. Diagrama General de análisis de Gases



3.2.1.1 Sensores

Sensor de CO, CO₂ y C₃H₈.

Se utilizó una cámara infrarroja de gases (banco de gases) de tres canales marca SENSORS, para determinar las concentraciones de monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂) e hidrocarburos (en base propano C₃H₈).

El banco, está basado en una tecnología infrarroja no dispersiva, NDIR. Los equipos de NDIR están generalmente dedicados a la medida de concentraciones de un conjunto específico y limitado de gases en mezcla. Un conjunto específico de gases (ejemplo, CO, C₃H₈, CO₂ para el banco) se mide así: se selecciona una longitud de onda dentro del espectro infrarrojo para cada gas a medir, donde su absorción es conocida y donde ningún otro gas absorbe significativamente (Figura 13.) Los lentes ópticos, transmiten energías electromagnéticas dentro de la longitud de onda seleccionada. Cuando la celda de muestra se llena con gas, el detector IR mide la reducción resultante de la energía IR transmitida dentro de la longitud de onda de cada gas. Ver figura 14.

Figura 13. Espectro de absorción

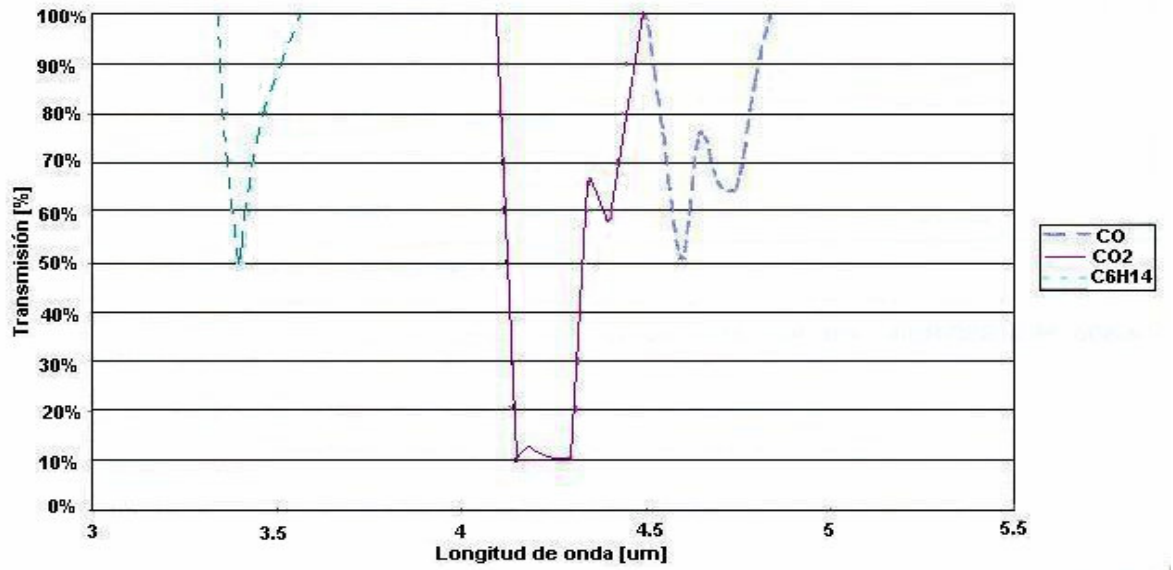
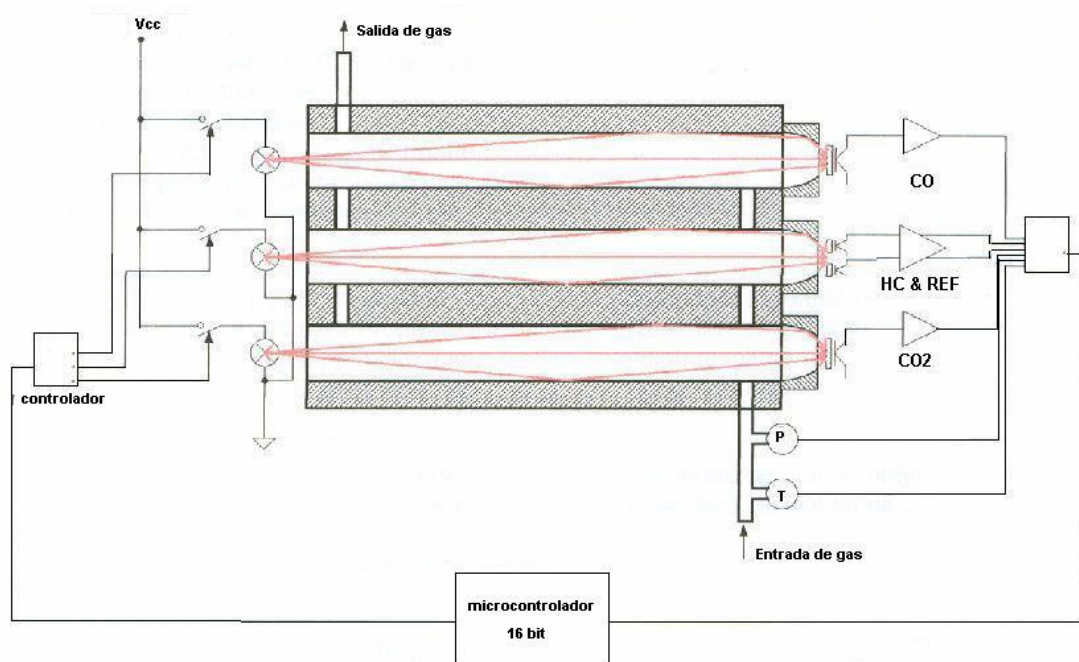


Figura 14. Operación del Banco de gases



El banco también permite las rutinas de cero y calibración que son controladas por el procesador.

El banco Sensors está diseñado para reducir los costos globales del sistema de un analizador de gas. El bajo consumo de energía de 10 watts con un suministro de energía de 5V permite la selección de un abastecimiento de energía menos costoso. Debido al pequeño tamaño del banco, la cantidad de flujo puede ser reducida a 0.3 l/min y por tanto requiere de una bomba pequeña que junto con la simplificación del suministro de energía, hace que el analizador sea una unidad manipulable. Ver figura 15 y especificaciones en el anexo A.

Figura 15. Banco de Gases



Sensor de Oxígeno.

Se utilizó un sensor electroquímico para detectar la concentración de oxígeno en el gas. El principio operacional del sensor utilizado sirve para la medida de la presión parcial del oxígeno en el gas de escape del automóvil y funciona según el principio de una célula galvánica de gas, la cual genera una corriente, que se evalúa como una señal que mide la conversión reductora del oxígeno y es proporcional a la presión parcial de este gas.

La función del sensor del oxígeno puede ser descrita como sigue: El gas que se mide se difunde a través de una membrana sintética y se separa en los electrolitos del sensor. En ellos hay dos electrodos hechos de diversos metales, que son conectados a un circuito exterior. La parte del oxígeno disuelto se reduce en el colector (cátodo). En respuesta el segundo electrodo (ánodo) se oxida. La corriente interna de iones resultante, sale al exterior en forma de corriente eléctrica, la cual es proporcional a la conversión de oxígeno.

Figura 16. Sensor electroquímico de Oxígeno



El sensor de oxígeno marca Oxiplus A, es compatible con el banco analizador SENSORS, de bajo costo y fácil disponibilidad en el mercado. Ver sus especificaciones en el anexo A.

3.2.1.2 Sistema de Filtración. Debido a las condiciones de operación de un motor Diesel éste genera un gas de escape con alto contenido de material particulado y agua, los cuales pueden dañar los sensores y afectar las medidas de las concentraciones. Por esto es necesario acondicionar la muestra de tal forma que se le retire la mayor cantidad de agua y material particulado, por medio de un sistema de filtración que retenga humedad y partículas mayores a 5 μm (mínimo requerido por el banco SENSORS).

Filtros de Material Particulado

El sistema de retención de material particulado consta de un filtro de malla de nylon 0.5 mm que retiene las partículas más grandes, seguido de una trampa de filtros de mallas metálicas de 150 μm y 90 μm , filtros de papel de 60 μm , 30 μm , 20 μm y 10 μm . Además, un vaso trifier que contiene dos cilindros de mallas metálicas y un filtro

cilíndrico de papel de 30 μ m, seguido de filtros primario y secundario de 14 y 7 μ m respectivamente. Estos últimos contenidos en una carcasa de plástico para mostrar el cambio de color, el cual indica el tiempo de reemplazo del mismo.

Figura 17. Filtros de Material particulado: Filtro Primario-Secundario, Trampa de Filtros y Vaso Trifilter



Filtro de Silica Gel

Una vez se ha retenido la mayor cantidad de material particulado, la muestra es pasada a través de un filtro secador para eliminar la humedad presente y luego por un filtro de papel de 5 μ m, llamado filtro de línea marca Knecht Mahle, para completar el filtrado. Ver figura 18.

Figura18. Filtro de Sílica Gel y Filtro Mahle



El filtro de Sílica gel consta de una carcasa metálica que contiene en su interior gel de sílice alúmina activada que recoge y retiene el agua hasta su saturación. La porosidad de la sílica-gel es lo suficientemente alta, lo que le da la propiedad de absorber hasta el 40% de su peso. Se utiliza ampliamente como desecante para retirar la humedad en los equipos sensibles (dispositivos electrónicos, instrumentos, etc.).

Presenta algunas ventajas en relación con otros desecantes químicos: es inodora, insípida, no tóxica tiene buena resistencia mecánica, es químicamente estable y puede ser regenerada a través del calentamiento (por encima de 150°C). El filtro utilizado tiene 49.62 gr de silica gel y sus dimensiones son: Diámetro 3.5 cm y largo 13 cm.

3.2.1.3 Sistema de Transporte.

Línea de Toma de Muestra

Consta de una punta de sonda de acero inoxidable unida a una manguera de silicona de 8 mm de diámetro y 5 m de largo.

Figura 19. Punta de sonda de muestreo del analizador

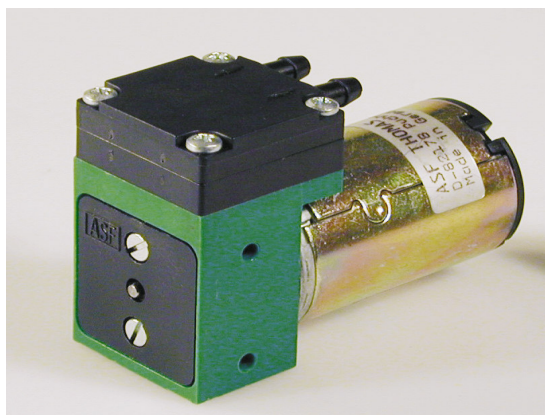


Además se utilizó manguera de teflón de 6,8 y 10 mm de diámetro para conducir la muestra entre los filtros, la bomba y los sensores.

Bomba de Muestreo

Se utilizó una bomba de diafragma miniatura para la succión de la muestra que posee bajo nivel de ruido, tamaño pequeño y peso ligero. Ver figura 20 y anexo A para las especificaciones

Figura 20. Bomba de diafragma



Para detectar la condición de bajo flujo en la bomba, es necesario un sensor de presión, que mida la presión de succión de la bomba. El sensor MPL 502 es un modelo de ajuste simple, disponible como sensor de presión, de vacío o diferencial. Ver figura 21 y anexo A para especificaciones.

Figura 21. Sensor de presión



3.2.1.4 Sistema de Calibración. El módulo debe tener un sistema que permita la calibración de los diferentes gases para evaluar su precisión y exactitud. Esta calibración se realiza en dos líneas diferentes a la de toma de muestra, una para calibración con aire y otra para la calibración con gas patrón.

En cada una de las líneas se utiliza una válvula anti-retorno plástica para evitar que el gas se devuelva; de 1.5 psi para calibración de gas y 0.5 psi para calibración con aire; además en la línea de calibración con aire se dispone de un filtro de carbón activado para la retención de vapores orgánicos (Figura 22). Esta línea permite tanto la calibración del oxígeno como el cero de los demás gases.

Figura 22. Filtro de Carbón Activado



Para controlar ya sea el procedimiento de toma de muestra o de calibración, con aire o con botellas de gas patrón, se utiliza una válvula solenoide miniatura de 2 vías. Esta válvula solenoide convierte una señal eléctrica en una salida neumática.

Figura 23. Válvula Solenoide



3.2.1.5 Ensamble del Analizador. Además de las partes descritas anteriormente para el ensamble se utilizaron accesorios como:

- Fuente de poder de 12 voltios para alimentar los sensores, la bomba, la válvula solenoide y el sensor de presión.
- Extractor de calor para enfriar el banco y evitar el sobrecalentamiento de la fuente.
- Cable de poder, fusible, switch , para alimentar y encender la fuente.
- Racores pasamuros para conexión de sonda, botellas de calibración y entrada de aire.

Especificaciones de algunos de ellos en el anexo A.

Todas las partes se ensamblaron como se muestra en las figuras 24, 25 y 26.

Figura 24. Diagrama de Flujo del analizador de Gases

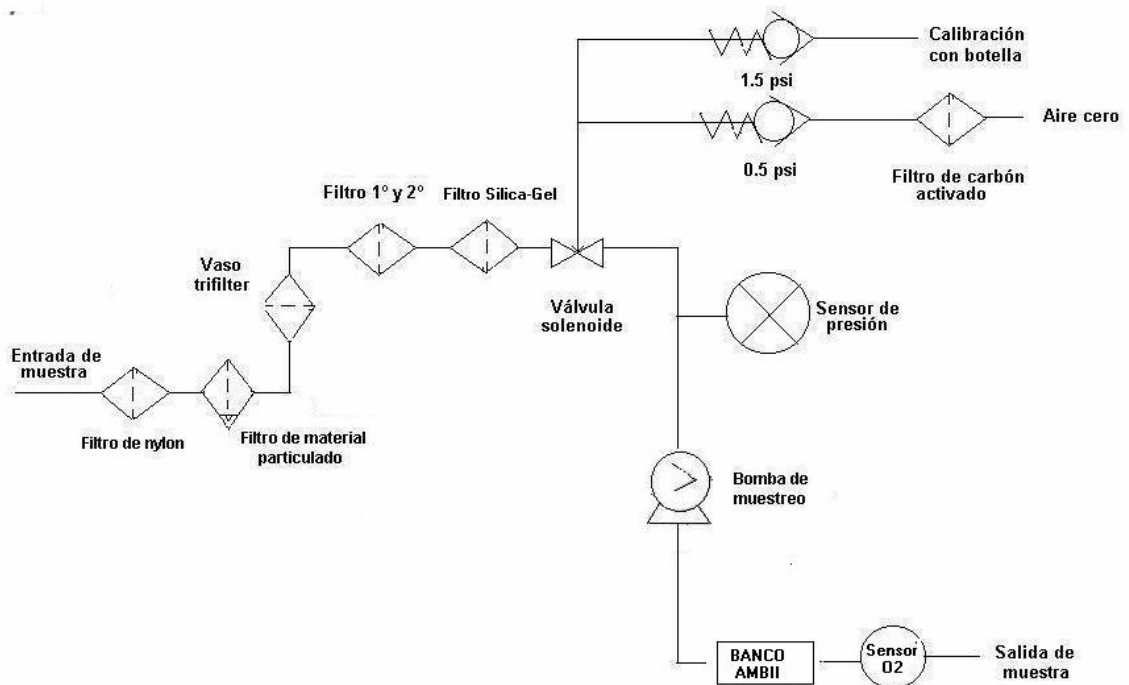


Figura 25. Sistema de Filtración y Transporte de muestra

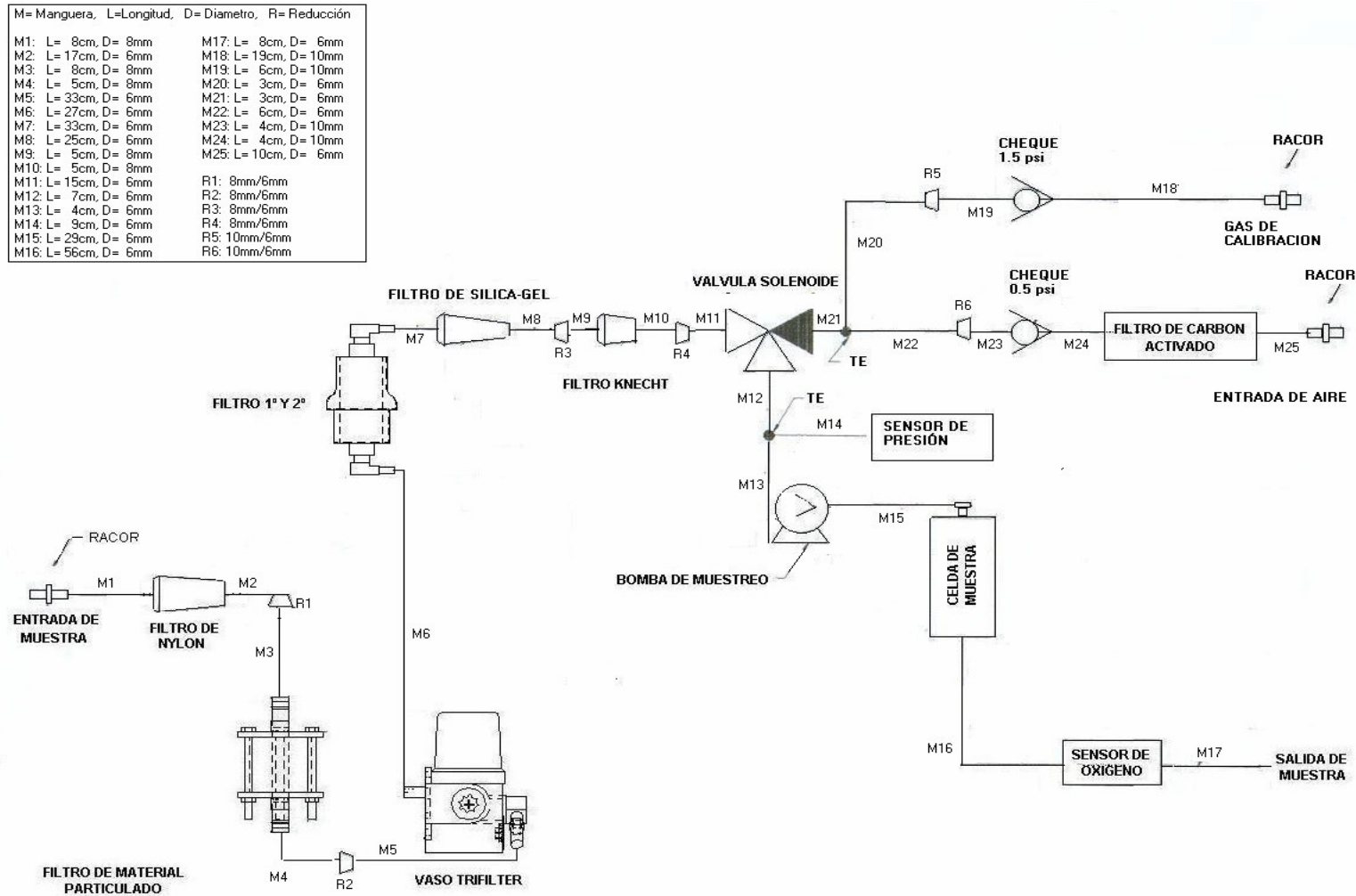
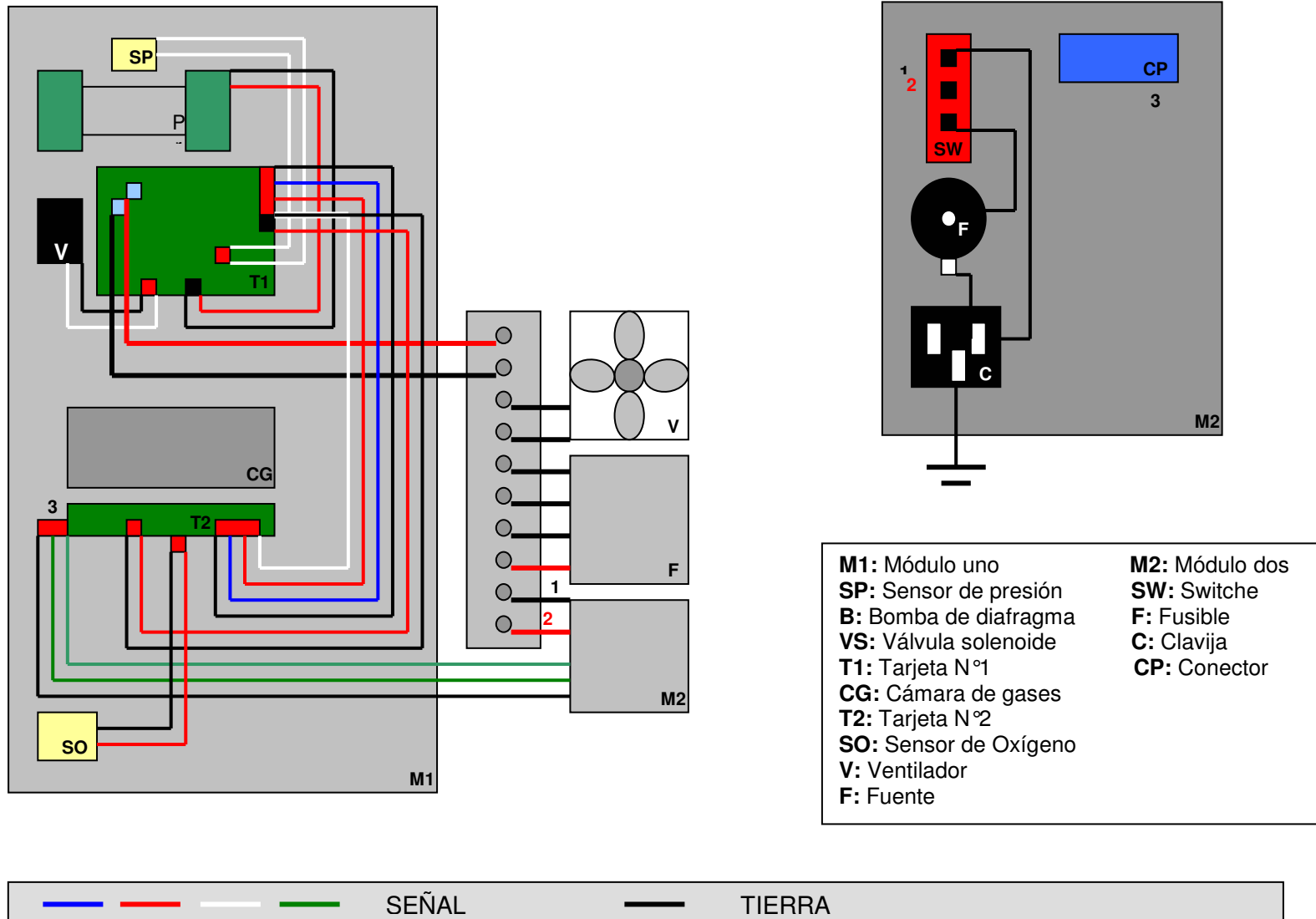


Figura 26. Diagrama eléctrico



En la figura 26 se observa que el sistema eléctrico consta de dos módulos M1 y M2, cuyo suministro de energía se hace a través de la fuente de 12 voltios.

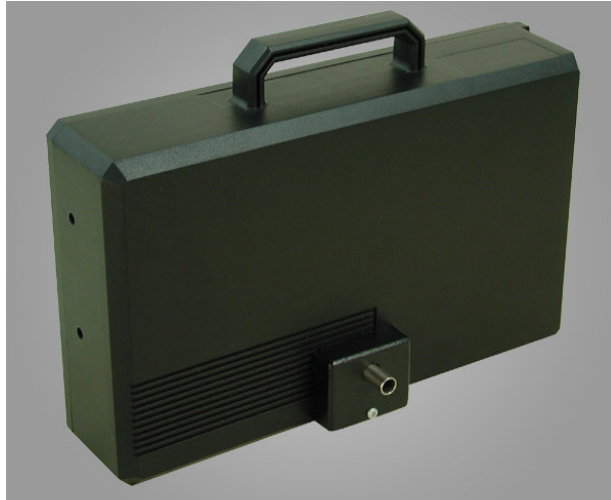
El módulo 1 (**M1**), consta principalmente de todos los elementos propios para la medición de los gases. El módulo 2 (**M2**) o módulo de encendido del analizador, consta de los accesorios necesarios para establecer el encendido y la comunicación del analizador.

El switch es energizado directamente por la fuente y el conector Serial de 9 pines se conecta a la tarjeta de la cámara de gases (**T2**). El ventilador y el módulo de encendido del analizador son también energizados por la fuente.

3.2.2 Opacidad. La medición del humo generado por los motores Diesel se hace por medio de un opacímetro de tipo muestreo que usa la técnica de corriente parcial. Esta técnica se basa en el método de extinción de luz que implica la medición de la cantidad de luz que no logra atravesar una columna de humo. Se utilizará este tipo de opacímetro ya que está orientado a la medición de humo diesel negro. El sistema consta del opacímetro y de la sonda de muestreo de gas.

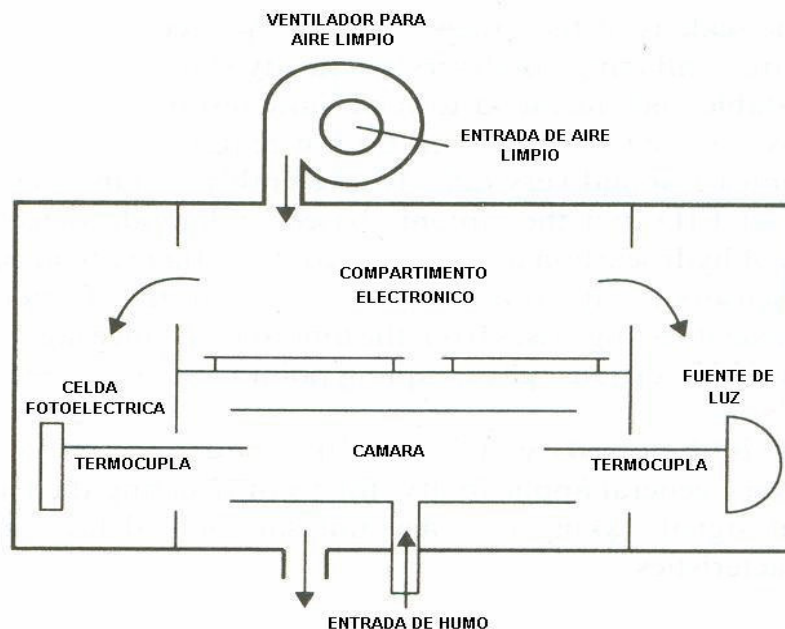
3.2.2.1 Opacímetro de tipo Muestreo. El opacímetro de tipo muestreo mide la opacidad de una porción de los gases de escape que ha sido extraída del tubo de escape y llevada a través de una cámara de medición de tamaño normalizado. Este opacímetro mide la cantidad de luz bloqueada por la muestra en una escala de 0 a 100% de opacidad. En el cual una opacidad del 0% indica que no hay humo en la celda de muestra y una opacidad del 100% indica que el tubo está completamente bloqueado.

Figura 27. Opacímetro de tipo muestreo



La Figura 28 ilustra el principio de operación que implica la medición de opacidad de una porción de los gases de escape que circula continuamente a través del tubo de muestreo. El cero de referencia se consigue mediante un arreglo de interruptores que utiliza un segundo tubo que contiene aire puro libre de humo. Un ventilador eléctrico interno purga la caja del instrumento y limpia el hollín de la fuente de luz y de la fotocelda. Tiene un miliamperímetro calibrado que mide en unidades de 0 (limpio) a 100 (completamente opaco). Puesto que la longitud del tubo de humo es fija y conocida, estas lecturas pueden ser relacionadas con las mediciones de humo efectuadas con otros instrumentos utilizando la ley de Beer-Lambert. La lectura del humo no es afectada por el diámetro del tubo de escape. Las respuestas están limitadas por el tiempo requerido para llenar el tubo de muestreo (el tiempo de transporte es de aprox. 0.2 a 0.6 seg.) y por la longitud del tubo que entrega la muestra.

Figura 28. Funcionamiento del Opacímetro



3.2.2.2 Principales partes del Opacímetro

Cámara óptica: La óptica está basada en una doble trayectoria de luz, de un LED verde con un pico espectral entre 550 nm y 570 nm; un detector, un espejo, un lente convexo y un emisor. Con la fuente localizada a 90° del eje óptico y el emisor a 45°, la luz es reflejada por el emisor y colimada por el lente. Esta viaja a través del tubo de la muestra y es reflejada al espejo, localizado en el lado opuesto. A partir de ahí ésta retorna a través de la celda de muestra al detector ubicado junto al emisor

Dentro de la carcasa de la cámara óptica está el calentador del detector que mantiene al detector a 45°C. El tubo de muestra se calienta a 75°C para evitar la condensación y para eliminar los errores de auto-cero causados por un cambio en la intensidad debido a la refracción de la luz a diferentes temperaturas. Esto también garantiza una temperatura mínima en todo el lugar de la celda de muestra de más de 70°C.

Tubo de muestra: El tubo de muestra tienen las características necesarias para contener y calentar el flujo de gas que va a ser medido. La longitud y el diámetro del tubo determinan la colimación de la luz a ser medida.

Sistema de aire: Físicamente conecta el tubo de muestra con la cámara óptica. Es un perno de 2.54 mm de diámetro localizado en el interior e inmediatamente por encima de la salida del tubo de muestra, que causa un efecto venturi creando un ligero vacío para el flujo de aire. Este proceso permite a la cámara de muestra purgar antes de una calibración. El aire también proporciona una barrera térmica entre el tubo de muestra (75°C) y la cámara óptica (45°C).

Ventiladores: Generan suficiente flujo de aire que previene la colección de polvo en las partes ópticas, lente y espejo. El flujo de aire también estabiliza la temperatura interna y enfría la cámara óptica.

3.2.2.3 Sonda de Muestreo. Está formada por una punta de malla de acero inoxidable de 1.3 cm DE y 1.05 cm DI con un dispositivo de agarre que asegura que la sonda quede centrada en el tubo, y por 3 m de manguera endonada de silicona de 2.25cm de DE y 1.3cm de DI. Ver figura 29.

Figura 29. Sonda de muestreo del opacímetro



3.2.3 Flujo de gas de escape. Para determinar la velocidad promedio del flujo con que circulan los gases de escape a través del exhosto y para cuantificar su caudal, es necesario conocer la caída de presión a través de la tubería, la temperatura, la presión y densidad del gas. Se utilizará un sensor de presión diferencial, un transductor de presión y un sensor de temperatura de los gases.

3.2.3.1 Sensor de Presión Diferencial. Se utilizará un tubo Pitot tipo S para determinar la caída de presión del gas, el cual es diseñado específicamente para la medida de flujo de gases con alto contenido de material particulado y para resistir obturaciones. Este método está basado en la determinación del caudal de gases por medio de tubo pitot, recomendado por la EPA (Método 2D. Determinación de velocidad de gas en chimeneas)²

El método se aplica para la medición de velocidad promedio del flujo del gas y para cuantificar su caudal en tubos, chimeneas y conductos de diámetro de 4" o más. Para lograr una medición representativa de las emisiones contaminantes y/o del caudal o flujo volumétrico, se selecciona un sitio de toma de muestra o medición donde la corriente del efluente está fluyendo en una dirección conocida y se divide la sección de la chimenea en áreas iguales. Se localiza luego un punto en el centroide de cada una de las áreas predeterminadas donde se hará la toma de muestras. Si las circunstancias no lo permiten, se debe centrar el tubo pitot en el ducto, determinar el diferencial de presión, calcular la velocidad actual del centro y multiplicar este valor por 0.9.

Un tubo pitot tipo S tiene dos tubos, cuyas aberturas deben estar en dirección normal al flujo del fluido, dispuestas para sensar la presión total y estática simultáneamente de la corriente de gas en un ducto o tubería; la presión total corresponde a la suma de la presión estática ejercida en las paredes del tubo y la presión dinámica del gas en movimiento; la diferencia entre las presiones total y estática es indicada por un transductor de presión diferencial, a partir del cual se puede obtener la velocidad del fluido.

² www.epa.gov

El tubo pitot corresponde a un medidor de la serie 160S, marca Dwyer. Está diseñado para elaborar pruebas en campo y medir de la forma más real el flujo de gas con material particulado. Este tubo pitot usa tubería en acero inoxidable de 5/16" de diámetro y posee dos adaptadores de tubería para conectar manguera de 3/16" de diámetro interno. Ver figura 30.

Figura 30. Tubo Pitot Tipo S



3.2.3.2 Transductor de Presión. El diferencial de presión es medido por medio de un transductor de presión diferencial, cuyo rango de operación es de 0 a 1" de agua, el cual convierte la señal de presión en una señal análoga. Ver figura 31.

Figura 31. Transmisor de presión diferencial.



El transductor de presión corresponde a un transmisor indicador serie 604D, marca

Dwyer, que provee indicación local en una escala análoga compacta y de fácil lectura; también convierte la presión, mediante un cable estándar, a señal de 4-20 mA para rangos tan bajos como 0-0.5 in H₂O. Este modelo contiene el acondicionamiento eléctrico y la amplificación de un cambio de resistencia producido por un medidor de tensión de silicón. Este cambio de resistencia, es el resultado de un ligero flexionamiento, el cual resulta de la deflexión elástica del diafragma producto de la presión ejercida sobre él.

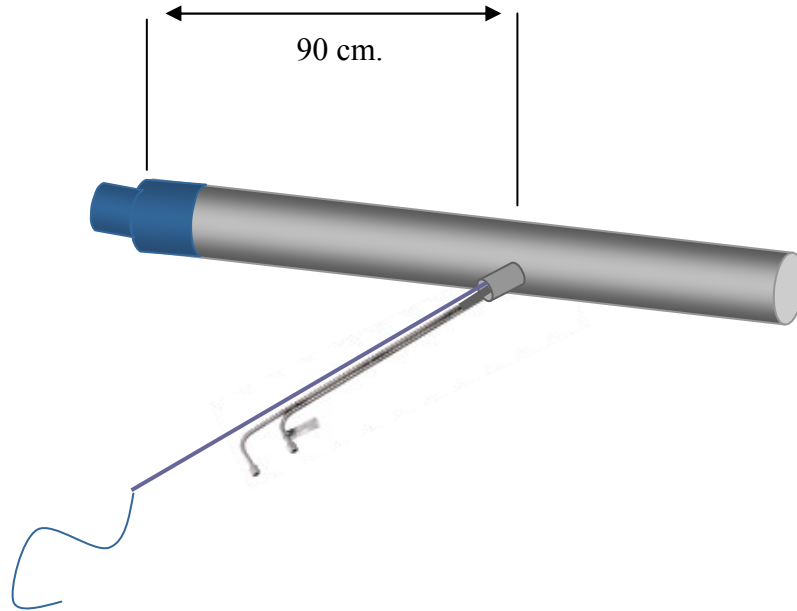
3.2.3.3 Sensor de Temperatura. La medida de la temperatura es importante para poder determinar la densidad del gas que permitirá conocer la velocidad de los gases. Se medirá por medio de una termocupla tipo J blindada de 1 m de largo y 5mm de diámetro, la cual se coloca junto con el tubo pitot tipo s.

3.2.3.4 Instalación del Medidor. El tubo pitot debe estar ubicado a una longitud mínima de 8½ diámetros corriente arriba y 1½ diámetros corriente abajo de cualquier perturbación, se debe instalar en una tubería de mínimo 4”³ En nuestro caso el tubo está ubicado a 90 cm del extremo de un tubo de acero inoxidable de 10 cm. de diámetro (4”) y 1.5 metros de longitud. El cual se ajusta a las diferentes formas y tamaños de exhosto por medio de mangueras flexibles y de acoples. Ver figura 32.

Debido a que el diámetro de la tubería donde es instalado el tubo pitot, es el mínimo recomendado, el pitot se debe centrar, es decir solo hay un punto de toma de muestra que permitirá calcular la velocidad del centro. La velocidad promedio se obtendrá multiplicando este valor por 0.9.

³ Medidas recomendadas por la EPA en el método 2: Determinación de velocidad en chimeneas y por el fabricante del tubo pitot :Dwyer.

Figura 32. Instalación del medidor de flujo



3.2.4 Tratamiento y Adquisición de señales

3.2.4.1 Acondicionamiento de Señal. Las señales eléctricas generadas por los transductores de presión, temperatura, velocidad, flujo, deben ser optimizadas para los rangos de entrada de la tarjeta de adquisición de datos. Los módulos de acondicionamiento para estas señales pueden amplificar los niveles de voltaje, aislar y filtrar las señales. Además algunos transductores requieren excitación de voltaje o corriente para generar un voltaje de salida que pueda ser registrado por el sistema de adquisición de datos. Las características de los transductores definen muchos de los requerimientos del acondicionamiento de señales del sistema de adquisición.

Debido a que la mayoría de transductores de presión, temperatura y velocidad no se encuentran en el rango de trabajo de los sistemas digitales, 0 a 5V DC, y de 4mA a 20mA, se hace necesario el acondicionamiento de sus niveles de tensión.

Acondicionamiento de termocuplas

Debido a la no linealidad que caracteriza a las termocuplas, se hace necesario linealizar su respuesta para poder medir las variaciones de temperatura, además se requiere amplificar la señal de tensión obtenida con el fin de llevarla al margen de 0 a 10VDC para la tarjeta de adquisición de datos.

Se utilizó un circuito que permite linealizar las variaciones de temperatura en una termocupla tipo J y K a 10mV/C, lo cual es una resolución suficiente para el control de temperatura en el motor Diesel. El circuito es alimentado con una fuente de 12V DC consumiendo típicamente una corriente de 160uA. Este dispositivo está calibrado para grados centígrados y su exactitud es de $\pm 1^\circ\text{C}$.

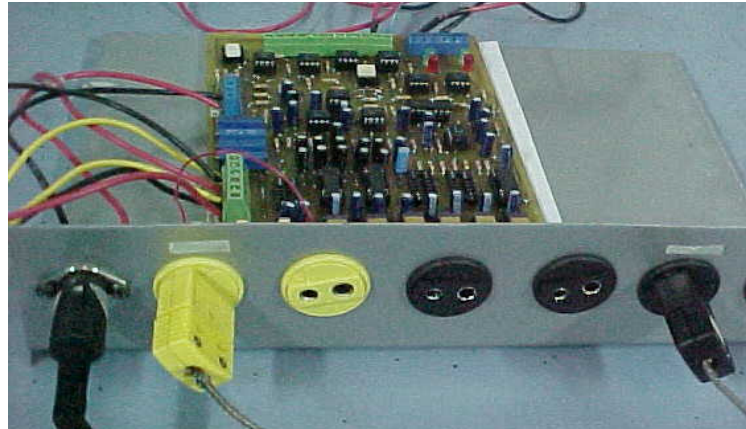
La salida amplificada y linealizada es conectada a un amplificador de aislamiento, brindando así mayor seguridad al sistema y eliminando el ruido generado por el contacto de la termocupla con el motor Diesel. Para realizar el filtrado de las señales provenientes del motor, se utiliza un filtro que elimina componentes de frecuencia por encima de 10Hz.

Acondicionamiento de señal para transmisor de presión diferencial

El circuito de acondicionamiento de señal debe contar con un integrado que convierta la señal de corriente que proporciona el sensor a tensión y si ésta no cumple con los márgenes de 0 a 10 V se debe agregar un amplificador que permita llevarla a estos niveles.

El acondicionamiento de señal está conformado por un circuito integrado convertidor de corriente-tensión que se encarga de convertir la salida del sensor de 4-20mA a 0-5V. El circuito amplificador no es necesario ya que la señal se encuentra dentro del rango establecido.

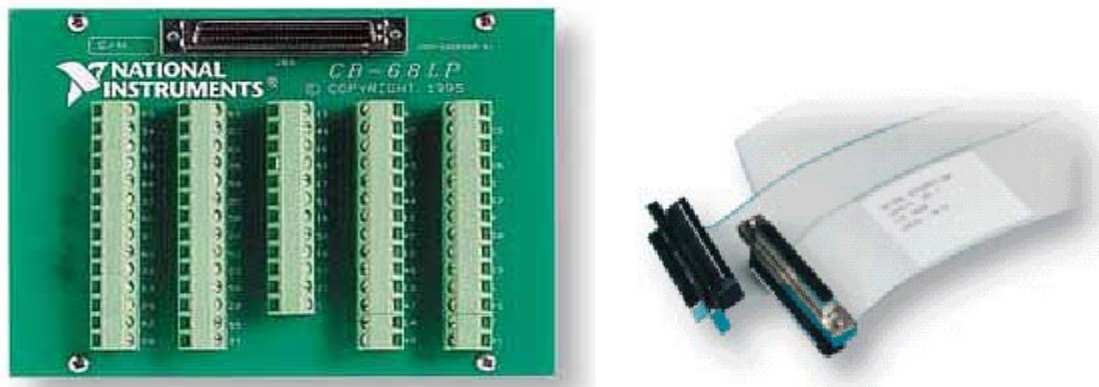
Figura 33. Tarjeta acondicionadora de señales



3.2.4.2 Adquisición de Señales y Datos. Las señales reportadas por el analizador y opacímetro son adquiridas a través de los puertos USB del computador utilizando cable conversores RS232/USB.

Las señales de temperatura y presión una vez se han acondicionado a valores de 0 a 5V y 4mA a 20mA se adquieren con una resolución de 16 bits y 16 canales analógicos para digitalizar las variables físicas sensadas en el motor. La tarjeta de adquisición de datos es la CB-68LP de National Instruments (figura 34) acoplada a un computador portátil.

Figura 34. Tarjeta y conector para adquisición de señales



3.3 SOFTWARE

El software es el encargado de administrar los recursos asociados a los sistemas que involucren el computador dentro del proceso, para llevar a cabo el manejo de la información, el almacenamiento de la misma y la velocidad de operación, además, del análisis y/o control de señales de proceso.

Debe garantizar el desarrollo automático y secuencial de la medida de las concentraciones de CO, CO₂, O₂, C₃H₈, opacidad y flujo del gas de escape de un motor diesel Así como de otras variables derivadas de ellas. Además permitir verificar los requerimientos funcionales del módulo sensor-transmisor para efectuar una adecuada toma y análisis de la muestra.

Debe garantizar el desarrollo automático de las siguientes funciones:

- Recibir los datos reportados por el sistema de adquisición de señales
- Verificar el estado de las comunicaciones con los componentes del módulo sensor-transmisor.
- Registrar el estado y condiciones del analizador: Fuera de rango, necesidad de cero, condensación , bajo flujo y calentamiento
- Registrar el estado y condiciones del opacímetro: Fuera de rango, requerimiento de limpieza y calentamiento.
- Reportar las concentraciones de CO, CO₂, O₂ en % volumen; C₃H₈ en ppm; % opacidad; temperatura del aceite y temperatura de los gases en °C; revoluciones por minuto y flujo del gas en mg/s.
- Calcular y reportar el flujo en mg/s, de cada gas y del material particulado. Además de la relación aire combustible y la función lambda con las que opera el motor.
- Graficar el comportamiento de las variables medidas y calculadas en función del tiempo.

- Permitir funciones como: calibrar, iniciar y finalizar una prueba.
- Generar un procedimiento para obtener las emisiones y demás variables cuando el motor se encuentra en ralentí y cuando es acelerado.
- Almacenar los datos una vez se ha decidido iniciar una prueba
- Realizar un análisis estadístico a los datos almacenados.

Para llevar a cabo estas funciones se utilizará un algoritmo y un lenguaje de programación que permitan recibir, procesar y enviar datos a través de una interfaz que permite la comunicación con el usuario; además de configurar y controlar las tarjetas, instrumentos y equipos comunicados por los puertos.

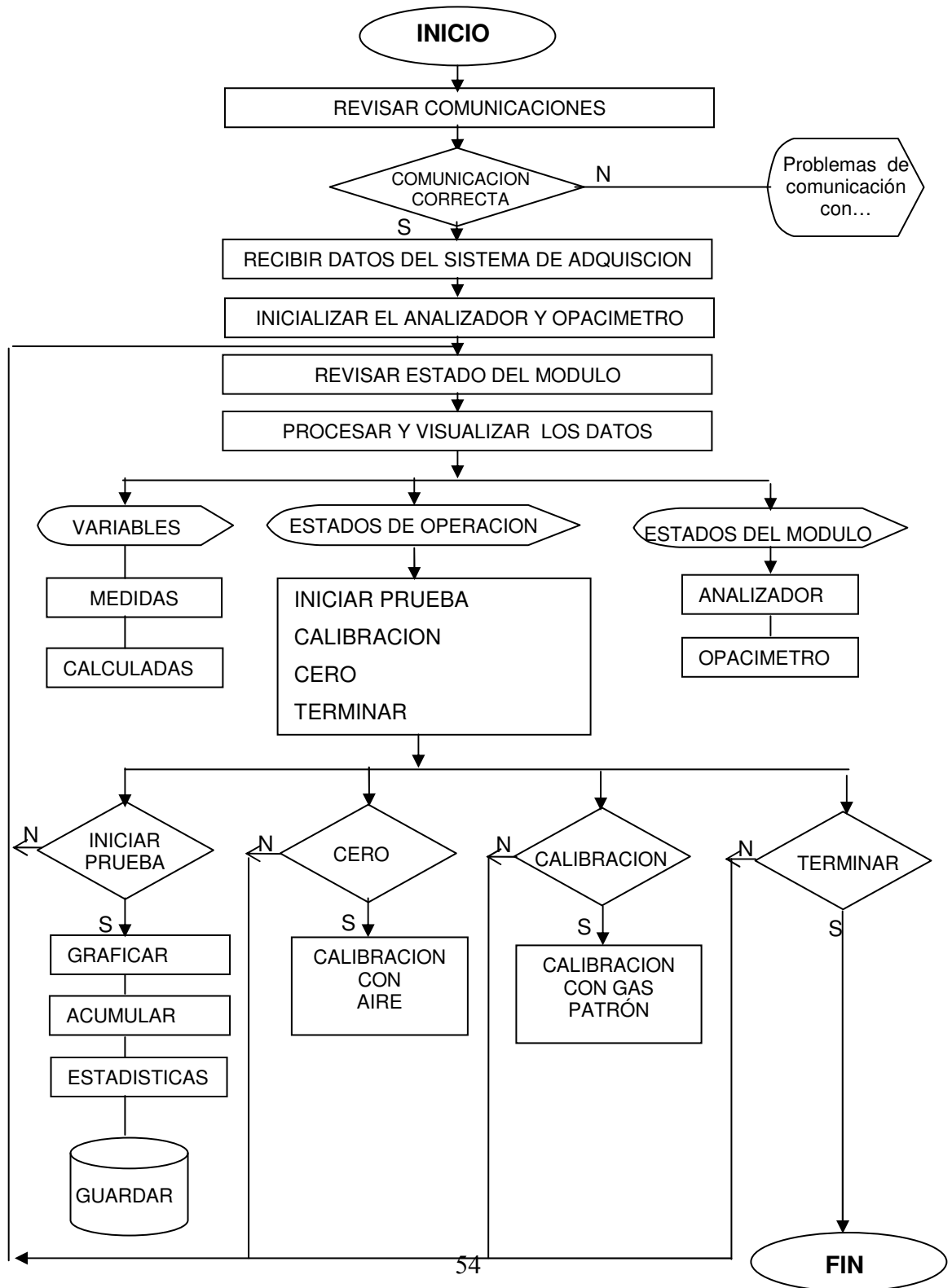
3.3.1 Algoritmo. El procesamiento de datos se basa en la construcción de un algoritmo y el empleo de unas estructuras de datos. Por algoritmo se entiende, la descripción exacta del orden determinado en que se ha de ejecutar un sistema de operaciones para resolver todos los problemas. El algoritmo debe garantizar el cumplimiento de las funciones del módulo sensor-transmisor. De la figura 35:

3.3.1.1 Revisar Comunicaciones. El software revisa las comunicaciones con el analizador, opacímetro y tarjeta de adquisición de datos. Por medio de mensajes avisa al usuario si existe algún problema de comunicaciones con cualquier parte del módulo.

3.3.1.2 Recibir Datos del Sistema de Adquisición. Una vez se han revisado las comunicaciones, el software recibe los datos de las partes del módulo que tengan comunicación con él.

3.3.1.3 Inicializar el Analizador y el Opacímetro. Antes de la visualización el software enciende la bomba del analizador para registrar las concentraciones de los gases a las condiciones ambiente y poder conocer el estado del analizador. Además inicializa el opacímetro, etapa en la cual él hace una auto-calibración.

Figura 35. Algoritmo



3.3.1.4 Procesar y Visualizar los Datos. En esta fase, el software permite la visualización de todas las variables medidas y procesadas; de los estados de operación y del módulo.

3.3.1.4.1 Variables

Variables medidas. Las variables a medir se encuentran reportadas en la siguiente tabla:

Tabla 2. Variables a medir

VARIABLE	UNIDAD	SENSOR
Revoluciones por minuto del motor	rpm	Sonda efecto Hall
Temperatura del aceite del cárter	°C	Termocupla Tipo K
Temperatura del gas de escape	°C	Termocupla Tipo J
Caída de presión del gas de escape	in H2O	Tubo Pitot Tipo S y transmisor diferencial.
Concentración de: * Monóxido de carbono * Dióxido de carbono. * Propano	% V/V % V/V ppm	Cámara infrarroja no dispersiva
Concentración oxígeno	% V/V	Sensor electroquímico
Opacidad	%	Opacímetro

Variables calculadas

Flujo de Gas de Escape

$$\text{flujo másico de gas de escape} = \text{Caudal} \times \text{densidad del gas} \quad (10)$$

El flujo másico de gas de escape se obtiene multiplicando la velocidad de salida de los gases de escape por la densidad y por el área del tubo por el cual fluyen.

$$m_{gas}^* = V \times A \times \rho \left[\frac{m^3}{s} \right] \quad (11)$$

La velocidad de salida de los gases de escape se obtiene aplicando un balance de energía a la corriente del gas, entre las posiciones donde están ubicadas las aberturas del tubo pitot, teniendo en cuenta las siguientes suposiciones:

- Pérdidas de fricción despreciables entre las posiciones anteriores del flujo del fluido.
- Las posiciones están colocadas a una misma elevación, desde un plano de referencia

La velocidad medida por un tubo pitot real está dada por la ecuación:

$$V = C_{Pitot} \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho_{Mez}}} \left[\frac{m}{s} \right] \quad (12)$$

Donde:

C_{Pitot} es un factor de corrección y es determinado por calibración. Para el tubo pitot tipo S usado, el valor de C dado por el fabricante es de 0.84⁴.

ρ_{Mez} es la densidad de la mezcla. Los cálculos para determinarla se encuentran en el anexo C.

Debido a que el tubo pitot está ubicado en el centro del tubo, la velocidad calculada se debe multiplicar por 0.9 para obtener la velocidad promedio.

⁴ www.dwyer-inc.com

Flujo de monóxido de carbono, dióxido de carbono, oxígeno y propano.

El flujo másico de cada componente está dado por:

$$\text{Flujo másico de } i = \text{Flujo total} \times \text{Fracción másica de } i \quad (13)$$

El cálculo de las fracciones másicas se encuentra en el anexo C.

Flujo de Material Particulado.

Una aproximación al flujo de material particulado fue realizada con base en la correlación de humo en estado estacionario, entre opacímetro de tipo muestreo y contenido de hollín de los gases de escape establecida por la Sociedad de Ingenieros Automotrices, SAE⁵.

De las figuras 10 y 11 anexo C se puede determinar:

$$\text{Concentración de } Mp = 0.4835(\%Opacidad) - 0.12468 \left[\frac{mg}{ft^3} \right] \quad (14)$$

Por tanto el flujo de Material Particulado está dado por:

$$\text{Flujo } Mp = 35.31 \times Mp \times \text{Caudal} \left[\frac{mg}{s} \right] \quad (15)$$

Relación Aire/Combustible

Para combustibles compuestos solamente de carbono e hidrógeno, cuando todas las especies son medidas bajo las mismas condiciones de mezcla (húmeda, seca o parcialmente seca), la siguiente expresión basada en la relación entre especies que contienen oxígeno con especies que contienen carbono permite obtener la relación

⁵ Carta de alineación preparada por el comité de estándares de emisiones para trabajo pesado. SAE J35: 1991

aire/combustible. Asumiendo que los hidrocarburos no quemados tienen la misma relación carbono/ hidrogeno que el combustible:⁶

$$\left(\frac{A}{F}\right)_{REAL} = 4.773 \left(\frac{M_{Aire}}{M_{Comb}} \right) \left(\frac{(\%CO_2) + \left(\frac{\%CO}{2}\right) + \left(\frac{\%H_2O}{2}\right) + (\%O_2)}{(\%HC) + (\%CO) + (\%CO_2)} \right) \quad (16)$$

Donde (%X) son concentraciones molares en porcentaje, $M_{Aire}=28.96\text{g/mol}$, $M_{Comb}=44\text{g/mol}$

$$(\%H_2O)_{formada} = 0.5y \times \left(\frac{(\%CO_2) + (\%CO)}{\left(\frac{\%CO}{[3.8(\%CO_2)]} \right) + 1} \right) \quad (17)$$

Donde: y es la relación hidrogeno /Carbono del combustible. Para el propano $y=2.67$

Función Lambda (Aire Suministrado/Aire Teórico)

La función lambda se obtiene a partir de la relación aire/combustible real y la relación aire combustible teórica.

$$\lambda = \frac{\left(\frac{A}{F}\right)_{Real}}{\left(\frac{A}{F}\right)_{Teorico}} \quad (18)$$

La relación aire /combustible teórica se deduce de la ecuación de combustión completa del propano:

⁶ Un análisis detallado de la relación aire/combustible se encuentra en el texto John B. Heywood. Pag 148-151.



$$\left(\frac{A}{F}\right)_{TEORICA} = \frac{(n_{O_2} \times PM_{O_2}) + (n_{N_2} \times PM_{N_2})}{nC_3H_8 \times PM_{C_3H_8}} = 15.71 \quad (20)$$

3.3.1.4.2 Estados de Operación

Iniciar Prueba: Inicia el proceso de medición de todas las variables cuando el motor es operado en ralentí y cuando es acelerado a fondo tres veces. El software presenta mensajes en la pantalla que instruyen al usuario en qué momento acelerar el motor. Para determinar este tiempo fue necesario identificar los tiempos de respuesta de cada sensor respecto al sensor que respondiera más rápido. Además, durante esta etapa se grafican las variables en función del tiempo, se acumulan, se guardan y se tratan estadísticamente: Durante la fase de ralentí se obtienen la media, la desviación estándar, la moda, el máximo y el mínimo de los datos acumulados; en las fases de Aceleración se obtienen el máximo de todas las variables.

Calibración. Permite la calibración del analizador con mezcla de gas patrón: Solicita las concentraciones de gases de la botella, confirma que los valores sean correctos y que realmente el usuario desea calibrar. Una vez se ha confirmado, guía al usuario sobre el proceso de calibración. Ver numeral 4.1.1.1 Operación del módulo.

Cero: Ajusta las concentraciones de los gases a la condiciones ambientales presentes. Ver numeral 4.1.1.2

Terminar: Termina el proceso de toma de datos, apaga la bomba y sale del programa.

3.3.1.4.3 Estados del módulo

Registra los requerimientos de calibración, limpieza y condiciones del analizador y opacímetro. Además presenta mensajes si existe problemas de comunicación con cualquiera de los componentes del módulo.

Fuera de Rango: la tabla 3 muestra los valores para los cuales el opacímetro y el analizador se salen del rango especificado.

Tabla 3. Especificaciones de fuera de rango

COMPONENTE	FUERA DE RANGO
C ₃ H ₈	<-26ppm y >4000 ppm
CO ₂	<-0.3% y >20%
CO	<0.6% y > 15%
O ₂	< -0.1% y >21.7%
OPACIDAD	<-2.55 y >100%

Tiempo de Calentamiento: Analizador de Gases 5 minutos y Opacímetro 15 minutos.⁷

Bajo Flujo: Característica del analizador. Es detectado cuando la presión de succión de la bomba es menor de 986 mbar debido a posibles filtros sucios.

Condensación: Característica del analizador cuando la temperatura ambiente es mayor que la temperatura de la cámara en 3 °C ($T_{\text{ambiente}} > T_{\text{Cám}} + 3^{\circ}\text{C}$)

Requerimiento de Cero: Característico del analizador. El requerimiento de cero está basado en parámetros internos del banco como suciedad y cambio de temperatura.

⁷ User Manual SENSORS

Requerimiento de limpieza: Esta condición es característica del opacímetro. Y ocurre cuando el hace una auto-calibración y envía valores del 10% o cuando hay una falla en el LED.

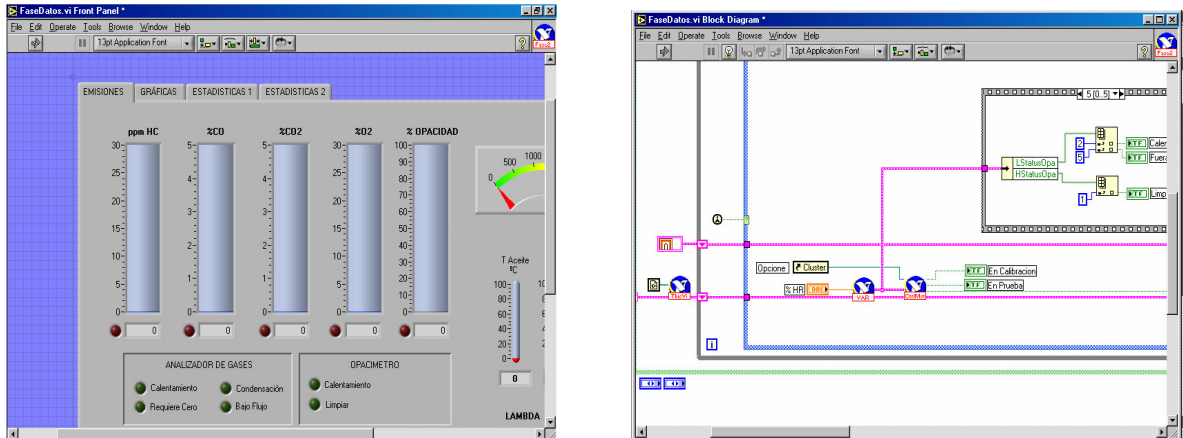
3.3.2 Lenguaje de Programación. Muchos de los lenguajes de programación están trabajando con un paradigma del lenguaje escrito, donde el programador necesariamente debe aprender la mayoría de las palabras claves y la importancia que éstas tienen en el desarrollo del programa. Una ausencia o mala escritura de un signo o una palabra en el lenguaje, puede causarle al programador tiempo innecesario que puede perjudicarlo. Por este motivo, se optó por el uso de **LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Worckbench)**, siendo un lenguaje de programación de propósito general con librerías extendidas de funciones para cualquier tarea de programación, como es el lenguaje C o Basic; pero con la característica que es totalmente gráfico y sencillo de utilizar.

LabVIEW es un instrumento virtual que simula el panel frontal de un instrumento, y apoyándose en elementos hardware accesibles por el ordenador (tarjeta de adquisición y puertos) realiza una serie de medidas como si se tratase de un instrumento virtual.

De este modo, cuando se ejecuta un programa que funciona como instrumento virtual o **VI**, el usuario ve en la pantalla de su ordenador un panel cuya función es idéntica a la de un instrumento físico, facilitando la visualización y el control del aparato. A partir de los datos reflejados en el panel frontal, el **VI** debe actuar recogiendo o generando señales, como lo haría su homólogo físico.

Cuando se crea un **VI** en **LabVIEW** se trabaja con dos ventanas: Una en la que se implementará el panel frontal y otra que soportará el nivel de programación (Diagrama de bloques) Ver figura 36.

Figura 36. Panel frontal y ventana de programación



En el anexo C se encuentran los VI más importantes que realizan las funciones del algoritmo, su secuencia y jerarquía.

3.3.3 Interfaz gráfica. La interfaz fue diseñada de tal manera que se convirtiera para el usuario en una herramienta de fácil manejo, facilitando la selección de opciones encargadas de exponer permanentemente el desarrollo del proceso de medición de emisiones y mostrar los resultados.

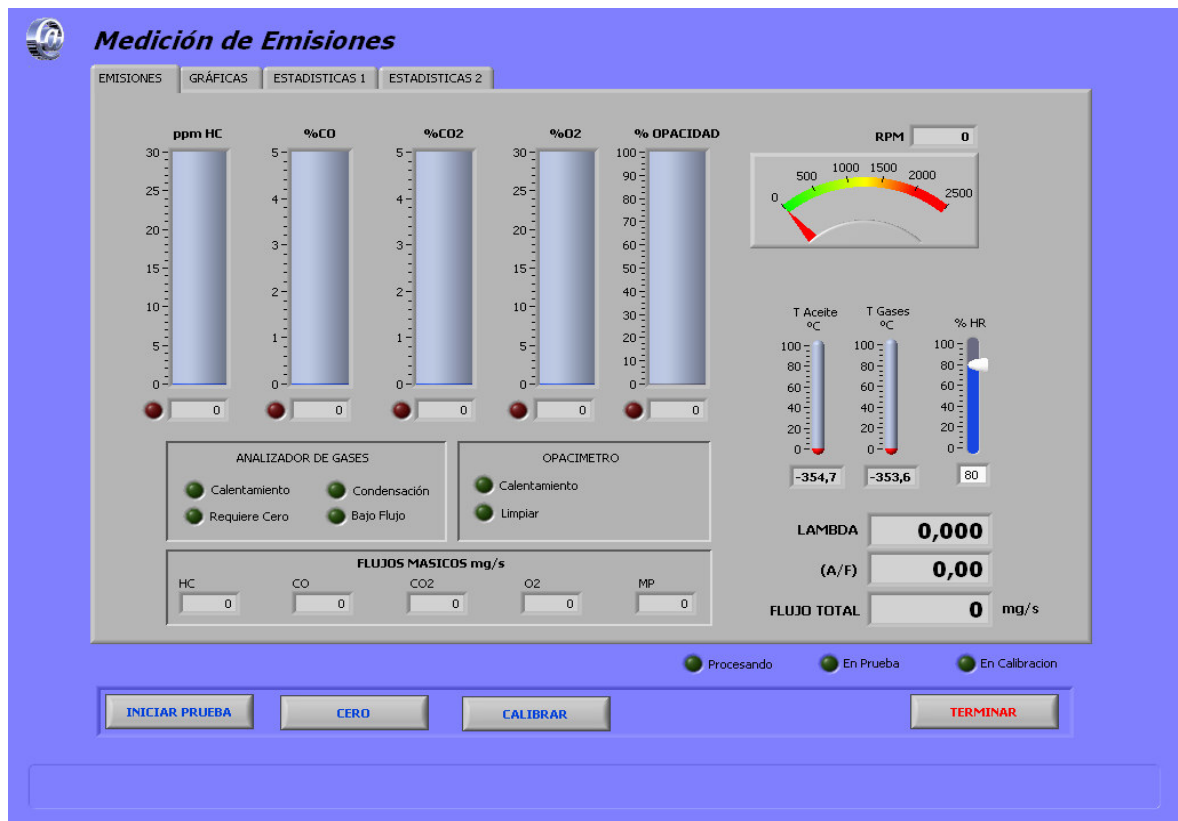
La pantalla de visualización de datos es un panel frontal donde se registran todas las variables, los estados de operación y las condiciones del módulo. Permite ver el comportamiento de las variables durante el transcurso de la prueba en forma gráfica y muestra un análisis estadístico de los datos procesados en cada etapa de la prueba.

La sección llamada **EMISIONES** (Figura 37), visualiza las variables medidas y calculadas de una forma continua hasta la finalización del programa.

En la parte izquierda tiene cinco barras con indicador numérico. Cada una con una escala de medida apropiada para cada concentración, lo que permite la lectura rápida de: porcentaje en volumen de monóxido de carbono, dióxido de carbono y oxígeno, ppm de propano y porcentaje de opacidad. Junto a cada barra hay un led de alerta cuyo

encendido depende del fuera de rango de cada concentración. Esto permite al usuario conocer en qué momento se están obteniendo medidas fuera del rango especificado para cada una. Al igual que fuera de rango, cada uno de los estados y requerimientos del analizador y opacímetro son mostrados con leds de alerta.

Figura 37. Sección EMISIONES del Panel Frontal

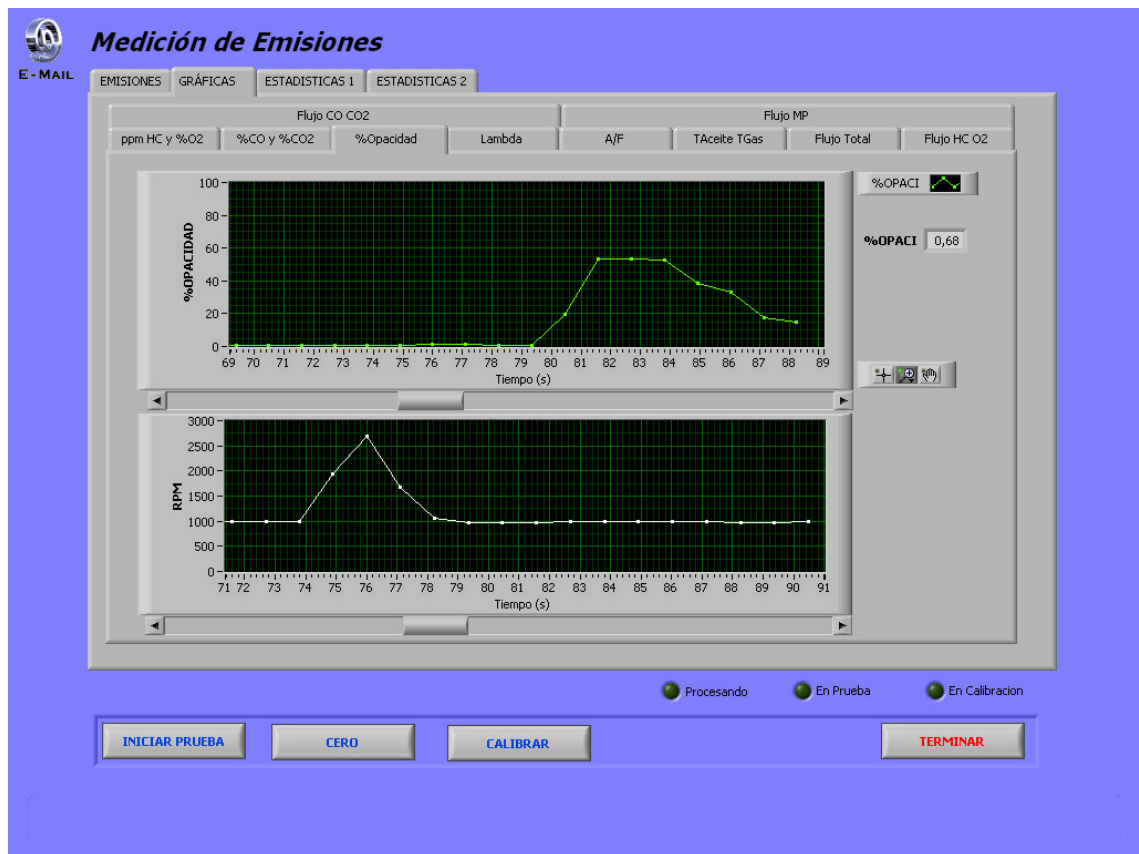


En la parte derecha se encuentra un medidor análogo/numérico cuya función es registrar los cambios de velocidad del motor. Dos indicadores en forma de termómetro encargados del registro de las temperaturas del aceite lubricante y de los gases de escape. Un indicador del porcentaje de humedad relativa que permite digitar su valor en el momento de la prueba y tres indicadores numéricos que registran la relación aire-combustible, la función lambda y el flujo total respectivamente.

En la parte inferior por medio de indicadores numéricos; los flujos másicos son reportados en unidades de mg/s, para cada una de las emisiones junto con el de material particulado, de forma continua durante la ejecución de la prueba.

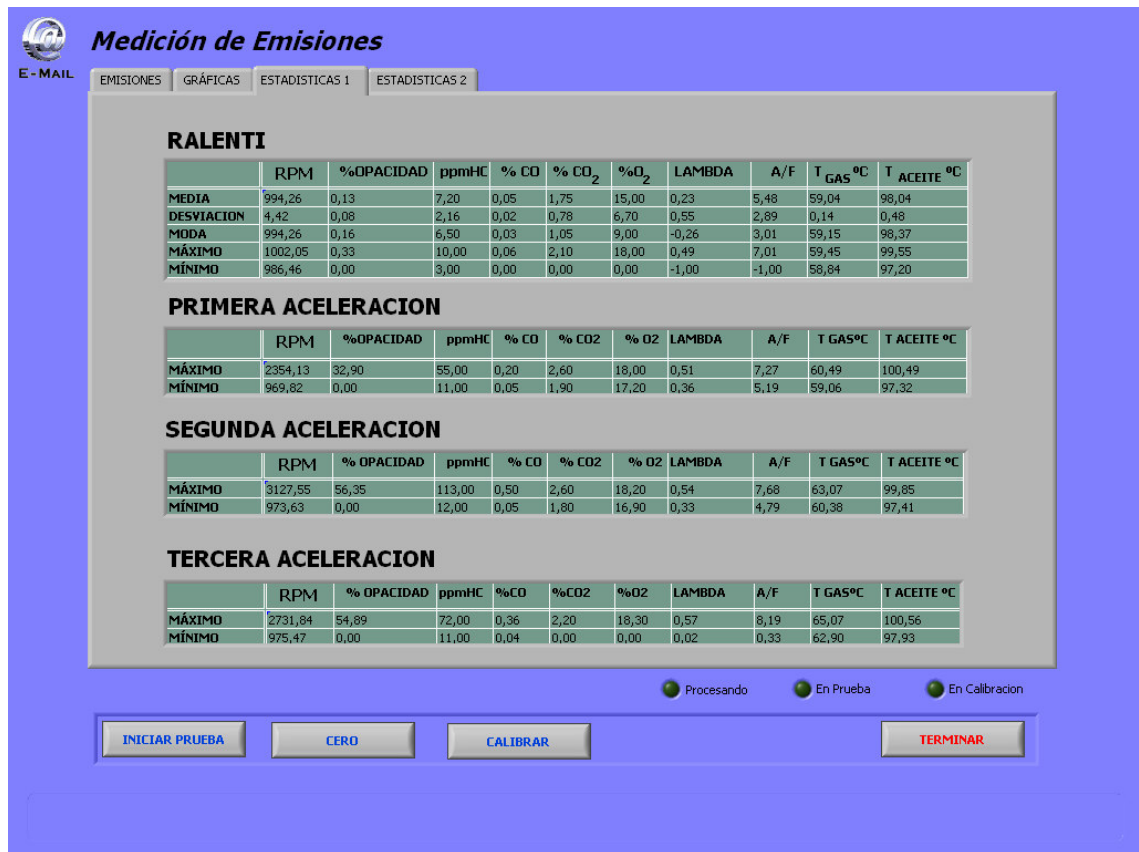
La sección de **GRAFICAS** (Figura 38), visualiza en forma de graficas de dispersión cada uno de los datos obtenidos durante la prueba, permitiendo ver el comportamiento de las emisiones, los flujos y demás variables respecto a las revoluciones por minuto del motor y el tiempo.

Figura 38. Gráficas de variables medidas



La sección de **ESTADISTICAS** (Figura 39), registra mediante tablas los valores estadísticos de todas las variables, a la velocidad que fue llevado el motor Diesel durante la prueba.

Figura 39. Valores estadísticos de las variables medidas



Existen botones y leds, que son comunes a todas las secciones. Los botones permiten controlar los estados de operación del módulo y los leds son los indicadores de la condición de prueba, del procesamiento de los datos y del instante en el que se está calibrando el equipo.

4. PROCEDIMIENTO DE OPERACIÓN DEL MODULO SENSOR-TRANSMISOR

4.1 CALIBRACIÓN DEL MODULO

4.1.1 Analizador. La calibración del analizador es el conjunto de operaciones mediante las cuales el equipo establece los valores de concentraciones a reportar, a partir de la medición previa de gases de referencia de concentración conocida.

4.1.1.1 Calibración con mezcla de gas patrón. El analizador requiere y aprueba en forma automática una calibración para C₃H₈, CO y CO₂ con mezcla de gas patrón, de alta y baja concentración, de acuerdo con los métodos aprobados por la Norma BAR 90⁸. La calibración con gas patrón debe garantizar que se satisfacen las especificaciones de exactitud y que la linealidad es correcta en los dos puntos requeridos del Span (escala del analizador) más el cero.

El span debe realizarse de acuerdo con los siguientes puntos:

Tabla 4. Gases de Calibración según la BAR 90

Punto Span bajo	Punto Span Alto
300 ppm. de propano (HC)	1 200 ppm. de propano(HC)
1,0 % de monóxido de carbono (CO)	4,0 % de monóxido de carbono (CO)
6,0 % de dióxido de carbono (CO ₂)	12,0 % de dióxido de carbono (CO ₂)

La calibración con gas patrón, se realiza introduciendo el gas patrón de concentración conocida, a través del puerto de calibración, a una presión mayor que la presión normal de succión de la bomba, de tal manera que cuando ésta se encuentra apagada y la solenoide abierta, el gas llegue hasta el banco sensor. Una vez se registran las concentraciones éstas son comparadas con la de la botella para verificar la precisión del

⁸ "Test Analyzer System Specifications". Bureau of Automotive Repair. Departament of Consumer Affairs. State of California. United States of America (1990)

analizador. Este procedimiento debe ser repetido hasta que se alcance una precisión de $\pm 2\%$ la concentración de la botella.

4.1.1.2 Calibración con aire. Es empleada para calibrar el sensor de oxígeno y hacer cero los demás gases. Se realiza antes de cada prueba para descontaminar automáticamente el banco, mediante la entrada de aire ambiente filtrado al sistema. Este proceso se hace con el fin de ajustar el equipo a las condiciones ambientales presentes en el momento de la prueba y para determinar cualquier falla en el funcionamiento del sistema. Si una vez realizada esta calibración los valores de las concentraciones no son los esperados, el analizador se debe calibrar con gas patrón.

4.1.2 Opacímetro. La calibración del opacímetro se realiza estableciendo la relación existente entre el valor indicado por el medidor de opacidad de humos y los valores correspondientes a un filtro o elemento de opacidad conocida.

El opacímetro tiene un canal en la parte inferior que permite la entrada de un lente de calibración (lente con un grado de opacidad definido). Para ejecutar un chequeo de linealidad el lente debe ser insertado a través de este canal, entre el emisor de luz y el detector. El valor del lente se compara con el valor de opacidad que reporte el opacímetro.

El cero del medidor se establece, sin bloquear el haz luminoso entre el emisor y el detector. La opacidad debe ser de $0\% \pm 1$, si es mayor que 1%, el opacímetro puede necesitar limpieza.

Para obtener la curva de calibración, se deben introducir por lo menos tres lentes de diferente opacidad, y la desviación promedio no debe superar el 2%. El procedimiento de calibración del opacímetro se realizó con lentes de 30,60 ,70 y 100 % de opacidad

4.1.3 Medidor de flujo. Para la calibración del medidor de flujo, se utilizó el medidor de flujo compresible, del Laboratorio de Fluidos de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la

UIS, el cual mide velocidades de aire, por medio de un termo-anemómetro digital calibrado. Ver especificaciones anexo A

El sistema de flujo se acopló al tubo del banco de tal manera que una misma velocidad de aire se evaluara con los dos medidores. El procedimiento seguido fue:

- Seleccionar una frecuencia del ventilador para mantener una velocidad constante de aire.
- Medir la velocidad con el tubo pitot ubicado en el centro del tubo.
- Medir la velocidad del aire con el termo-anemómetro digital ubicado también en el centro del tubo
- Repetir los pasos anteriores para otras frecuencias del ventilador.

Teniendo en cuenta que las velocidades obtenidas por el anemómetro y el tubo pitot deben ser multiplicadas por 0.9 para calcular las velocidades promedio.⁹

4.2 ETAPA EXPERIMENTAL

4.2.1 Montaje del módulo

1. El medidor de flujo se acopla al exhosto del motor de tal manera que quede en posición horizontal y no hayan fugas.
2. Introducir una termocupla tipo K junto con el medidor de aceite lubricante para verificar que el motor llegue a la temperatura normal de operación.
3. Colocar el sensor de revoluciones por minuto del motor.

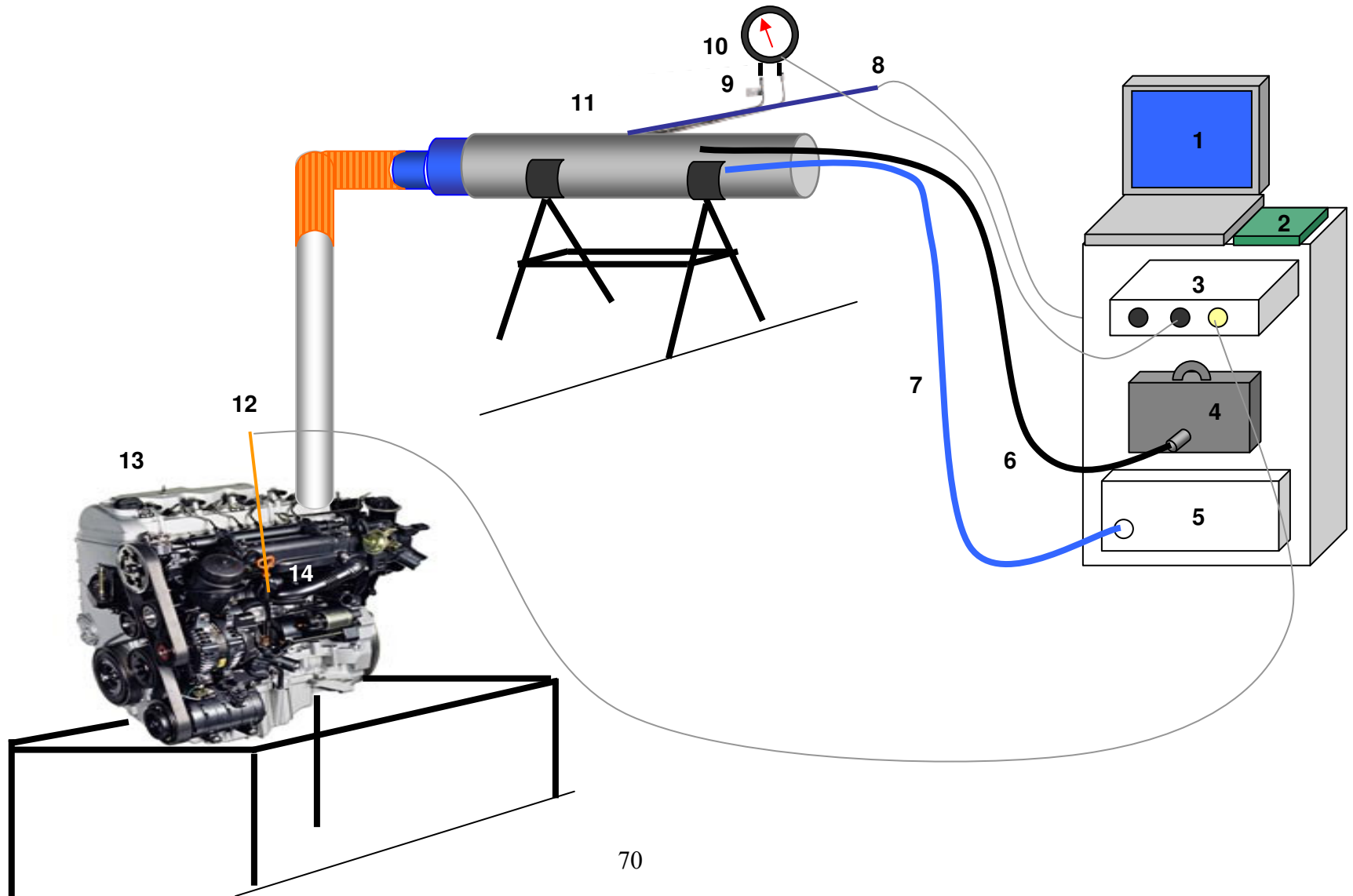
⁹ Método 2. Medida de velocidad de Gas. EPA.

4. Conectar la termocupla del medidor de flujo, la termocupla del medidor de aceite, el transmisor de presión diferencial, y el sensor de RPM a la tarjeta acondicionadora de señales.
5. Conectar la tarjeta acondicionadora de señales a la tarjeta de adquisición de datos.
6. Conectar el analizador, el opacímetro y la tarjeta de adquisición de señales al computador.

En la figura 40 se muestra el montaje del módulo sensor-transmisor en un motor Diesel. Donde:

1. Computador Portátil
2. Tarjeta de Adquisición de Datos de Nacional Instruments
3. Tarjeta Acondicionadora de las Termocuplas y del Transmisor Diferencial de Presión
4. Opacímetro de tipo muestreo
5. Analizador de Gases
6. Sonda del Opacímetro
7. Sonda de muestreo del Analizador
8. Termocupla Tipo J de los gases
9. Tubo Pitot tipo S
10. Transmisor de Presión Diferencial
11. Tubo de 4" para medir el flujo
12. Termocupla Tipo K del aceite lubricante
13. Motor Diesel
14. Medidor de Nivel del Aceite Lubricante.

Figura 40. Montaje del Módulo Sensor-Transmisor



4.2.2 Preparación del módulo sensor-transmisor

1. Encender e inicializar el módulo y una vez se haya superado la etapa de calentamiento del opacímetro y el analizador, asegurarse del correcto funcionamiento del módulo. Es decir:
 - Con las sondas del analizador y del opacímetro en contacto con el ambiente; el % de opacidad, las concentraciones de CO, CO₂ y HC deben ser cero y la concentración de oxígeno máximo 21%. Si los hidrocarburos son ≥ 20 ppm, se revisan los filtros y la sonda ya que pueden estar sucios.
 - Realizar la calibración con aire.
 - Los indicadores del flujo de gas de escape y de revoluciones por minuto deben estar en cero.
 - La relación aire combustible y la función lambda deben marcar 0 (Valor por defecto cuando el motor está apagado).
 - Las temperaturas del gas y del aceite reportadas por las termocuplas no deben ser menores a la T ambiente.
2. Colocar en marcha el motor del vehículo y verificar que éste llegue a su temperatura normal de operación, por medio de las lecturas dadas por la termocupla del aceite del motor.
3. Introducir las sondas del analizador y el opacímetro en el medidor de flujo a una distancia de mínimo 40 cms.

4.2.3 Procedimiento de medición. Una vez se hayan desarrollado las actividades establecidas en el numeral 4.2.2, se debe efectuar el siguiente procedimiento para la toma y análisis de la muestra de gases y la respectiva presentación de resultados.

- Mantener el motor en condición ralentí durante 30 segundos. El software registrara el promedio, la moda, la desviación estándar, el máximo y el mínimo de todas las variables obtenidas durante este tiempo.
- Acelerar a fondo el motor, durante máximo 3 segundos. El software registra el máximo y mínimo durante la aceleración.
- Retornar a la condición ralentí por 5 segundos y nuevamente acelerar. Este paso se repite para completar tres aceleraciones.
- Finalmente se debe detener el motor y extraer las sondas del opacímetro y el analizador para permitir que el equipo retorne a las lecturas de valores de correcto funcionamiento tal y como se reporta en el literal 1 del numeral 4.2.2.
- Realizar otras pruebas a partir del literal 3 del numeral 4.2.2 de preparación módulo sensor transmisor.

5. RESULTADOS Y ANÁLISIS

5.1 CALIBRACION

5.1.1 Analizador

- **Calibración con mezcla de gas patrón.**

Para establecer la precisión del analizador se debe determinar el porcentaje de error relativo o desviación promedio de las concentraciones medidas de cada gas con respecto a las concentraciones de la mezcla de gas patrón, utilizando la siguiente ecuación:

$$\%Error\ Relativo = \left| \frac{Valor\ Teórico - Valor\ Experimental}{Valor\ Teórico} \right| * 100 \quad (21)$$

Donde: Valor teórico es la concentración en la mezcla patrón

Valor experimental es la concentración dada por el analizador

En las tablas 5 y 7 se reportan los valores medidos por el analizador para cinco calibraciones, con mezclas de alta y baja concentración.

El valor promedio, la precisión, el sesgo, la probabilidad y el error obtenidas en cada una de las calibraciones son reportadas en las tablas 6 y 8.

Tabla 5. Datos de calibración con mezcla de gas patrón de baja concentración

COMPONENTE		Unidad	Concentración Mezcla patrón	Concentración medida				
				No.1	No.2	No.3	No.4	No.5
Propano	C ₃ H ₈	ppm	304±4	300	309	300	304	306
Dióxido de Carbono	CO ₂	%	6.1±0.1	6.1	6.2	6.2	6.3	6.1
Monóxido de Carbono	CO	%	1.0±0.001	1.00	1.00	1.00	1.03	1.04
Nitrogeno	N ₂	%	Balance	-----	-----	-----	-----	-----

Tabla 6. Valores promedio, precisión, sesgo, probabilidad y error en la calibración con mezcla de baja concentración

COMPONENTE	MEZCLA PATRON	X	S	SESGO	P(95%)	% E
C ₃ H ₈ ppm	304±4	305.2	±4.38	4	±2.42	±1
CO % V/V	1 ±0.01	1.016	±0.018	0.02	±0.01	±1.4
CO ₂ % V/V	6.1 ±0.1	6.19	±0.080	0.1	±0.044	±1.3

X: promedio, S: Precisión, P: Probabilidad, E: Error

Tabla 7. Datos de calibración con mezcla de gas patrón de alta concentración

COMPONENTE		Unidad	Concentración Mezcla patrón	Concentración medida				
				No.1	No.2	No.3	No.4	No.5
Propano	C ₃ H ₈	ppm	1216±15	1222	1218	1212	1228	1230
Dióxido de Carbono	CO ₂	%	12.2±0.2	12.1	12.1	12.2	12.3	12.3
Monóxido de Carbono	CO	%	3.9±0.06	3.90	3.88	3.89	3.93	3.93
Nitrógeno	N ₂	%	Balance	-----	-----	-----	-----	-----

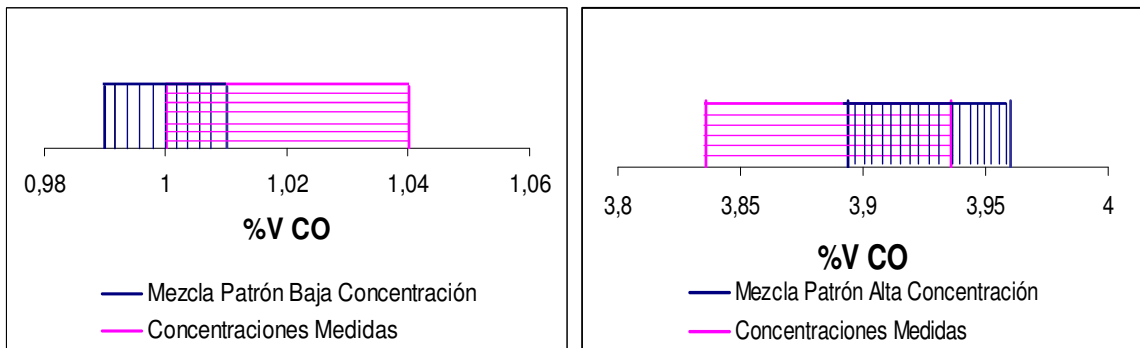
Tabla 8. Valores promedio, precisión, sesgo, probabilidad y error en la calibración con mezcla de alta concentración

COMPONENTE	MEZCLA PATRON	X	S	SESGO	P(95%)	% E
C ₃ H ₈ ppm	1216 ±15	1213.33	±17.3	-15	±2.42	±0.6
CO % V/V	3.9 ±0.06	3.89	±0.047	-0.05	±0.03	±0.5
CO ₂ % V/V	12.2 ±0.2	12.14	±0.145	-0.15	±0.08	±0.7

El analizador satisface las especificaciones de precisión, según la Norma BAR 90 ya que los porcentajes de error para cada gas están por debajo del ± 2% de la concentración de la botella y las especificaciones del MSA.

En la grafica 1 se puede ver el comportamiento del monóxido de carbono durante la calibración. Cuando se calibró con mezcla de baja concentración algunos de los valores medidos estuvieron por encima del rango de concentración de monóxido en la botella, mientras que para la calibración con mezcla de alta concentración algunos de los valores medidos estuvieron por debajo del rango. Este comportamiento fue similar para el CO₂ y C₃H₈ y concuerda con los valores del sesgo reportados en las tablas anteriores.

Gráfica 1. Comportamiento del monóxido de carbono durante la calibración.



- **Calibración con Nitrógeno**

En la tabla 9 se pueden observar los valores obtenidos cuando se pasó nitrógeno por el analizador.

Tabla 9. Calibración con Nitrógeno

COMPONENTE	CONCENTRACION GAS NITROGENO	CONCENTRACION MEDIDA X	S	SESGO
C ₃ H ₈ ppm	-----	0	0	0
CO % V/V	-----	0	0	0
CO ₂ % V/V	-----	0	0	0
O ₂ % V/V	-----	0.97	±0.45	-0.75
N ₂ % V/V	99.95	-----	-----	-----

- **Calibración con aire**

En la tabla 10, se puede verificar que las concentraciones de CO, CO₂ y C₃H₈ se hacen cero y la concentración de oxígeno es la del aire.

Tabla 10. Datos de calibración con Aire

COMPONENTE		Unidad	Concentración medida
Propano	C ₃ H ₈	ppm	0
Dióxido de Carbono	CO ₂	%	0
Monóxido de Carbono	CO	%	0
Oxígeno	O ₂	%	20.9

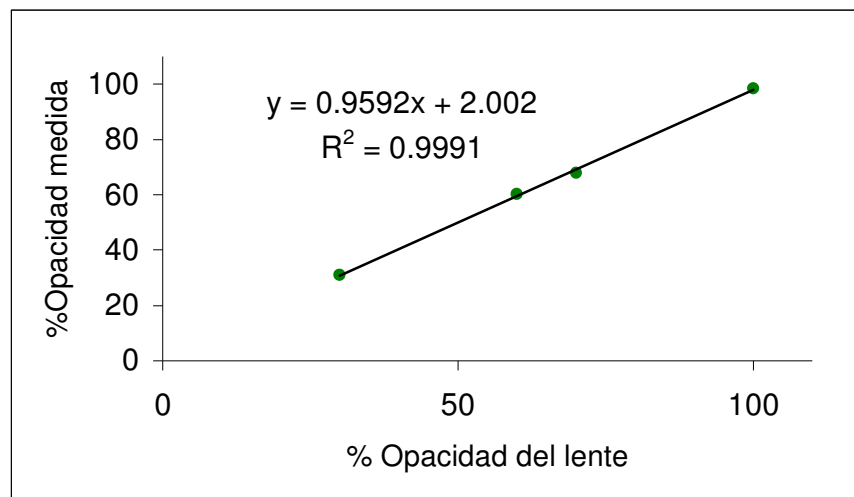
5.1.2 Opacímetro. Para calcular la desviación del Opacímetro respecto a los lentes de opacidad conocida, se utilizó la ecuación 21. Donde el valor teórico es el valor de opacidad del lente y el valor experimental es la opacidad reportada por el Opacímetro.

En la tabla 11 se puede ver que el % de Error promedio, es del 2%, lo que garantiza que el opacímetro cumple con las especificaciones de calibración. Además se muestran otras variables estadísticas.

Tabla 11. Datos de calibración del Opacímetro

% Lente	X	S	Sesgo	P (95%)	% E
0	0.093	± 0.083	0.1	±0.05	±0.6
30	30.9	± 0.058	-0.33	±0.33	±3
60	60.29	± 0.465	-0.095	±0.27	±0.44
70	67.9	± 0.294	-2.04	±0.17	±2.95
100	98.4	± 0.062	-1.6	±0.04	±1.63

Gráfica 2. Curva de calibración del Opacímetro



5.1.3 Medidor de flujo. En la gráfica 3 y en la tabla 12 se observa la desviación o % de error de la velocidad medida por el tubo Pitot respecto a la velocidad medida por el termo-anemómetro.

Gráfica 3. Curva de Calibración del medidor de flujo

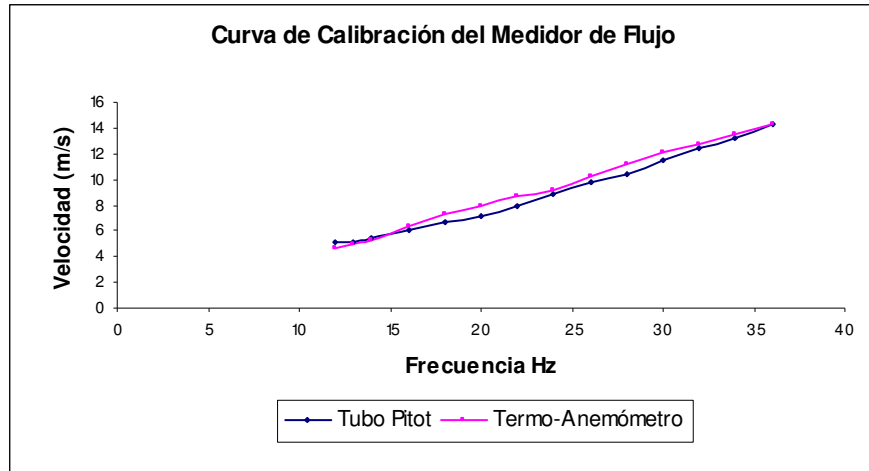


Tabla 12. Porcentaje de Error del medidor de flujo respecto al Termo-Anemómetro.

Frecuencia Hz	Velocidad Medidor Neumatico m/s	Velocidad Tubo Pitot m/s	Sesgo m/s	% E
12	4.68	5.098	0.418	± 8.93
13	4.95	5.1	0.15	± 3.03
14	5.22	5.46	0.24	± 4.60
16	6.3	6.09	-0.21	± 3.33
18	7.29	6.65	-0.64	± 8.78
20	7.92	7.14	-0.78	± 9.85
22	8.73	7.99	-0.74	± 8.48
24	9.18	8.93	-0.25	± 2.72

5.2 PARTE EXPERIMENTAL

5.2.1. Características del módulo.

COMPONENTE		RESOLUCION	RANGO	LINEALIDAD
Analizador de Gases	C ₃ H ₈ ppm	0.01	0 - 4000	0.7 %
	CO %V	0.01	0 - 15	0.3 %
	CO ₂ %V	0.01	0 - 20	1.3%
	O ₂ %V	0.1	0 - 25	0.1%
Opacidad (%)		0.01	0 - 100	2.2%
Velocidad (m/s)		0.01	0 - 16	5.1%

5.2.2 Tiempos de respuesta del módulo. Determinar los tiempos de respuesta de los sensores en el módulo sensor-trasmisor a una variación en la velocidad del motor, es importante para garantizar que los datos que se acumulan, procesan y almacenan correspondan a dicha variación.

Estos tiempos fueron establecidos por medio de gráficas que permiten ver que tan rápida es la respuesta de las emisiones a una variación de la velocidad del motor.

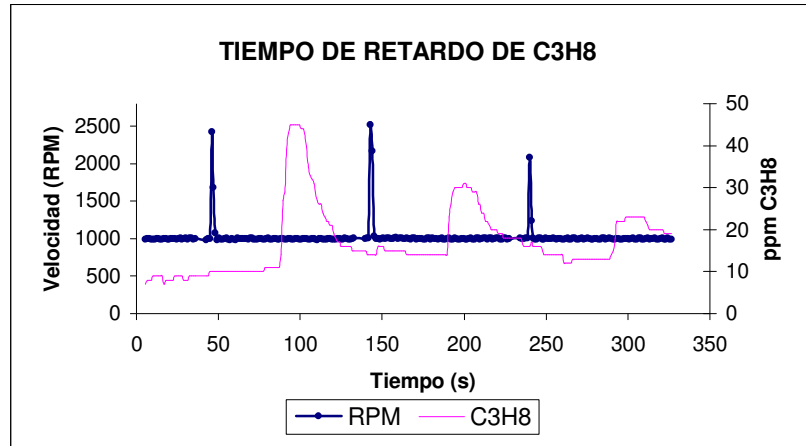
5.2.2.1 Analizador de Gases

Hidrocarburos base Propano

Tiempo de retardo promedio respecto a la aceleración: 54.566 s.

Tiempo de caída promedio del nivel de concentración: 24.474 s. Ver gráfica 3

Gráfica 4. Tiempo de retardo en la determinación de Propano

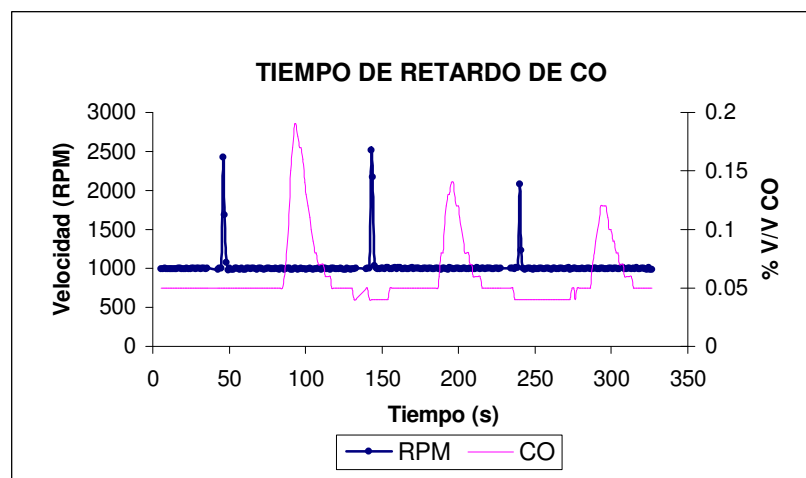


Monóxido de Carbono

El tiempo de retardo promedio del monóxido de carbono es de 50.85 s.

Tiempo de caída promedio del nivel de concentración: 17.256 s. Ver gráfica 4

Gráfica 5. Tiempo de Retardo en la determinación de Monóxido de Carbono

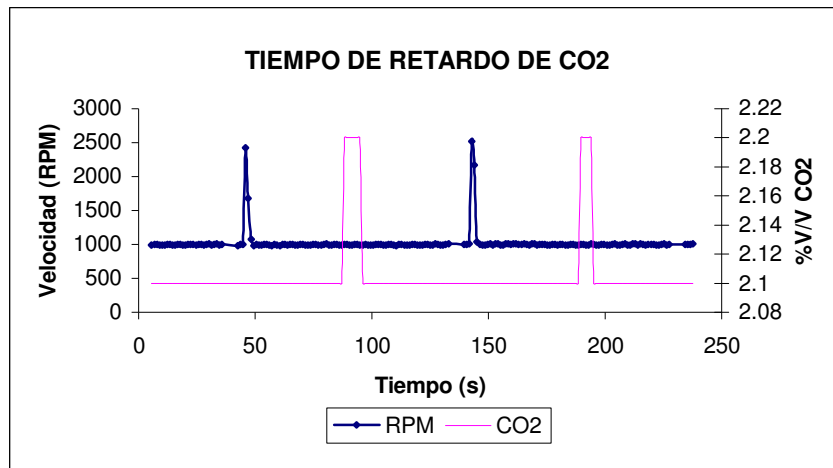


Dióxido de Carbono

El tiempo de retardo promedio del dióxido de carbono es de 44.834 s.

Tiempo de caída promedio del nivel de concentración: 6.319 s. Ver gráfica 5

Gráfica 6. Tiempo de Retardo en la determinación del dióxido de carbono

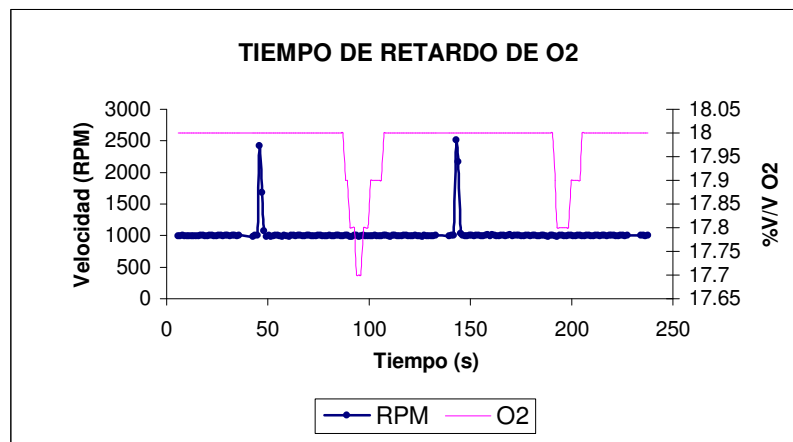


Oxígeno

El tiempo de retardo promedio del oxígeno es de 49.038 s.

Tiempo de caída promedio del nivel de concentración: 12.812 s. Ver gráfica 6

Gráfica 7. Tiempo de Retardo en la determinación del oxígeno.

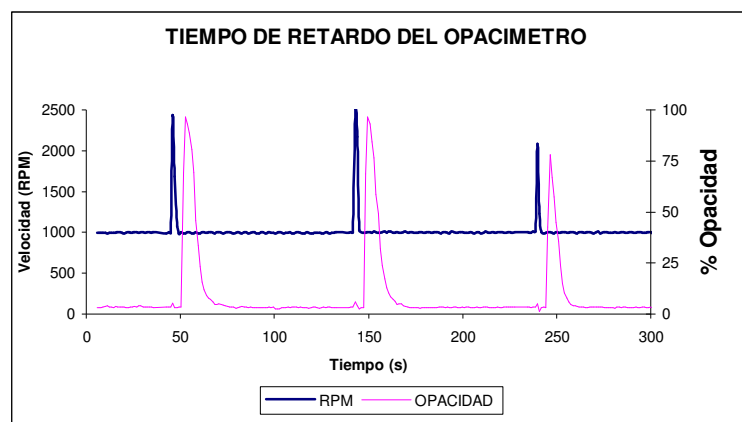


Opacidad

El tiempo de retardo promedio del opacímetro es de 6.685 s.

Tiempo de caída promedio del nivel de opacidad: 18.946 s. Ver gráfica 7

Gráfica 8. Tiempo de Retardo en la determinación de la opacidad.

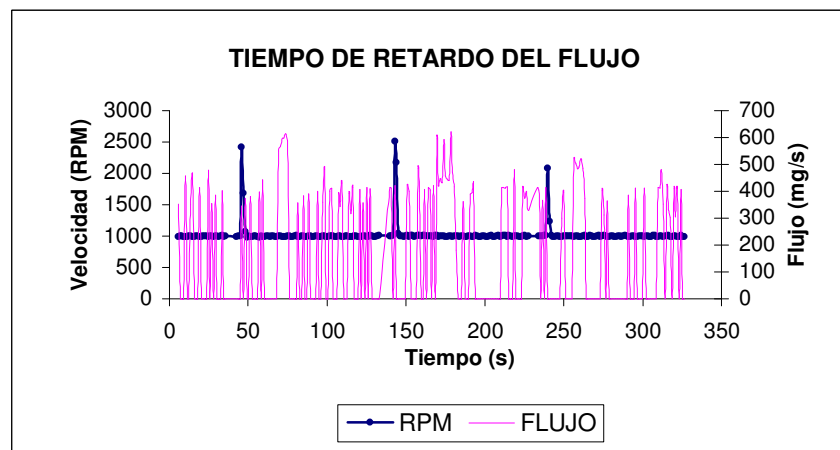


Medidor de Flujo

El tiempo de retardo promedio del sistema de flujo es de 26.002 s.

Tiempo de caída promedio del nivel de flujo: 9.752s. Ver gráfica 8

Gráfica 9. Tiempo de Retardo en la determinación del flujo



Los tiempos de retardo en la determinación de los niveles de CO, CO₂, C₃H₈, oxígeno, opacidad y flujo en el modulo sensor–transmisor se ven afectados por la línea de toma de muestra, las sondas, los filtros y otros accesorios. Por tanto, éstos son los que determinan el tiempo de respuesta general del sistema.

5.2.3 Emisiones producidas por el motor Diesel. Los siguientes resultados fueron obtenidos en el motor Diesel del laboratorio de Máquinas Térmicas Alternativas de la Escuela de Ingeniería Mecánica. El motor fue operado sin carga es decir en régimen estacionario.

Las tablas 13 a 36 muestran algunos de los análisis estadísticos obtenidos en cada una de las etapas de operación del módulo: ralentí y tres aceleraciones.

5.2.3.1 Prueba N° 1.

Tabla 13. Estadísticas de las emisiones en ralentí. Prueba N° 1.

	RPM	% OPACIDAD	ppm C ₃ H ₈	%V/V CO	%V/V CO ₂	%V/V O ₂	LAMBDA	A/F
Media	996,89	3,45	8,46	0,05	2,06	18	2,04	32,02
Desviacion	4,85	0,37	0,64	0	0,05	0	0,04	0,64
Moda	998,13	3,60	8,00	0,05	2,05	18	2,05	32,12
Máximo	1005,70	4,20	9,00	0,05	2,10	18	2,09	32,76
Mínimo	990,56	3,00	7,00	0,05	2,00	18	2,01	31,47

Tabla 14. Estadísticas de los flujos en ralentí. Prueba N° 1.

	T gas °C	T aceite °C	FLUJO TOTAL*	FLUJO C ₃ H ₈	FLUJO CO	FLUJO CO ₂	FLUJO O ₂	FLUJO MP
Media	38,9	63,85	195,33	0,001	0,05	3,53	21,14	0,89
Desviación	0,71	0,23	240,94	0,0014	0,06	4,35	26,08	1,36
Moda	39,39	63,83	310,69	0	0,08	5,70	33,61	0
Máximo	41,45	64,39	621,39	0,0036	0,16	11,40	67,22	3,61
Mínimo	37,33	63,26	0	0	0	0	0	0

* Flujo en mg/s

Tabla 15. Estadísticas de las emisiones primera aceleración. Prueba N° 1

	RPM	% OPACIDAD	ppm C ₃ H ₈	%V/V CO	%V/V CO ₂	%V/V O ₂	LAMBDA	A/F
Máximo	2421,07	96,50	45,00	0,19	2,20	18,00	2,02	31,60
Mínimo	981,12	2,40	9,00	0,04	2,10	17,70	1,80	28,28

Tabla 16. Estadísticas de los flujos primera aceleración. Prueba N° 1.

	T gas °C	T aceite °C	FLUJO TOTAL*	FLUJO C ₃ H ₈	FLUJO CO	FLUJO CO ₂	FLUJO O ₂	FLUJO MP
Máximo	39,8	64,7	606,71	0,018	0,41	10,72	66,84	134,73
Mínimo	35,95	63,08	0	0	0	0	0	0

*Flujo en mg/s

Tabla 17. Estadísticas de las emisiones segunda aceleración. Prueba N° 1

	RPM	% OPACIDAD	ppm C ₃ H ₈	%V/V CO	%V/V CO ₂	%V/V O ₂	LAMBDA	A/F
Máximo	2514,26	96,40	31,00	0,14	2,20	18,00	2,02	31,6
Mínimo	988,04	2,40	14,00	0,04	2,10	17,80	1,86	29,08

Tabla 18. Estadísticas de los flujos segunda aceleración. Prueba N° 1

	T gas °C	T aceite °C	FLUJO TOTAL	FLUJO C ₃ H ₈	FLUJO CO	FLUJO CO ₂	FLUJO O ₂	FLUJO MP
Máximo	40,47	64,73	621,11	0,0103	0,29	10,82	67,47	289,27
Mínimo	37,05	63,63	0	0	0	0	0	0

*Flujo en mg/s

Tabla 19. Estadística de las emisiones tercera aceleración. Prueba N° 1

	RPM	% OPACIDAD	ppm C ₃ H ₈	%V/V CO	%V/V CO ₂	%V/V O ₂	LAMBDA	A/F
Máximo	2080,79	78,00	23,00	0,12	2,10	18,10	2,10	32,89
Mínimo	986,52	1,20	12,00	0,04	2,00	18,00	1,95	30,56

Tabla 20. Estadística de los flujos tercera aceleración. Prueba N° 1

	T gas °C	T aceite °C	FLUJO TOTAL	FLUJO C ₃ H ₈	FLUJO CO	FLUJO CO ₂	FLUJO O ₂	FLUJO MP
Máximo	40,07	64,54	620,75	0,0084	0,26	8,71	56,98	75,67
Mínimo	36,56	63,51	0	0	0	0	0	0

*Flujo en mg/s

5.2.3.2 Prueba No. 2

Tabla 21. Estadísticas de las emisiones en ralentí. Prueba N° 2.

	RPM	% OPACIDAD	ppm C ₃ H ₈	%V/V CO	%V/V CO ₂	%V/V O ₂	LAMBDA	A/F
Media	785,94	2,62	15,29	0,07	3,00	16,89	1,43	22,46
Desviación	6,86	0,72	1,15	0	0	0,03	0	0,04
Moda	786,03	2,70	16,00	0,08	3,00	16,85	1,43	22,39
Máximo	798,11	3,90	18,00	0,08	3,00	16,90	1,43	22,47
Mínimo	773,94	1,50	14,00	0,07	3,00	16,80	1,42	22,30

Tabla 22. Estadísticas de los flujos en ralentí. Prueba N° 2.

	T gas °C	T aceite °C	FLUJO TOTAL	FLUJO C ₃ H ₈	FLUJO CO	FLUJO CO ₂	FLUJO O ₂	FLUJO MP
Media	36,82	64,90	84,60	0,001	0,05	3,53	21,14	0,33
Desviación	0,67	0,62	186,64	0,0023	0,06	4,35	26,08	0,98
Moda	36,98	65,11	293,66	0	0,08	5,70	33,61	0
Máximo	38,4	66,19	587,31	0,0068	0,16	11,4	67,22	4,78
Mínimo	35,56	64,03	0	0	0	0	0	0

Tabla 23. Estadísticas de las emisiones primera aceleración. Prueba N°2.

	RPM	% OPACIDAD	ppm C ₃ H ₈	%V/V CO	%V/V CO ₂	%V/V O ₂	LAMBDA	A/F
Máximo	2327,58	67,70	46,00	0,18	3,10	17,30	1,61	25,16
Mínimo	777,05	0,90	14,00	0,07	2,60	16,80	1,35	21,18

Tabla 24. Estadísticas de los flujos primera aceleración. Prueba N°2.

	T gas °C	T aceite °C	FLUJO TOTAL	FLUJO C ₃ H ₈	FLUJO CO	FLUJO CO ₂	FLUJO O ₂	FLUJO MP
Máximo	40,2	66,65	621,23	0,0127	0,23	14,86	63,37	6,99
Mínimo	35,5	63,63	0	0	0	0	0	0

*Flujo en mg/s

Tabla 25. Estadísticas de las emisiones segunda aceleración. Prueba N°2

	RPM	% OPACIDAD	ppm C ₃ H ₈	%V/V CO	%V/V CO ₂	%V/V O ₂	LAMBDA	A/F
Máximo	2514,6	93,90	85,00	0,27	3,00	17,30	1,63	25,60
Mínimo	787,39	0,30	19,00	0,06	2,60	16,80	1,35	21,15

Tabla 26. Estadísticas de los flujos segunda aceleración. Prueba N°2

	T gas °C	T aceite °C	FLUJO TOTAL	FLUJO C ₃ H ₈	FLUJO CO	FLUJO CO ₂	FLUJO O ₂	FLUJO MP
Máximo	39,43	66,96	555,3	0,0330	0,67	12,84	57,37	55,39
Mínimo	36,02	63,84	0	0	0	0	0	0

*Flujo en mg/s

Tabla 27. Estadística de las emisiones tercera aceleración. Prueba N° 2

	RPM	% OPACIDAD	ppm C ₃ H ₈	%V/V CO	%V/V CO ₂	%V/V O ₂	LAMBDA	A/F
Máximo	2769,57	90,30	51,00	0,19	2,70	17,50	1,70	26,64
Mínimo	828,46	1,70	18,00	0,06	2,40	17,10	1,51	23,64

Tabla 28. Estadística de los flujos tercera aceleración. Prueba N° 2

	T gas °C	T aceite °C	FLUJO TOTAL	FLUJO C ₃ H ₈	FLUJO CO	FLUJO CO ₂	FLUJO O ₂	FLUJO MP
Máximo	40,99	65,64	621,28	0,021	0,39	12,85	65,03	81,80
Mínimo	36,32	63,54	0	0	0	0	0	0

*Flujo en mg/s

5.2.3.3 Prueba No. 3**Tabla 29.** Estadísticas de las emisiones en ralentí. Prueba N° 3.

	RPM	% OPACIDAD	ppm C ₃ H ₈	%V/V CO	%V/V CO ₂	%V/V O ₂	LAMBDA	A/F
Media	987,99	4,32	25,57	0,06	2,19	17,90	1,92	30,12
Desviación	6,58	0,49	3,20	0	0,03	0,02	0,02	0,34
Moda	988,62	4,05	24,00	0,07	2,15	17,95	1,95	30,55
Máximo	999,95	5,10	29,00	0,07	2,20	18,00	1,99	31,19
Mínimo	977,29	3,00	19,00	0,06	2,10	17,90	1,91	29,90

Tabla 30. Estadísticas de los flujos en ralentí. Prueba N° 3.

	T gas °C	T aceite °C	FLUJO TOTAL	FLUJO C ₃ H ₈	FLUJO CO	FLUJO CO ₂	FLUJO O ₂	FLUJO MP
Media	33,97	65,69	192,99	0,004	0,05	3,53	21,14	1,85
Desviación	0,19	0,43	250,37	0,0054	0,06	4,35	26,08	2,46
Moda	33,96	65,87	309,97	0	0,08	5,70	33,61	0
Máximo	34,37	66,65	619,94	0,015	0,16	11,40	67,22	5,63
Mínimo	33,54	65,09	0	0	0	0	0	0

*Flujo en mg/s

Tabla 31. Estadísticas de las emisiones primera aceleración. Prueba N°3.

	RPM	% OPACIDAD	ppm C ₃ H ₈	%V/V CO	%V/V CO ₂	%V/V O ₂	LAMBDA	A/F
Máximo	2514,6	93,90	85,00	0,27	2,50	18,10	2,20	32,00
Mínimo	978,78	3,30	18,00	0,05	2,10	17,00	1,93	30,17

Tabla 32. Estadísticas de los flujos primera aceleración. Prueba N°3.

	T gas °C	T aceite °C	FLUJO TOTAL	FLUJO C ₃ H ₈	FLUJO CO	FLUJO CO ₂	FLUJO O ₂	FLUJO MP
Máximo	36,99	68,08	620,42	0,0334	0,61	10,83	67,84	266,01
Mínimo	32,84	64,64	0	0	0	0	0	0

*Flujo en mg/s

Tabla 33. Estadísticas de las emisiones segunda aceleración. Prueba N°3

	RPM	% OPACIDAD	ppm C ₃ H ₈	%V/V CO	%V/V CO ₂	%V/V O ₂	LAMBDA	A/F
Máximo	2705,7	94,10	30,00	0,08	2,20	18,20	2,03	31,75
Mínimo	977,61	1,90	18,00	0,05	2,10	18,00	1,91	29,92

Tabla 34. Estadísticas de los flujos segunda aceleración. Prueba N°3

	T gas °C	T aceite °C	FLUJO TOTAL	FLUJO C ₃ H ₈	FLUJO CO	FLUJO CO ₂	FLUJO O ₂	FLUJO MP
Máximo	37,24	67,02	620,35	0,0129	0,17	10,83	68,24	337,78
Mínimo	33,76	64,21	0	0	0	0	0	0

*Flujo en mg/s

Tabla 35. Estadística de las emisiones tercera aceleración. Prueba N°3

	RPM	% OPACIDAD	ppm C ₃ H ₈	%V/V CO	%V/V CO ₂	%V/V O ₂	LAMBDA	A/F
Máximo	2540,35	85,70	29,00	0,09	2,20	18,20	2,03	31,75
Mínimo	980,13	1,80	20,00	0,05	2,10	18,00	1,90	29,81

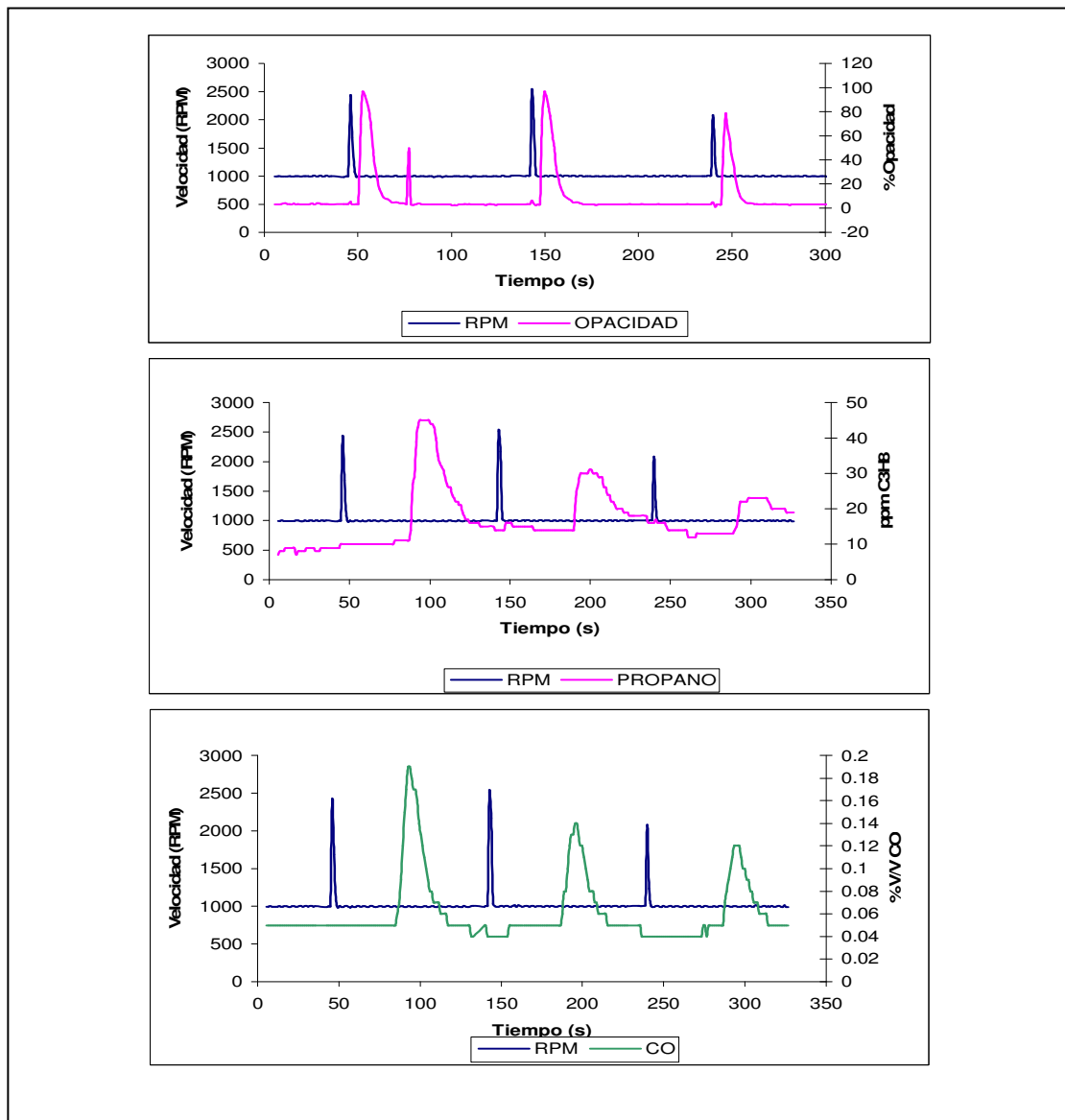
Tabla 36. Estadística de los flujos tercera aceleración. Prueba N°3

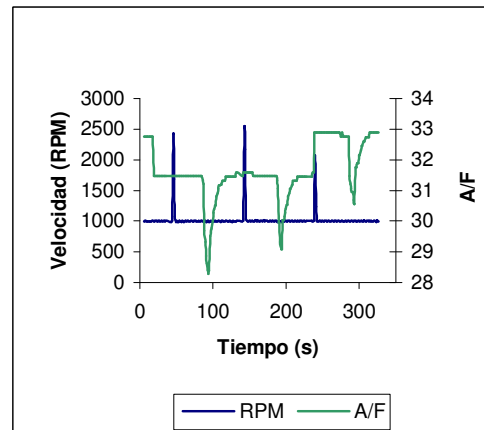
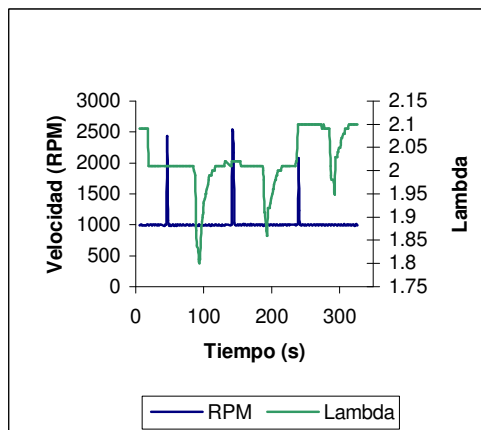
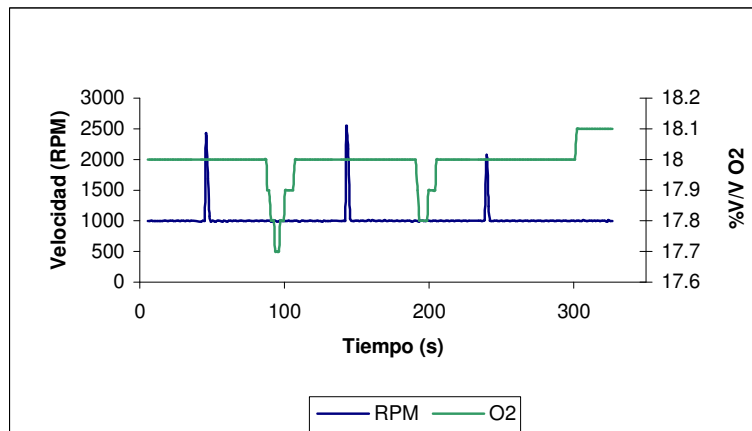
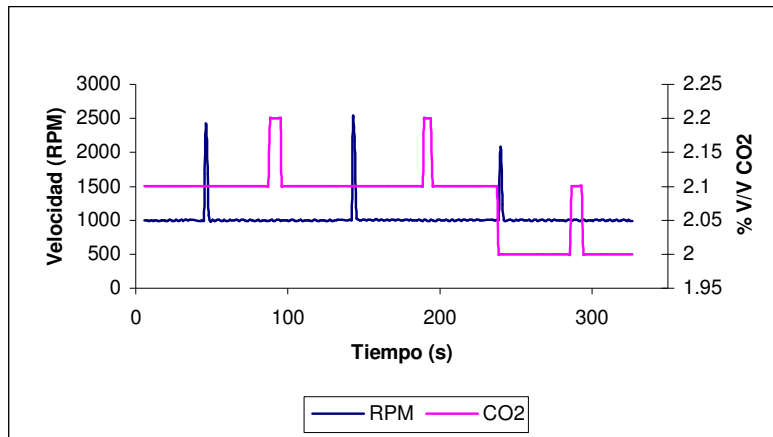
	T gas °C	T aceite °C	FLUJO TOTAL	FLUJO C ₃ H ₈	FLUJO CO	FLUJO CO ₂	FLUJO O ₂	FLUJO MP
Máximo	38,00	66,41	620,66	0,0121	0,26	10,83	68,27	239,59
Mínimo	34,31	64,15	0	0	0	0	0	0

*Flujo en mg/s

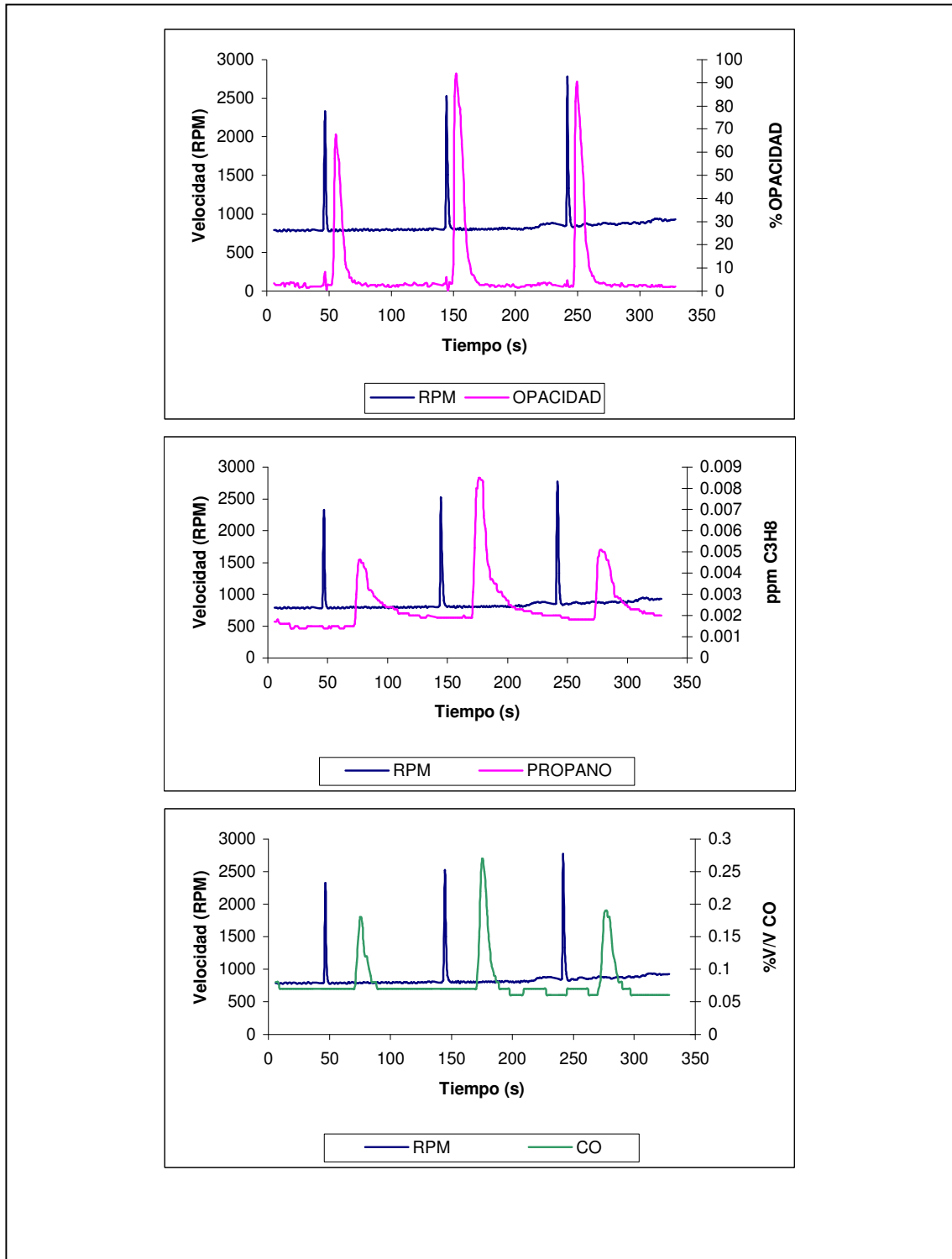
Las Gráficas 10, 11 y 12 muestran la variación de las emisiones, para las tres pruebas anteriores, cuando el motor es acelerado. Se ve claramente que la opacidad es la variable más sensible a los cambios de velocidad del motor. El monóxido aunque a un nivel más bajo también tiene sensibilidad a los cambios de la velocidad mientras que las emisiones de C_3H_8 , CO y CO_2 varían muy poco.

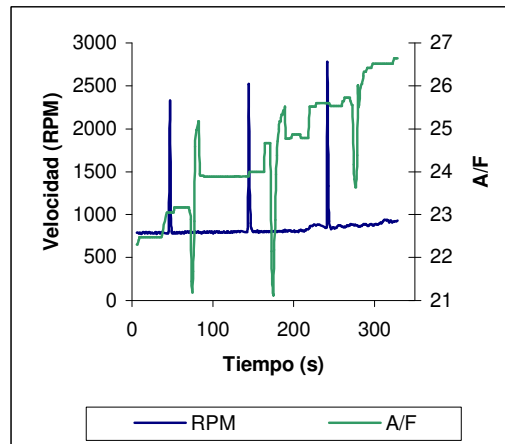
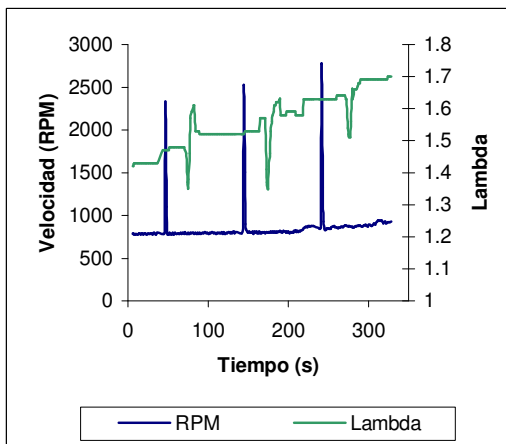
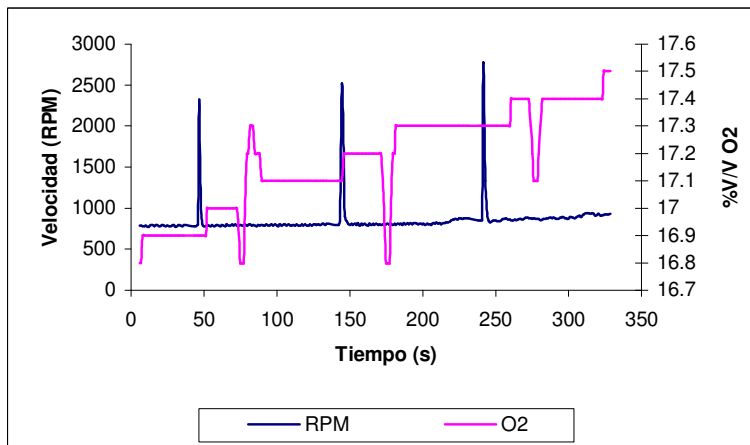
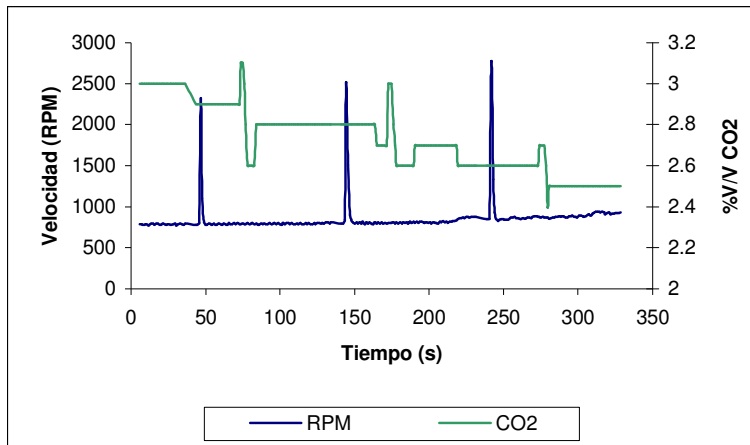
Gráfica 10. Variación de las emisiones respecto a la variación de la velocidad. Prueba N° 1



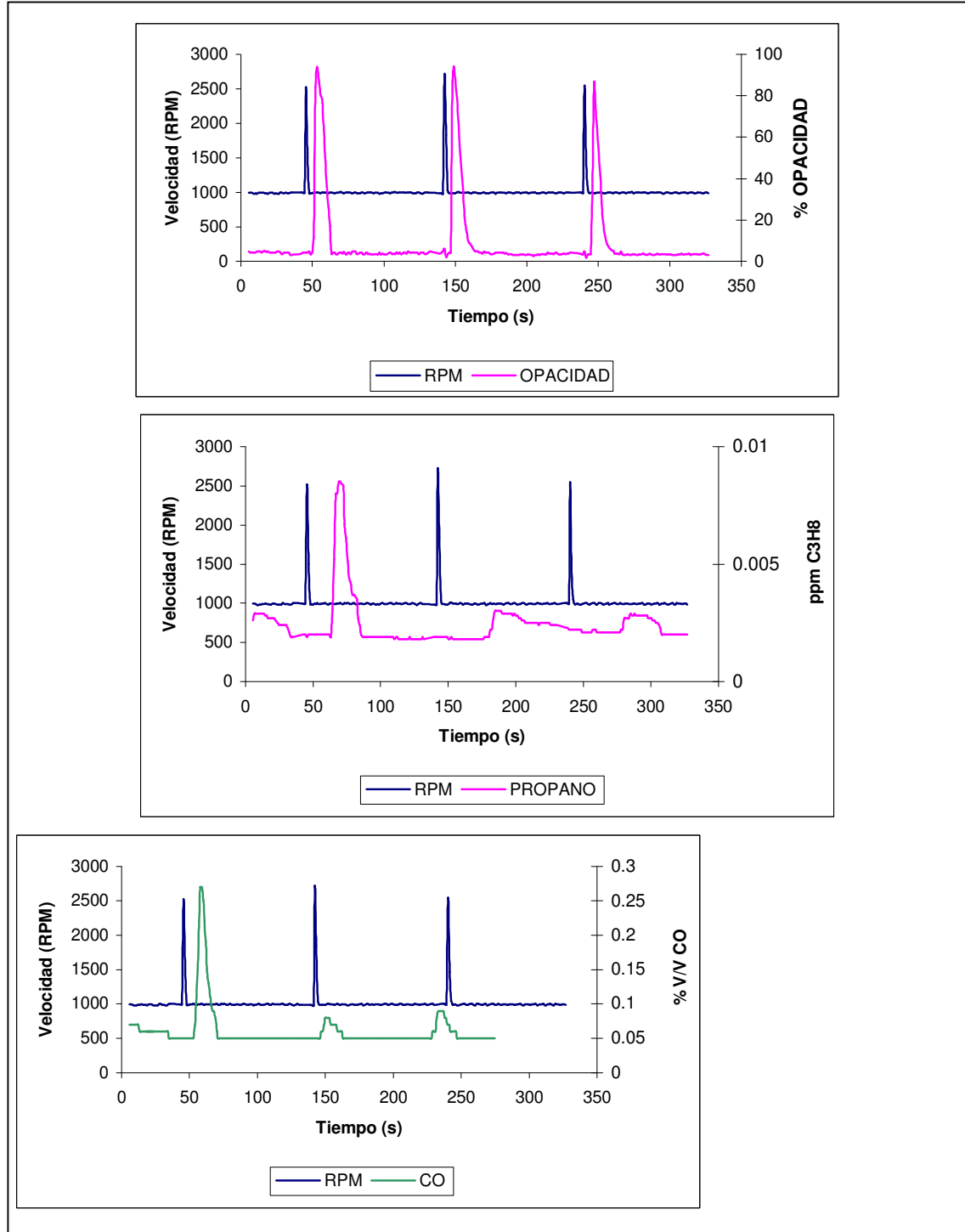


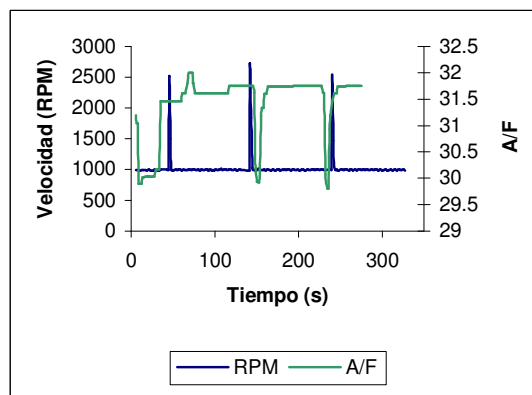
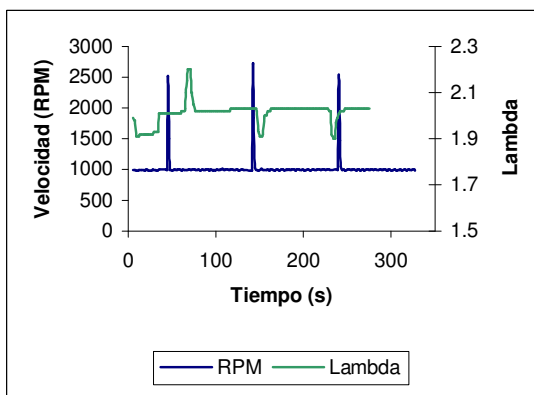
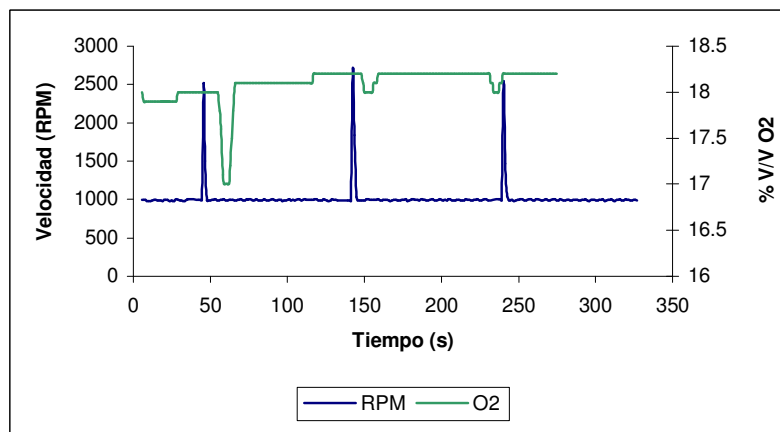
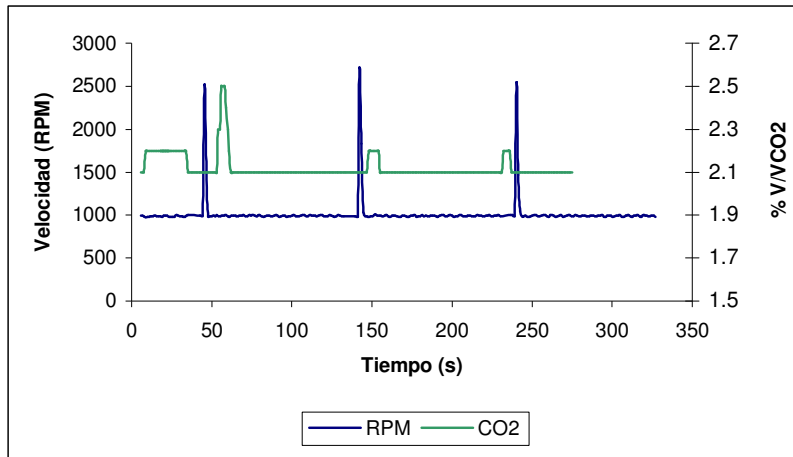
Grafica 11. Variación de las Emisiones respecto a la variación de la velocidad. Prueba N° 2





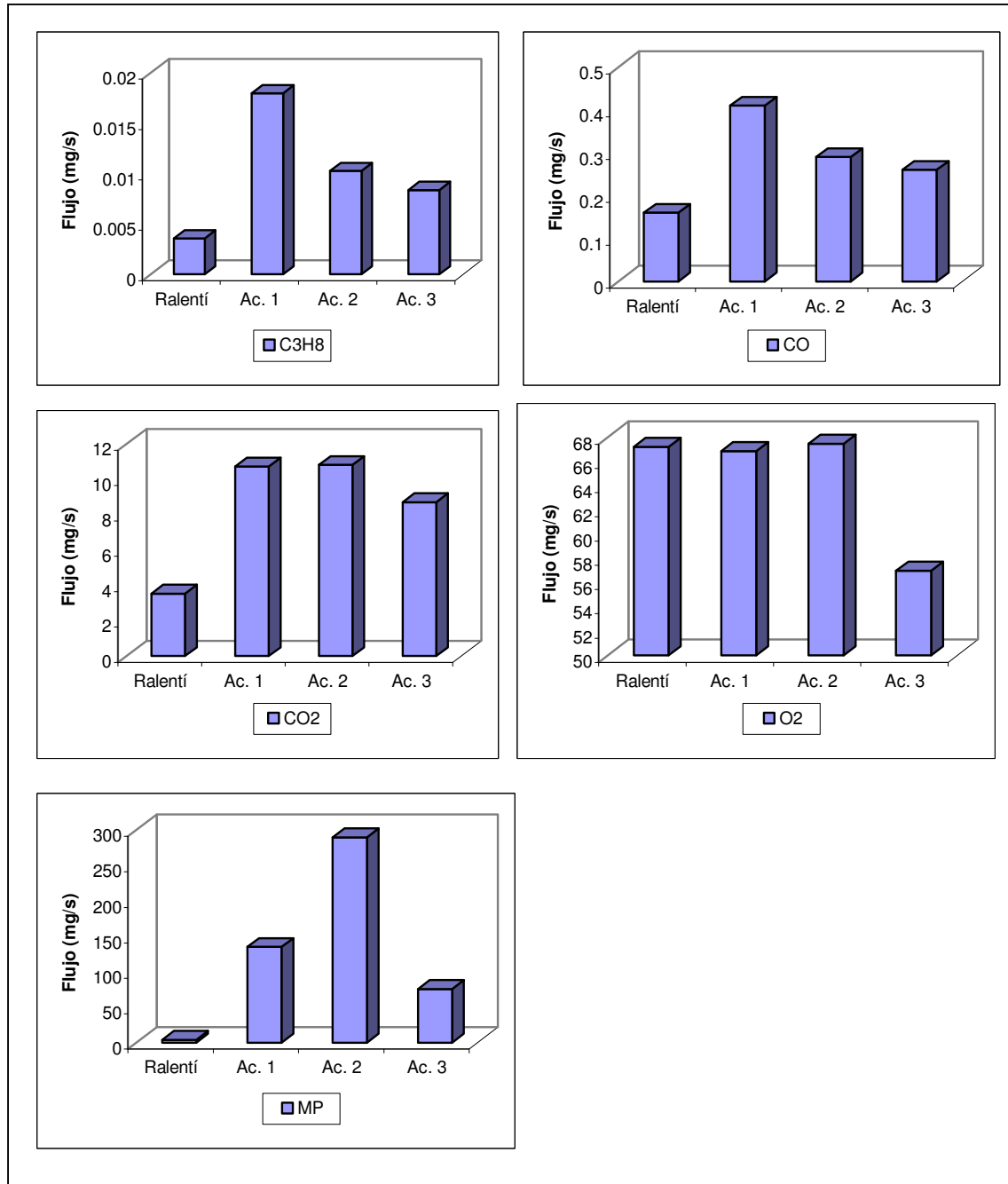
Grafica 12. Variación de las Emisiones respecto a la variación de la velocidad. Prueba N° 3



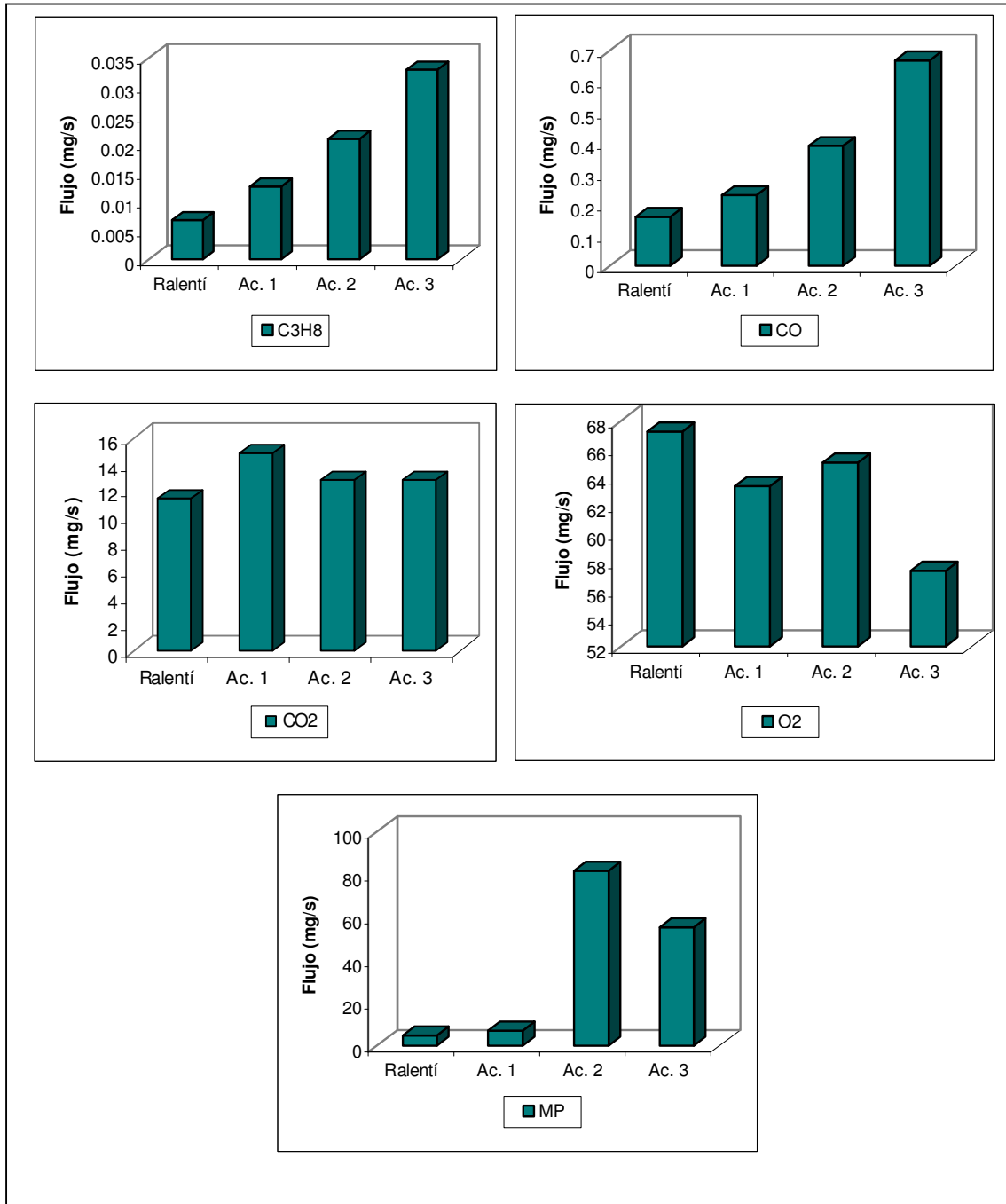


En las gráficas 13,14 y 15 se encuentran los flujos de emisión en mg/s de cada contaminante, durante las tres pruebas.

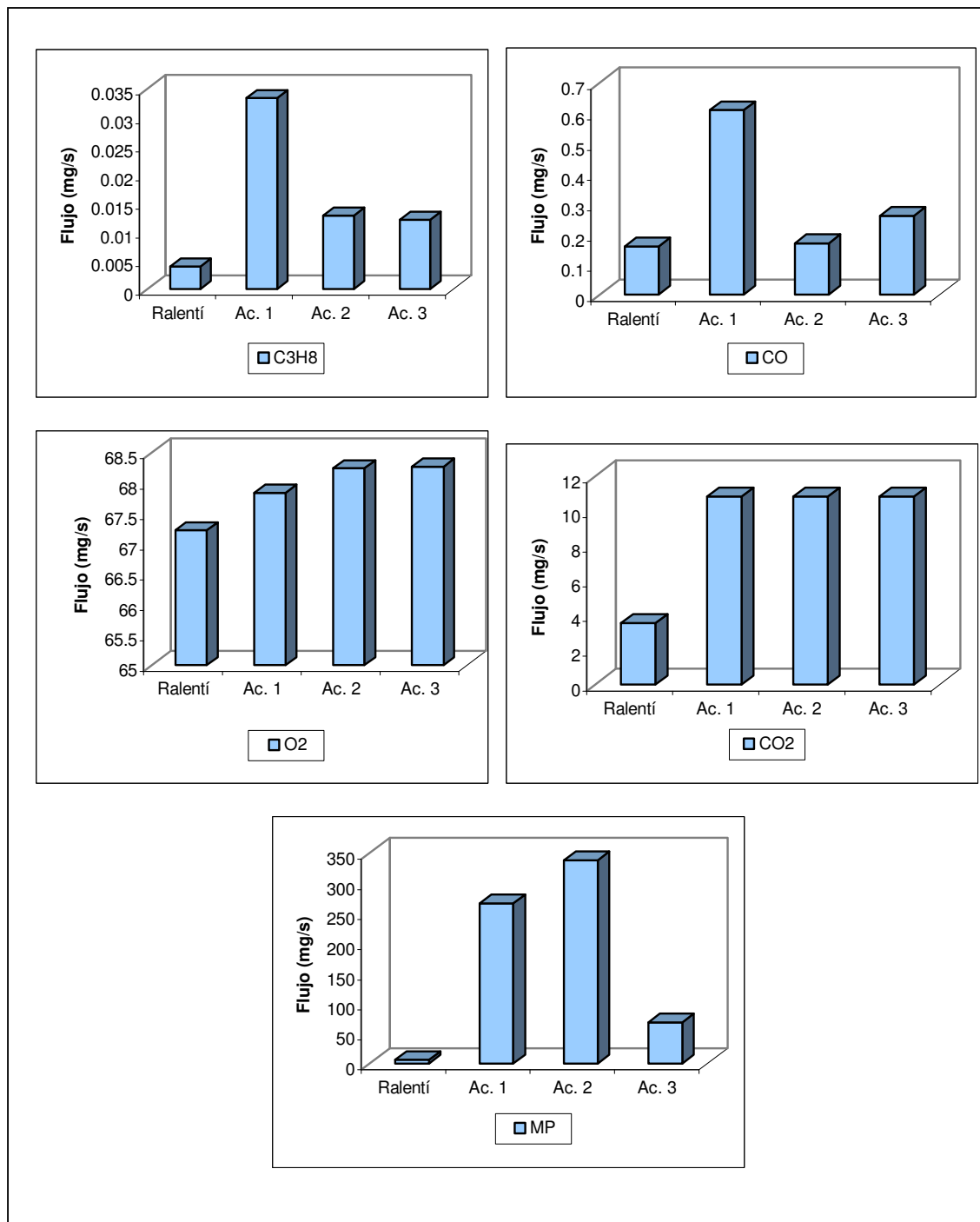
Gráfica 13. Flujos de Emisión. Prueba N°1



Gráfica 14. Flujos de Emisión. Prueba N^o2.



Gráfica 15. Flujos de Emisión. Prueba N°3.



6. CONCLUSIONES

- Es posible la adaptación de tecnologías para el desarrollo de equipos confiables para la medición de los factores de emisión de los motores Diesel en Colombia.
- El módulo sensor-trasmisor permite medir simultáneamente los niveles de concentración de monóxido de carbono, dióxido de carbono, propano, oxígeno; el nivel de opacidad y el flujo másico de gases generado por los motores diesel. Dando la posibilidad de hacer una estimación de los factores de emisiones en mg/s de cada contaminante.
- Las técnicas de infrarrojo no dispersivo y de principio electroquímico son apropiadas para determinar las concentraciones de monóxido de carbono, dióxido de carbono, propano y oxígeno respectivamente, en los gases de escape de un motor Diesel. Al igual que el método de extinción de luz y el método del tubo pitot para medir la opacidad y el flujo del gas.
- Para medir las emisiones, la opacidad, el flujo y otras variables implícitas del motor Diesel es necesario incluir sistemas de toma de muestra que garanticen el transporte de la muestra hacia los sensores; sistemas de filtración que retengan la mayor cantidad de material particulado y eviten el daño de los sensores; sistemas de acondicionamiento y adquisición de las señales que filtren, amplifiquen y permitan la comunicación con el computador y sistemas de calibración que permitan obtener medidas confiables.
- LabVIEW es un Software que permite desarrollar programas de manera grafica y sencilla que facilitan la visualización y control de diferentes funciones. Los programas desarrollados se encargan de recibir, procesar, acumular y almacenar

los datos enviados por el sistema de adquisición de señales, permitiendo visualizar las variables medidas por los sensores del módulo y las variables calculadas a partir de ellas de manera continua y automática. Además LabVIEW permitió una comunicación con el usuario de forma interactiva suministrándole la información necesaria, sobre las condiciones y el estado del módulo, y guiándolo durante la ejecución de la prueba. También, permitió obtener resultados en forma gráfica y hacer un análisis estadístico de los mismos.

- La precisión en la medida de las emisiones de monóxido de carbono, dióxido de carbono, oxígeno y propano cumple con las especificaciones de la Norma BAR 90, sin superar el 2% de desviación. Para concentraciones altas de alrededor de 1200 ppm de C_3H_8 , 12 % de CO_2 y 4% de CO la desviación es aproximadamente 0.6 % y para concentraciones bajas de alrededor de 304 ppm de C_3H_8 , 6.1% de CO_2 y 15 de O_2 la desviación es de aproximadamente del 1.4%. Lo que indica que el analizador es más preciso a altas concentraciones que a bajas. Los datos de opacidad medidos con el opacímetro de tipo muestreo tienen una desviación del 2% y las velocidades obtenidas con el tubo pitot un error del 5% respecto al termo-anemómetro.
- El tiempo de respuesta general del sistema, es afectado por los tiempos de retardo del analizador de gases, el opacímetro y el medidor de flujo; cuyos elementos constitutivos como sondas, líneas de muestra, entre otros, son la causa principal del atraso en la respuesta a la variación de la velocidad. El analizador de gases es el que tiene un tiempo de retardo mayor, 54 segundos en promedio, y por tanto, rige el tiempo de respuesta del módulo sensor-transmisor.
- El módulo sensor-transmisor permite medir en un rango de 0 a 4000 ppm de propano, 0 a 15 %V/V de monóxido de carbono, 0 a 20 %V/V de dióxido de carbono, 0 a 25 %V/V de oxígeno, de 0 hasta 100% de opacidad y velocidades de gas con diferencias de presión de 0 a 1 in de H_2O .

- Del análisis gráfico y estadístico de las tres pruebas se deduce que los hidrocarburos en base propano, el monóxido de carbono y el dióxido de carbono aumentaron en promedio, cuando la velocidad aumentó, 42.2 ppm , 0.17 %V/V y 2.48 % V/V, respectivamente. El nivel de oxígeno cuando el motor es acelerado disminuyó en promedio 17.85%V/V, esto es debido a que el motor Diesel opera con excesos de aire de hasta el 90% lo cual es confirmado por los valores de lambda mayores a 1.4. Por su parte, la opacidad es la variable que mejor responde a los cambios de velocidad del motor, alcanza valores hasta del 98 %.
- El módulo sensor-transmisor puede ser acoplado al equipo de diagnóstico general del motor, en el que se incluye otras técnicas, de tipo no invasivo, con el fin de poder implementar un programa de mantenimiento preventivo en los centros de diagnósticos automotrices, que permita conocer el estado real del motor, y por tanto, las posibles causas de generación de contaminantes, así como, una estimación del consumo de combustible y la carga contaminante generada por los vehículos movidos por motores Diesel.

7. RECOMENDACIONES

- Se sugiere llevar a cabo el procedimiento de calibración, con una botella de más baja concentración y una mejor precisión que la empleada en este proyecto, debido a los bajos niveles de concentración de emisiones, reportados por el módulo sensor-transmisor.
- Emplear un medidor de Humedad Relativa, con el fin de garantizar una medida más confiable de los flujos de las emisiones.
- Usar termistores en vez de termocuplas, puesto que éstos son más sensibles a los cambios de temperatura.
- Mejorar el sistema de filtración para garantizar que no ocurran problemas de sulfatación en el sensor de Oxígeno .
- Se sugiere la implementación de un muestreo mini-isocinético para determinar la cantidad de material particulado presente en las emisiones generadas por el motor Diesel y así, verificar la correlación dada por la SAE.
- Se recomienda el uso del módulo sensor-transmisor bajo condiciones dinámicas, es decir, motores operados bajo carga con un dinamómetro, ya que a estas condiciones los niveles de CO, CO₂ y C₃H₈ son mayores.
- Continuar el estudio de los parámetros estadísticos que ayudan a evaluar el sistema de medición y realizar un estudio analítico de las características dinámicas del sistema.

BIBLIOGRAFIA

- BENTLEY, Jhon P. Sistemas de Medición, Principios y Aplicaciones. Continental. 1993. P, 139-151.
- BOSCH, Robert. Diesel Engine Management. SAE Society of Automotive Engineers. Alemania:1999. P, 4-29.
- ESCALANTE, Edgardo J. Metodología y Técnicas SEIS-SIGMA. Limusa Noriega. México: 2003 . P, 57-65.
- HEYWOOD, John B. Internal Combustion Engine Fundamentals. Mc Graw Hill. New York:1988. P,68-69,148-151.
- JOHNSON, John. Diesel Particulate Emissions. SAE Society of Automotive Engineers. Estados Unidos: 2002.
- LabVIEW 7 Express. Measurements Manual. Nacional Instruments. Texas:2003. Secciones, 5-8.
- MENDOZA, Claudia Marcela y ORDOÑEZ, Pedro Vicente. Control de Emisiones y Capacitación Técnica Específica. Centro de Diagnóstico Automotor del Valle Ltda. Ingenieros. Cali: 1996.
- MEZA, Carlos Alberto. Análisis de la Eficiencia en la Combustión de Gas de Refinería en Hornos Industriales Tipo Cabina, mediante estudio de su comportamiento real. Bucaramanga: 2002.
- MORAGUES, Jaime A. Manual de Tecnologías de medición de concentración de gases y material particulado en chimeneas y atmósfera. Programa Desarrollo Institucional Ambiental.
- www.medioambiente.gov.ar/documento/prodia/contaminación/manual01.pdf

NORMA TÉCNICA COLOMBIANA, Calidad del aire. Evaluación de gases de Escape de fuentes móviles a gasolina. Método de ensayo en marcha mínima (ralentí) y velocidad crucero y especificaciones para los equipos empleados en esta evaluación. NTC 4983 de 2001.

NORMA TÉCNICA COLOMBIANA, Calidad del Aire. Procedimiento de medición y características de los equipos de Flujo parcial necesarios para evaluar las emisiones de humo generadas por las fuentes móviles accionadas a diesel. NTC (4231) primera actualización de 608/01.

SCHÄFER, Fred y BASSHUYSEN, Richard Van. Reducer Emissions and Fuel Consumption in Automobile Engines. Springer-Verlag Wien . New York:1993. P, 1-152.

SENSORS, inc. User Manual for LCS 2000. Sensors' new generation opacity transducer. USA: 1999.

SENSORS, inc. User Manual Generic AMB II Module. USA: 2000.

Society of Automotive Engineers. Instrumentation and techniques for exhaust gas emissions measurement. SAE J254:1991. P, 25.98.

The Engine Test Code Subcommittee of the General Technical Committee, General Motors. Automotive Engine Test Code for four cycle. 6ª ed. 1975.

VILLALOBOS, Gustavo. Medición de Flujo. Limusa. México: 1999. P, 1-120.

ANEXOS

ANEXOS A. ESPECIFICACIONES

BANCO SENSOR

Peso:		menos de 450 g.
Tamaño del paquete:		156 mm x 97 mm x 52 mm
Temperatura de almacenamiento		-50°C a 70°C
Temperatura de operación:		-12°C a 48°C
Tiempo de respuesta:		3.5 s
Requerimientos de Flujo		0.3 a 6.0 l/min
Requerimiento de Filtración		Partículas no más grandes a 5 µm
Presión de Operación		750 mbar - 1100 mbar (1000 mbar nominal)
Resolución	HC	1 ppm vol. (resolución estándar) 0.1 ppm vol. (resolución alta)
	CO	0.01% vol. (resolución estándar) 0.001 % vol. (resolución alta)
	CO ₂	0.1% vol. (resolución estándar) 0.01% vol. (resolución alta)
	O ₂	0.01% vol.
Rangos	HC	0 a 4000 ppm Propano
	CO	0 a 15%
	CO ₂	0 a 20%
	O ₂	0 a 25%
Requerimientos de energía:	Suministro de voltaje:	12 Vdc típico (rango: 10 V a 18V)
	Corriente:	2A típica. 3A max.

SENSOR DE OXIGENO

Marca:	Oxiplus A
Rangos medidos	0-100 % del oxígeno
Voltaje de la salida	7-13 mv
Conexión eléctrica	3 pines (tipo OOA101)
Tiempo de reacción	menor a 5 s
Exactitud	0 - 2 % del oxígeno: ± 0.1 % absoluto
	2.1 - 25 % del oxígeno: ±0,5 % relativo
	25.1 -100 % del oxígeno: ± 1.0 % relativo
Sensibilidad	menor a 0.1 % de O ₂ :
Temperatura de aplicación	0-50 °C
Temperatura de almacenamiento	5 - 15 °C
Peso	28 g aproximadamente

BOMBA DE DIAFRAGMA

PROPIEDAD	VALOR	UNIDAD
Aplicación	Monitoreo, muestreador de gases, equipos de protección personal, almacenamiento de aire, medida de humo	
Medio	Gas	
Voltaje	12V	
Abastecimiento de energía	DC	
Tipo de motor	Imán permanente	
Flujo de presión	0.078	SCFM
Presión máxima continua	4	PSI
Presión máxima provisional	17	PSI
Vacío máximo	16	in Hg
Temperatura ambiente, mínima	50	°F
Temperatura ambiente, máxima	122	°F
Consumo de energía	5	Watts
Peso	0.3	lbs
Modo de operación	Presión + Vacío	
Consumo de energía mA	420	mA
Flujo de vacío	0.078	SCFM

SENSOR DE PRESION

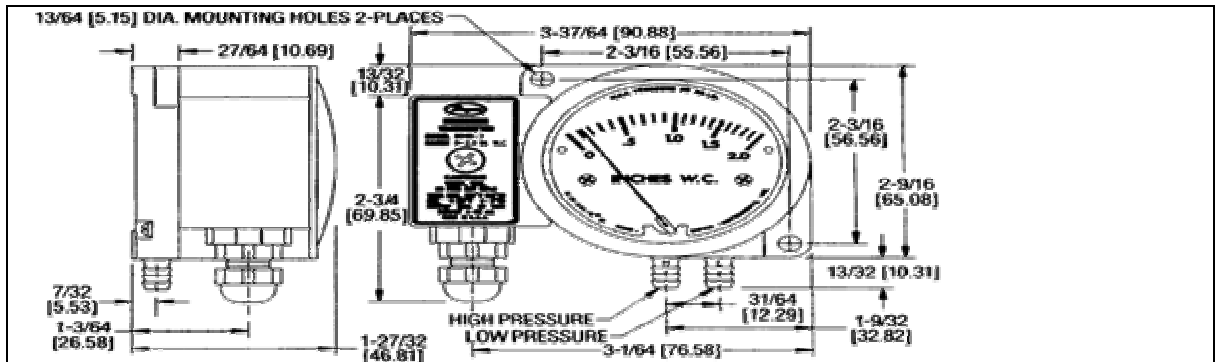
Cuerpo:	fibra de vidrio.
Diafragma:	poliuretano, fluorosilicona, teflón.
Terminales:	latón, oro-plateado.
Contactos:	bronce, fósforo con oro
Temperatura de operación	-40°C a +120°C
Presión de operación:	0.05 in H ₂ O a 550 inH ₂ O (20 psi).
Estallido:	25 psi.
Respuesta del MPL 502:	270 Hz
Resistencia:	500 miliomhnios máximo.
Peso:	10 gramos.

VÁLVULA SOLENIDE


Medio	Gases
Tamaño de Orificio	0.050" (1.27 mm) Cv = 0.035
Presión:	0-30 PSIG
Voltaje	12 VDC ± 10%
Temperatura de Operación:	0 a 70° C
Temperatura de Almacenamiento	40 a 70° C
Filtración Recomendada	40 micrones
Requerimiento de Potencia	1.0 watt

OPACIMETRO :

Marca:	SENSORS LCS: 2100
Dimensiones :	altura: 23.5cm, ancho: 38 cm, profundidad: 9cm
Peso:	4.5 kg.
Requerimiento de energía:	115 Vac + 10%
Condiciones de Operación:	Temperatura 5°C ... 40°C
Humedad	0 ... 95%
Temperatura de almacenamiento:	-32°C a 50°C
Longitud de trayectoria física:	174 mm
Longitud de trayectoria óptica:	364 mm
Diámetro interno de la celda de muestra:	20 mm
Colimación:	3º
Fuente de luz:	Led verde de 560 nm
Tiempo de respuesta:	1 milisegundo
Estabilidad:	+/- 1%
Temperatura del tubo:	75°C nominal
Precisión:	+/- 2%
Resolución	0.1%



Servicio:	Gases y aire.
Precisión del medidor:	+/- 5% a escala completa
Límites de presión máxima:	30 psig (207 kPa) a 50 psig (344 kPa)
Límites de temperatura de operación:	20 a 120°F (-6.7° a 49°C)
Conecciones:	Para tubería de 3/16" (4-5 mm) ID
Peso:	5.6 oz (159 g).
Precisión del transmisor:	+/- 2% a salida de span completa (incluye linealidad, histéresis y repetibilidad)
Requerimientos de energía:	10-35 VDC (2 cables).
Señal de salida	4 - 20 mA dc (limitado a 38 mA dc)
Consumo de corriente:	38 mA DC máximo
Orientación del montaje:	Diafragma en posición vertical

	Servicio	Aire
	Rango	0 a 7 MPS (0-1500 FPM)
	Exactitud	+/-3%
	Limites de Temperatura	0 a 200°F(-40 a 100°C)
	Resolución	1 FMP(0.1MPS)
	Tiempo de Respuesta	15 s
	Requerimiento de potencia	9 voltios
	Diámetro sonda	5/16"(8.13mm)
	Longitud Sonda	33"(83 cm)
	Peso	12oz(340gr)

ANEXO B. CALCULOS

Para los cálculos de peso molecular de la mezcla, fracciones másicas, relación Aire-Combustible y función lambda se tienen en cuenta las siguientes consideraciones:

- Los hidrocarburos no quemados tienen la misma relación carbono e hidrogeno que el combustible. Es decir el combustible Diesel se asume como propano, debido a que los hidrocarburos no quemados en los gases de escape se reportan en base a este hidrocarburo.
- La producción de óxidos de nitrógeno es despreciable por tanto el gas de escape está compuesto de monóxido de carbono, dióxido de carbono, propano, oxígeno, nitrógeno y agua.
- La humedad relativa durante la prueba permanece constante.
- El análisis de los gases se hace en base seca.

B.1 DENSIDAD DEL GAS

$$\rho = \frac{P \times PM_{Mezcla}}{R \times T} \left[\frac{kg}{m^3} \right] \quad (B.1)$$

Donde:

P es la presión de los gases de escape [Pa]

T es la temperatura de los gases en el punto de medición [K]

R es la constante de los gases ideales =8314.3 [Pa.m³/kmol.K]

PM es el peso molecular de la mezcla de gases [kg/kmol]

La presión de salida del gas de escape del motor Diesel evaluado varia entre 14.7 psi (101352.9 Pa) y 14.73 psi (101559.77 Pa). Para un mismo peso molecular de mezcla y temperatura de gases, el cambio en la densidad del gas respecto a un cambio en la presión es máximo del orden de $\pm 0.002 \text{ kg/m}^3$. Por esto la presión de los gases de escape se tomo como un promedio entre la máxima y mínima presión de salida del gas.

B.1.1 Peso Molecular de la Mezcla.

El peso molecular del gas de escape está dado por:

$$PM_{Mezcla} = X_{CO}PM_{CO} + X_{CO_2}PM_{CO_2} + X_{O_2}PM_{O_2} + X_{C_3H_8}PM_{C_3H_8} + X_{H_2O}PM_{H_2O} + X_{N_2}PM_{N_2} \quad (B.2)$$

Donde la fracción de agua corresponde al agua producto de la combustión y el agua que entra junto con el aire.

Para calcular las fracciones máxicas es necesario calcular la masa total de gas de escape dada por la ecuación (B.3)

$$m_{Gas} = (nC_{O_p} * PM_{CO}) + (nC_{O_2_p} * PM_{CO_2}) + (nO_{2_p} * PM_{O_2}) + (nC_{3H_8_p} * PM_{C_3H_8}) + (nN_{2_p} * PM_{N_2}) + (nH_2O_T * PM_{H_2O}) \quad (B.3)$$

Donde n es el número de moles que salen de cada componente.

Moles que salen de cada componente.

Como los datos de concentración reportados por el analizador son en base seca, se toma una base de cálculo de 100 moles de gas de escape seco, para hacer la siguiente equivalencia:

$$\%X = \left(\frac{\text{moles } X}{\text{moles gas seco}} \right) * 100 \quad (B.4)$$

$$\text{moles de } X = \% \text{ de } X \quad (B.5)$$

La ecuación(B.5) es válida para oxígeno, propano, monóxido de carbono y dióxido de carbono. Teniendo en cuenta que:

$$\%C_3H_8 = \frac{ppm C_3H_8}{10000} \quad (B.6)$$

Moles de Nitrógeno

Debido a que los constituyentes listados en el análisis de gas de escape no totalizan 100 %, el resto del gas se asume como N_2 .

$$\text{moles de } N_2 = 100 - [\text{moles } CO + \text{moles } CO_2 + \text{moles } O_2 + \text{moles } C_3H_8] \quad (B.7)$$

ó

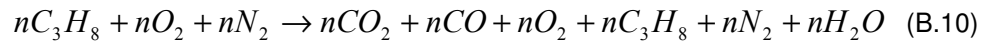
$$\text{moles de } N_2 = 100 - [\% CO + \% CO_2 + \% O_2 + \% C_3H_8] \quad (B.8)$$

Moles de agua totales

$$\text{Moles agua}_{\text{Totales}} = \text{Moles agua}_{\text{Producidas}} + \text{Moles agua}_{\text{Su min istadas}} \quad (B.9)$$

Moles de Agua producida.

La ecuación de la combustión incompleta del propano esta dada por:



Donde n es el número de moles.

Del balance de Hidrogeno y de la ecuación (B.10):

$$\text{Moles de Agua}_{\text{Producidas}} = \frac{(\text{Moles}_S C_3H_8 \times 8) - (\text{Moles}_P C_3H_8 \times 8)}{2} \quad (B.11)$$

Del balance de Carbono y de la ecuación (B.10) :

$$\text{moles } C_3H_8 \text{ Su min istradas} = \frac{(\%CO) + (\%CO_2) + 3 \times (\%C_3H_8)}{3} \quad (B.12)$$

Moles de Agua Suministrada

$$\text{Moles de Agua}_{\text{Suministradas}} = \frac{\%HR \times \text{Aire Seco Suministrado}}{100 \times PM_{H_2O}} \quad (\text{B.13})$$

$$\text{Aire seco suministrado} = \left(\frac{\text{moles } N_2 \times 100\%}{79\%} \right) \times 29 \quad (\text{B.14})$$

Fracciones Másicas de cada componente.

$$X_{CO} = \frac{(\%CO) \times PM_{CO}}{m_{Gas}} \quad (\text{B.15})$$

$$X_{O_2} = \frac{(\%O_2) \times PM_{O_2}}{m_{Gas}} \quad (\text{B.16})$$

$$X_{CO_2} = \frac{(\%CO_2) \times PM_{CO_2}}{m_{Gas}} \quad (\text{B.17})$$

$$X_{HC} = \frac{(\%C_3H_8) \times PM_{C_3H_8}}{m_{Gas}} \quad (\text{B.18})$$

$$X_{N_2} = \frac{(\text{moles } N_2) \times PM_{N_2}}{m_{Gas}} \quad (\text{B.19})$$

$$X_{H_2O} = \frac{(\text{moles } H_2O_{\text{TOTALES}}) \times PM_{H_2O}}{m_{Gas}} \quad (\text{B.20})$$

CORRELACIÓN DE MEDICIONES DE HUMO EN ESTADO ESTACIONARIO

Un equipo de trabajo de mediciones de humo diesel de SAE llevó a cabo una serie de ensayos para establecer correlaciones prácticas entre los principales métodos de medición de humos de estado estacionario utilizados por organizaciones de investigación y desarrollo. Se establecieron las correlaciones entre: los opacímetros, tipo flujo total; los medidores de mancha de Robert Bosch; Opacímetros tipo muestreo; y de contenido de hollín de los gases de escape.

Se encontró que únicamente se podía establecer correlaciones confiables entre estos métodos si las medidas de humo fuesen tomadas a la salida de la chimenea de escape.

La Figura 10 y 11 representa lo resultados resumidos del trabajo del grupo de tarea

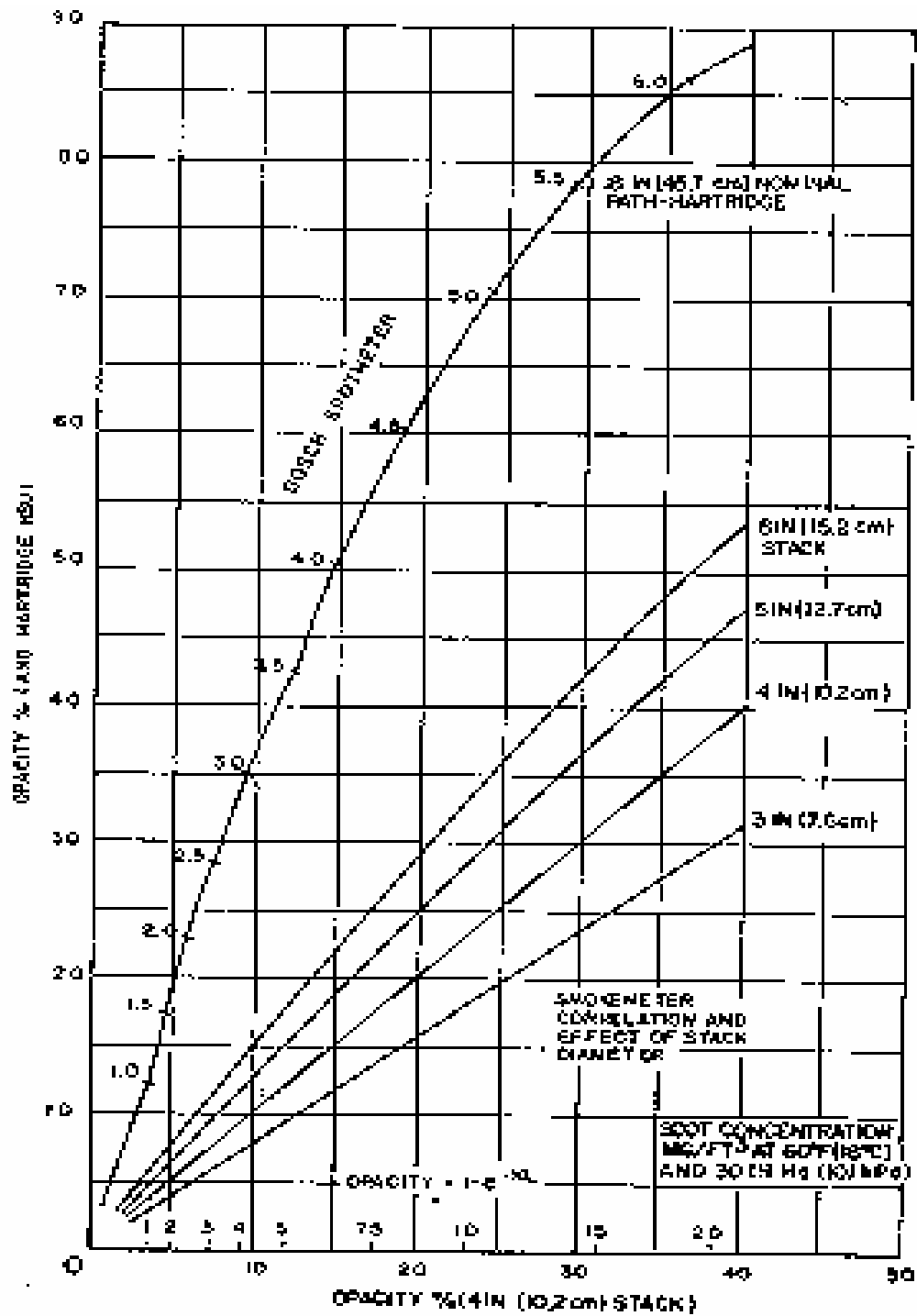


FIGURA 10 – RESULTADOS RESUMIDOS DE LA FUERZA DE TRABAJO DE MEDICION DE HUMO DIESEL DE SAE

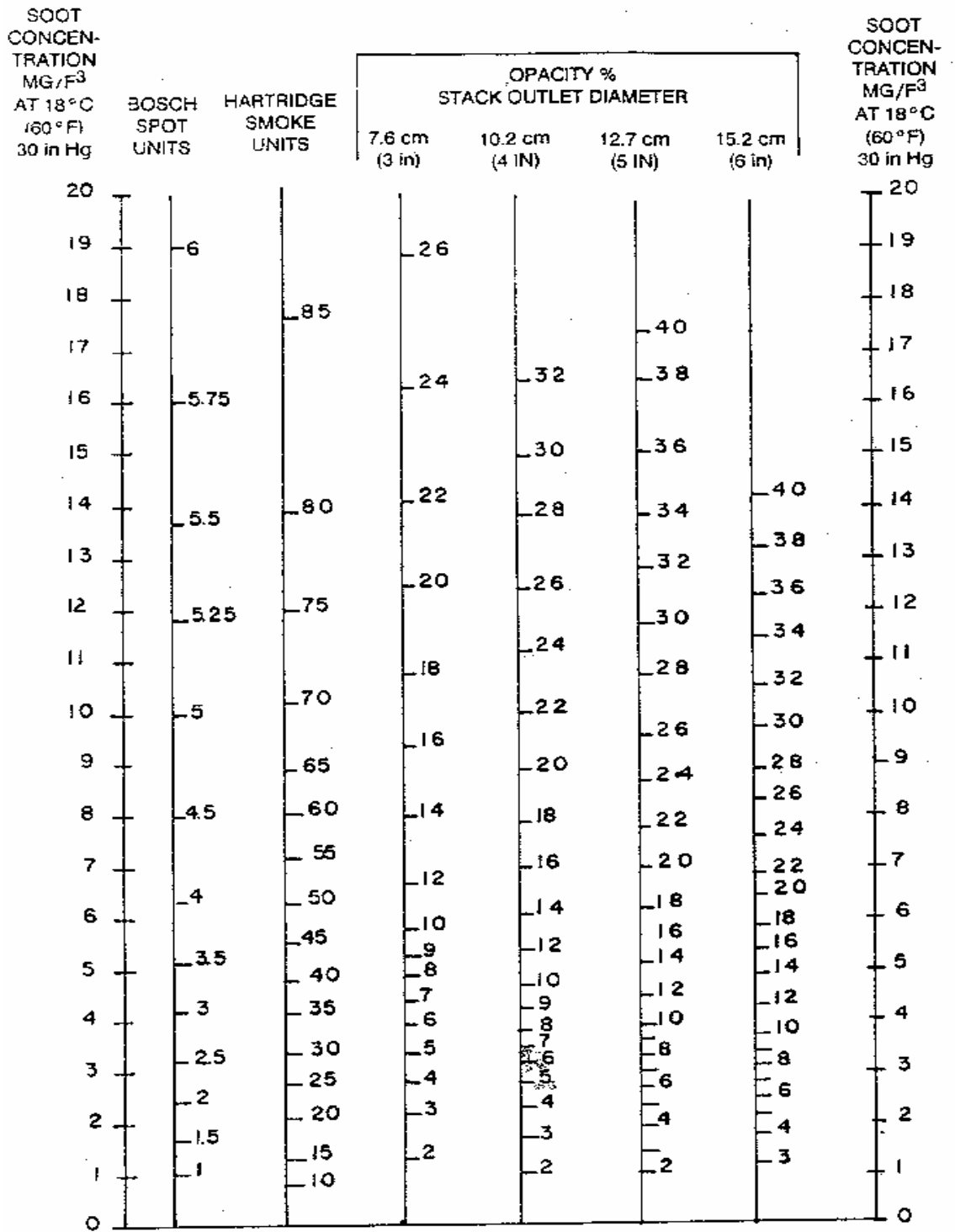


FIGURA 11 – CARTA DE ALINEACION. PREPARADA POR EL COMITÉ DE ESTANDARES DE EMISIONES PARA TRABAJO PESADO

ANEXO C. SOFTWARE

PROGRAMAR EN LABVIEW

Como se mencionó anteriormente para programar en labVIEW se trabaja con dos ventanas: Una en la que se implementa el panel frontal y otra que soporta el nivel de programación (diagrama de bloques o ventana de programación).

Para la creación del panel frontal se dispone de una librería o paleta de controles e indicadores de todo tipo (Ver figura C1). Los controles permiten que el usuario modifique su valor o estado mientras que los indicadores reciben los datos o condición de estado del diagrama de bloques. Estos controles e indicadores son elementos que con su forma y color representan cada componente, señal o función del proceso real en su respectivo estado.

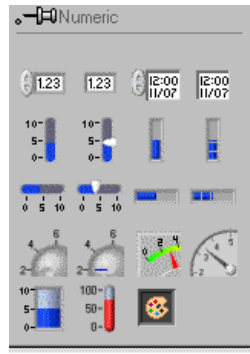
Cada opción en la paleta muestra una sub-paleta con las cuales se puede modificar o crear un nuevo panel. La figura C1 muestra algunos de los controles e indicadores utilizados en el software.

Cuando un control es “pegado” desde la librería en el panel frontal aparece un terminal en la ventana de programación representándola. El nivel de programación del VI consiste en conectar estos terminales a bloques funcionales hasta obtener un resultado que se desee visualizar. Los bloques funcionales son iconos con entradas y salidas que se conectan entre si mediante cables ficticios por donde fluyen los datos, constituyendo el nivel de programación del VI. En la figura C2 se muestran algunos de los bloques funcionales empleados.

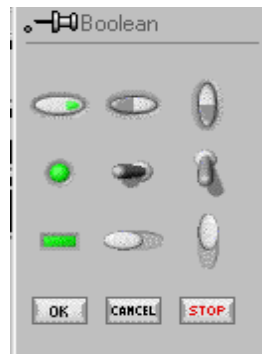
Figura C1. Paleta y subpaletas de controles e indicadores ubicadas en el panel frontal



a. Paleta



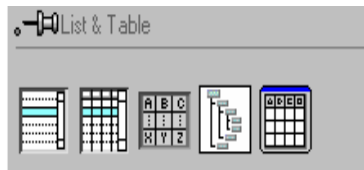
b. Subpaleta Numéricos



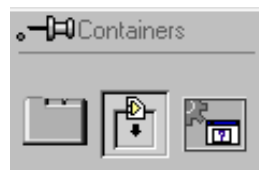
c. Subpaleta Boleanos



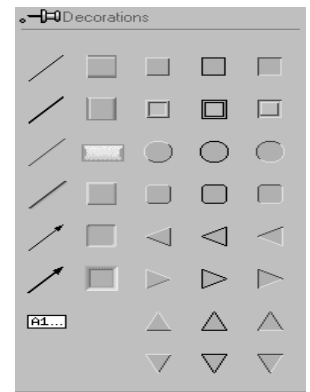
d. Subpaleta Gráficas



d. Subpaleta Listas y Tablas

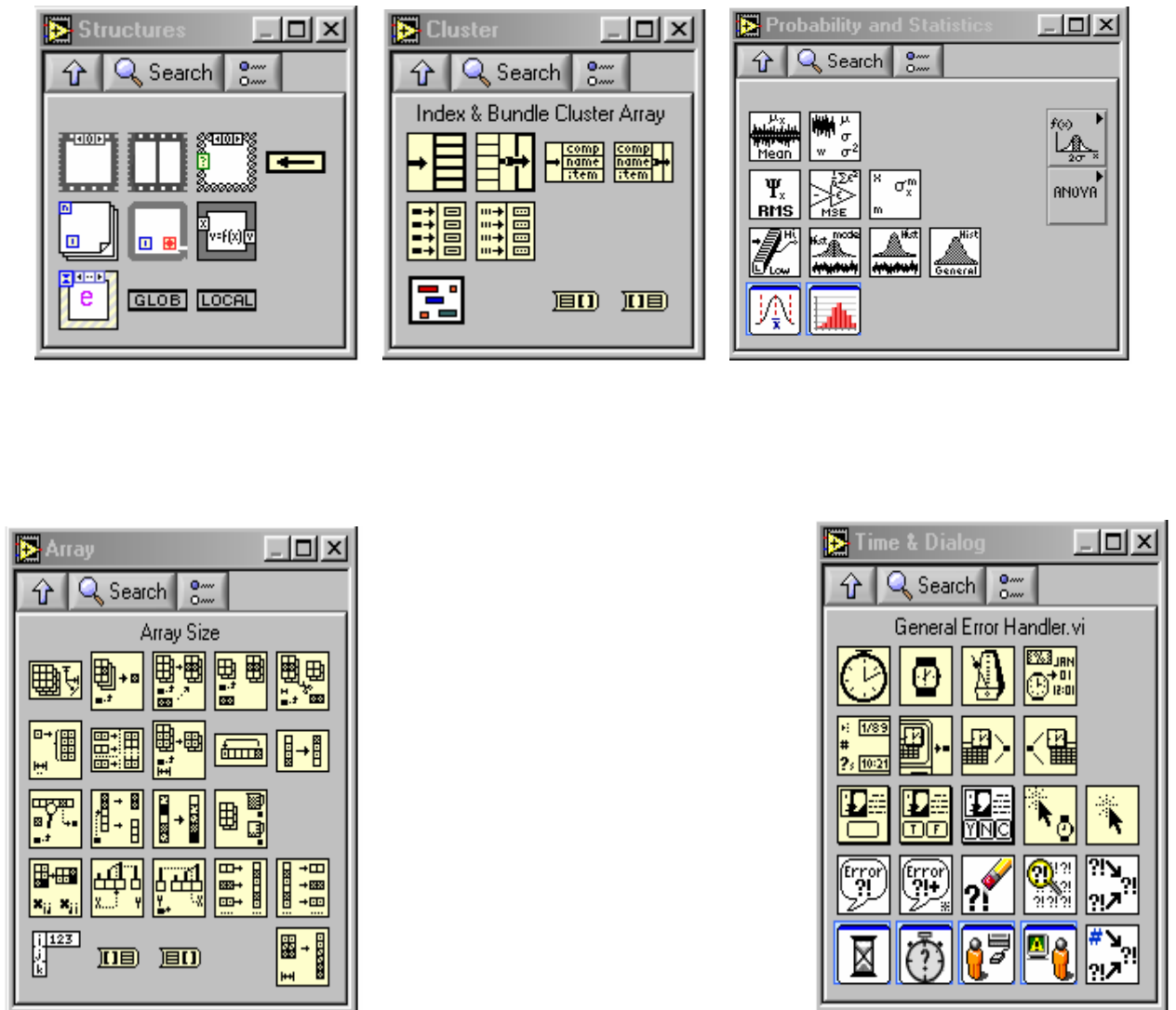


e. Subpaleta Contenedores



f. Subpaleta Decoraciones

Figura C2. Bloques funcionales ubicados en la ventana de programación.










INSTRUMENTOS VIRTUALES PROGRAMADOS

Para implementar el algoritmo se debe codificar cada una de las acciones que lo constituyen en instrumentos virtuales (subVI), encargados de ejecutarlas.

En cada subVI se hace un procesamiento de datos para producir la salida apropiada para el siguiente subVI, el cual tiene como entradas las salidas generadas por el o los subVIs anteriores.

La tabla C1 muestra los instrumentos virtuales principales programados para cumplir las funciones descritas en el algoritmo y en la figura C3 se muestra su jerarquía. Cabe aclarar que cada subvi tiene otros subvis además de los mostrados que ayudan a procesar los datos y ejecutar acciones.

Tabla C1.

INSTRUMENTO VIRTUAL	ICONO	FUNCION
Analizador.vi		Es el encargado de iniciar el programa del modulo y contiene tres instrumentos virtuales.
Fase Inicial.vi		Maneja el estado del modulo
Cero. vi		Hace cero las concentraciones de CO, CO ₂ y C ₃ H ₈
Calentamiento.vi		Controla el tiempo de calentamiento del analizador y del opacímetro
Estado.vi		Controla la operación de la bomba del analizador
Preparar Estado.vi		Revisa el estado y los requerimientos del analizador y opacímetro
Cal oxígeno.vi		Calibra el oxígeno

Fase Datos.vi		Procesamiento y Control de Datos
Variables.vi		Recibe y procesa los datos enviados por el sistema de adquisición
DAQ.vi		Procesa los datos enviados por la tarjeta de adquisición
Emisiones.vi		Procesa los datos enviados por el analizador
Opacidad.vi		Procesa los datos enviados por el opacímetro
Procesar.vi		Reúne y procesa los datos enviados por la tarjeta, analizador y opacímetro
Calculos.vi		Efectúa los cálculos con las variables medidas
Control Maestro vi		Maneja las operaciones de calibración, en prueba o salir del programa
Ejecutar.vi		Controla la ejecución de las pruebas y de la calibración
Calibrar.vi		Realiza la calibración con botellas
InicCal.vi		Inicia el proceso de calibración
DatosCal.vi		Solicita los datos de concentración de la botella
FinCal.vi		Finaliza la etapa de calibración
Crono.vi		Controla el tiempo de la Calibración
Prueba.vi		Controla el proceso de iniciar prueba

Archivo.vi		Guarda toda la prueba en archivos de texto.
Etapas .vi		Controla las etapas de ralenti y aceleración
Acumular.vi		Acumula los datos durante las etapas de ralenti y aceleración
Guardar.vi		Guarda los datos que se van recibiendo en cada etapa
Avisar.vi		Avisa en que momento se están acumulando y guardando los datos
Estadísticas.vi		Hace tratamiento estadístico a los datos acumulados
Visualizar.vi		Visualiza los datos durante la prueba
Buildgraph.vi		Acumula los datos graficados
Graficar.vi		Grafica las variables medidas y calculadas
Interfaz.vi		Maneja la interfaz del programa
Controlprueba.vi		Muestra el Control de los estados de operación
Estados.vi		Visualiza el estado actual del proceso
Control operación.vi		Maneja las opciones de cero y calibración de oxígeno
FaseFinal.vi		Termina el programa
Estado fisico.vi		Apaga la bomba del analizador

Figura C3. Jerarquía de SubVIs.

