



# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

## AUTOMATIZACIÓN DE UN DINAMÓMETRO DE CHASIS

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

INGENIERO

ELÉCTRICO ELECTRÓNICO

PRESENTA:

**JOSÉ ESTRADA ALARCÓN**



DIRECTOR DE TESIS:

M. en I. LAURO SANTIAGO CRUZ

Ciudad Universitaria, D.F.

2008



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

# ÍNDICE

PRÓLOGO.....	I
INTRODUCCIÓN.....	III
CAPÍTULO 1.    CONCEPTOS BÁSICOS.....	1
1.1.    Generalidades.....	1
1.1.1.  Par.....	2
1.1.2.  Potencia.....	3
1.2.    Medición del Par y la Potencia.....	6
1.2.1.  Dinamómetros.....	6
1.2.1.1.  Dinamómetros de Absorción.....	7
1.2.1.2.  Dinamómetros de Transmisión.....	16
1.3.    Medición de la fuerza.....	18
1.4.    Medición de la velocidad angular.....	22
1.4.1.  Tacómetros mecánicos.....	22
1.4.1.1.  Cuenta revoluciones y cronómetro.....	22
1.4.1.2.  Tacómetro de fuerza centrífuga.....	23
1.4.2.  Tacómetros eléctricos.....	23
1.4.2.1.  Tacómetro de corrientes parásitas.....	24
1.4.2.2.  Tacómetros de corriente alterna.....	24
1.4.2.3.  Tacómetros de corriente directa.....	25

1.4.2.4.	Tacómetros eléctricos de captación de señal.....	26
1.5.	Instrumentos utilizados en pruebas automotrices.....	31
1.5.1.	Dinamómetros de Motor o de banco.....	32
1.5.2.	Dinamómetros de Chasis.....	33
1.6.	Emisiones vehiculares y su medición.....	34
1.6.1.	Componentes principales de los gases de escape.....	35
1.6.2.	Pruebas de emisiones de gases de escape.....	37
1.6.2.1.	Ciclos de manejo.....	38
1.6.3.	Analizadores de los gases de escape.....	39
1.6.3.1.	Espectroscopía de absorción infrarroja no dispersiva.....	41
1.6.3.2.	Sensores Electroquímicos.....	42
1.6.4.	Sistemas de verificación y control de las pruebas de emisiones.....	44
1.6.4.1.	Sistemas de homologación.....	45
1.6.4.2.	Sistemas de Inspección y Mantenimiento .....	47
1.7.	Sistemas de Instrumentación.....	58
1.7.1.	Instrumentación Virtual.....	59
1.7.1.1.	Software para la instrumentación virtual.....	61
1.7.1.2.	Tarjetas de Adquisición de Datos.....	65
CAPÍTULO 2.	ANÁLISIS Y DISEÑO DEL SISTEMA.....	68
2.1.	Estado actual del sistema.....	68
2.2.	Propuesta de modernización.....	70
2.3.	Especificaciones del sistema.....	71

2.4.	Descripción general del sistema.....	74
2.5.	Hardware del sistema.....	74
2.5.1.	Módulo de control de carga aplicada a la PAU.....	74
2.5.2.	Módulo de sujeción de los rodillos del dinamómetro.....	80
2.5.3.	Módulo de medición de medición del par .....	82
2.5.4.	Módulo de adquisición de la señal de velocidad .....	89
2.5.5.	Analizador de gases.....	90
2.6.	Software.....	92
2.6.1.	Estructura del programa principal.....	92
2.6.2.	Subrutina Presentación.....	94
2.6.3.	Subrutina Menú.....	94
2.6.4.	Subrutina Datos de prueba.....	95
2.6.5.	Subrutina Dinamómetro.....	97
2.6.6.	Subrutina Adquisición de datos.....	99
2.6.7.	Subrutina Análisis de Gases.....	101
2.6.7.1.	Prueba estática de medición de emisiones.....	103
2.6.7.2.	Prueba dinámica de medición de emisiones.....	105
2.6.8.	Generación de reportes.....	109

CAPÍTULO 3.	CONSTRUCCIÓN Y PRUEBAS.....	110
3.1.	Armado del prototipo.....	110
3.2.	Pruebas modulares.....	114
3.2.1.	Hardware.....	114
3.2.1.1.	Módulo de control de carga aplicada a la PAU.....	114
3.2.1.2.	Módulo de sujeción de los rodillos del dinamómetro.....	116
3.2.1.3.	Módulo de medición de medición del par .....	116
3.2.1.4.	Módulo de adquisición de la señal de velocidad .....	119
3.2.2.	Software.....	121
3.3.	Pruebas del sistema completo.....	124
CAPÍTULO 4.	RESULTADOS Y CONCLUSIONES.....	128
4.1.	Resultados.....	128
4.2.	Conclusiones.....	130
4.3.	Recomendaciones.....	131

## BIBLIOGRAFÍA

APÉNDICE A. FACTORES DE CORRECCIÓN EN MEDICIONES DE POTENCIA.

APÉNDICE B. RELACIÓN AIRE/COMBUSTIBLE

## PRÓLOGO

**L**os avances científicos y tecnológicos han cambiado radicalmente la vida cotidiana de las personas. En el campo en el que se han producido avances más espectaculares, y de más trascendencia, ha sido el de los transportes, siendo el gran protagonista el automóvil, debido al impacto social y económico que ha tenido.

No obstante, desde sus inicios como medio de transporte, se han manifestado impactos por el uso y abuso del automóvil, los cuales se han medido en términos de muertes por accidentes, destrucción del entorno para la construcción de carreteras, enfermedades relacionadas con la contaminación del aire, así como su participación en cambios climáticos que posiblemente conduzcan a resultados más dañinos y de efectos irreversibles para el entorno socioambiental.

A comienzos del siglo XXI, los fabricantes de automóviles se enfrentan a dos desafíos fundamentales: por un lado, aumentar la seguridad de los ocupantes para reducir así el número de víctimas de los accidentes de tráfico y por otro lado, aumentar la eficiencia de los motores para reducir el consumo de recursos, y en consecuencia la contaminación atmosférica, de la cual son uno de los principales causantes.

## PRÓLOGO

---

Cuando un vehículo sale de la fábrica, normalmente es acompañado de un certificado a través del cual el fabricante garantiza que sus emisiones de contaminantes atmosféricos no excederán ciertos límites, siempre y cuando el motor se encuentre en buen estado mecánico. Los límites garantizados dependen de la tecnología empleada para fabricar el motor del vehículo, y en ningún momento se pretende que este pueda cumplir con valores de emisiones más estrictos que los originales, y por el contrario, debe tenerse en cuenta que debido al deterioro normal por su uso, se hace necesario un adecuado mantenimiento del motor para poder seguir cumpliendo con los límites originales a lo largo de su vida útil.

Además de las mejoras técnicas que desarrollan los fabricantes, un aspecto muy importante en el que se debe poner especial atención por parte de los propietarios es el mantenimiento, tanto preventivo como correctivo.

Por tal razón, actualmente existen en el mercado de la industria automotriz diversas líneas de diagnóstico para automóviles, en las que se encuentran integrados diferentes equipos para la medición de los parámetros que determinan las prestaciones del automóvil, así como de algunos otros equipos que nos dan información del estado del vehículo.

Conociendo estas tendencias en el mercado, se desarrolló en conjunto con una empresa dedicada al diagnóstico automovilístico, la instrumentación requerida tanto en *hardware* como en *software*, para lograr integrar un sistema para medición de las características de los motores de los automóviles, así como de las emisiones de gases de escape. Dicho sistema está conformado por un dinamómetro de chasis y un analizador de cinco gases.

El sistema desarrollado tiene las siguientes características: controla la operación del dinamómetro y del analizador de gases desde una computadora personal; cuenta con interfaces gráficas para un fácil manejo por parte del operador; realiza la adquisición y el procesamiento de las señales provenientes de los dispositivos destinados a medir fuerza y velocidad, para poder calcular el par y potencia desarrollados por el vehículo en sus ruedas motrices, además genera y almacena los reportes correspondientes a cada una de las pruebas a las que es sometido el vehículo.

Actualmente se cuenta con el prototipo del sistema operando adecuadamente. El trabajo aquí presentado describe conceptos básicos sobre el equipo utilizado, los distintos módulos que lo componen y la integración del sistema.



# INTRODUCCIÓN

**L**a Coordinación de Instrumentación del Instituto de Ingeniería de la UNAM está adscrita a la subdirección de Electromecánica del mismo Instituto. Hasta fines de los años 70, la actual Coordinación de Instrumentación funcionaba como área de servicio y apoyo técnico a otras coordinaciones del Instituto, entre ellas Instrumentación Sísmica, Geotecnia, Hidráulica y Mecánica, Térmica y de Fluidos. Sin limitar el apoyo a otros grupos del Instituto, esta área se eleva a la categoría de coordinación a partir de la consecución y realización de una serie de proyectos donde la automatización y el control son los componentes principales.

La calidad de los resultados obtenidos en los proyectos realizados ha fomentado el patrocinio de diferentes dependencias universitarias, así como de organizaciones externas.

Conociendo lo anterior y como parte de su proceso de modernización, la empresa Control y Diagnóstico Automovilístico solicitó al Instituto de Ingeniería el desarrollo de una parte de una línea de diagnóstico para automóviles. Entre los equipos que conforman una línea de diagnóstico podemos citar: el alineador al paso, el frenómetro de rodillos, el

## INTRODUCCIÓN

---

alineador de luces, la unidad de evaluación de la suspensión, el dinamómetro de chasis, el analizador de gases, el opacímetro y otros más; sin embargo, en la solicitud del proyecto, sólo se contemplaron el dinamómetro de chasis y el analizador de gases.

A partir de dicha solicitud, en la Coordinación de instrumentación se generó una propuesta de solución al problema planteado y una vez aceptada ésta, se procedió a trabajar en su desarrollo.

El presente trabajo es el resultado del proyecto realizado y en el se describe la instrumentación necesaria para automatizar la operación del dinamómetro de chasis y el analizador de gases. El trabajo se compone de cuatro capítulos y está estructurado de la siguiente manera:

El capítulo 1 está dedicado a los fundamentos teóricos en los que se basa el desarrollo del sistema antes mencionado.

En el capítulo 2 se describe el estado actual del sistema, se plantea la problemática y se proporciona la propuesta de solución, así como la metodología empleada, también se hace la descripción de todos y cada uno de los distintos módulos que integran el sistema, así como su diseño en *hardware* y *software*.

En el capítulo 3 se presenta la implementación de los circuitos electrónicos empleados en la construcción del prototipo realizado, así como las pruebas a que fue sometido.

Dentro del capítulo 4 se muestran los resultados obtenidos en las pruebas realizadas y las conclusiones a las que se llegó una vez terminado el desarrollo del presente trabajo; también se hace mención de las mejoras o modificaciones que pudieran hacerse al sistema.

Por último se incluye una bibliografía en la que se listan las diferentes fuentes de información consultadas a lo largo del desarrollo del presente trabajo.

# CAPÍTULO 1

## CONCEPTOS BÁSICOS

**E**l presente capítulo tiene como finalidad conocer algunos conceptos básicos relacionados con los automóviles, en especial con las características y rendimiento del motor de combustión interna de éstos. Asimismo, se describen los métodos y equipos más comunes que se utilizan para realizar las mediciones de dichas características.

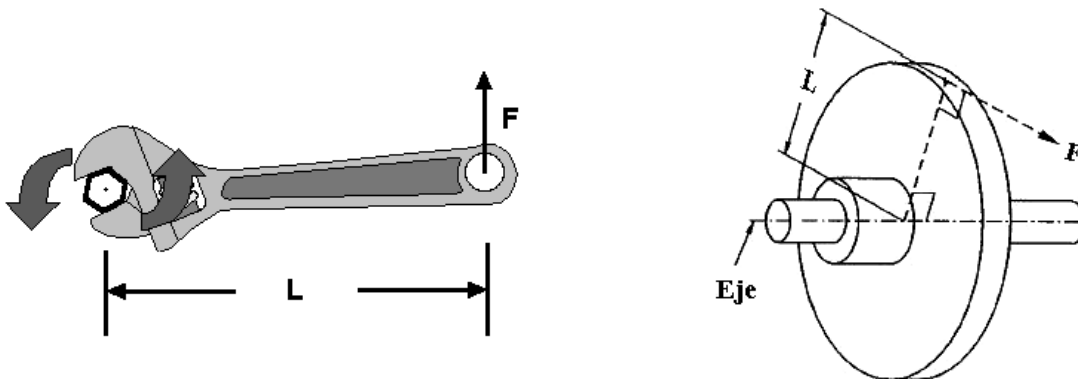
### 1.1. Generalidades

Con frecuencia en las fichas técnicas del motor de un automóvil vemos conceptos tales como potencia, par, cilindrada, entre otros, que son indicadores del funcionamiento del motor y que junto a otros factores determinan la capacidad de un motor para producir energía útil. Lo cierto es que para muchos de nosotros estos valores suelen confundirse y no alcanzamos a interpretar correctamente su significado. Sin embargo, es importante tener en cuenta que algunos de estos son sólo conceptos abstractos para describir como

las cosas interactúan para producir movimiento y como la energía es transferida del motor a las ruedas del vehículo.

### 1.1.1. Par

El par de torsión, o simplemente par, es la fuerza que producen los cuerpos en rotación. En términos más formales, el par ( $T$ ) es la fuerza ( $F$ ) aplicada en el extremo de una palanca multiplicada por la longitud ( $L$ ) de la misma, figura 1.1; esta longitud es medida desde el centro del eje que gira hasta el punto de la palanca en el que se aplica la fuerza ( $T = F \times L$ ),  $L$  representa el radio de un círculo a través del cual se movería la fuerza si recorriera una revolución completa.

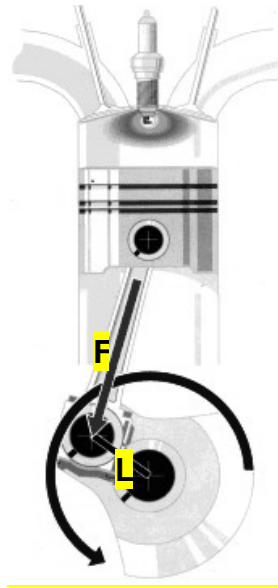


*Figura 1.1. Par producido en el eje de un cuerpo en rotación.*

Las unidades dimensionales del par son similares a las del trabajo: lb-ft y kgm. Técnicamente, el par de torsión se debería expresar en pie-libras para distinguirlo del trabajo; sin embargo, se le llama comúnmente libras-pie. En el sistema métrico, el par de torsión se mide en newton-metro (Nm).

El par generado en los motores de combustión interna se explica de la siguiente manera: dentro del motor de combustión interna de un vehículo, los gases de combustión generan una presión dentro de los cilindros, la cual empuja los pistones hacia abajo con una determinada fuerza, dicha fuerza es transferida al cigüeñal para hacerlo girar por medio

de la biela. Para la velocidad de rotación del motor a la cual la presión en el cilindro es máxima, se obtiene la mayor fuerza de giro o par en el cigüeñal, que es producto de la fuerza ( $F$ ), por la longitud ( $L$ ) del brazo del cigüeñal, ver figura 1.2.



*Figura 1.2. Par generado por un motor de combustión interna en el cigüeñal.*

En los motores de combustión interna el par motor viene determinado por el aporte de combustible, por lo que es interesante resaltar que el máximo aprovechamiento del combustible se consigue alrededor del régimen de par máximo. Un motor es más eficiente en el punto donde alcanza su par máximo, sin importar donde se encuentra este punto. Bajo este punto, los motores tienen tiempo suficiente para llenar los cilindros y sobre este punto no alcanzan a llenarlos completamente.

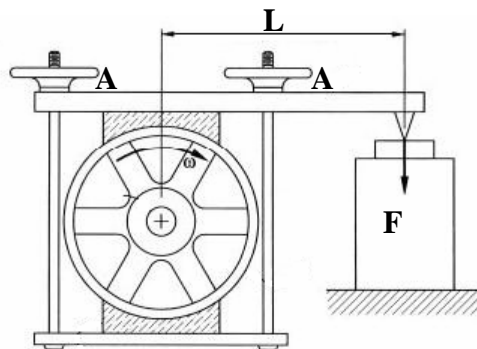
### **1.1.2. Potencia**

La potencia producida por un motor se considera comúnmente como la característica de operación más importante de éste. Nos indica la rapidez con que puede trabajar el motor y representa una medida de la capacidad del motor de producir trabajo en cierto período de tiempo.

La potencia ( $P$ ) se calcula al multiplicar el par del motor ( $T$ ) por la velocidad de giro de éste ( $\omega$ ),  $P = T \times \omega$ . La unidad más común de medición para la potencia es el caballo de fuerza [HP]. En el sistema métrico, la potencia de salida del motor se mide en kilowatts [kW].

Así, la potencia de un motor de un vehículo es la potencia disponible en el cigüeñal para hacer trabajo. Esta potencia también es conocida como potencia al freno, ya que se mide con algún tipo de freno o dinamómetro que aplica una carga sobre el cigüeñal, haciendo con ello trabajar al motor. Es por esta razón que la potencia de los motores de automóvil es usualmente referida en caballos de fuerza al freno (BHP, por sus siglas en inglés) aún cuando no se use siempre la palabra freno.

El término potencia al freno viene de que el primer dispositivo empleado para medir la potencia desarrollada por un motor fue el freno de Prony. Este tipo de freno, mostrado en la figura 1.3 está constituido por un gran tambor alrededor del cual se hallan sujetas unas zapatas regulables (A). Uno de los extremos del brazo está conectado al freno y el otro sobre una escala de medición de fuerza. La zapata es un dispositivo que puede ser apretado o aflojado de modo que de esta forma pueda ejercer un mayor o menor efecto de frenado del tambor. El tambor es girado por el motor y entonces, cuando se aprietan las zapatas, equivaldrá a someter el motor a una carga o esfuerzo mayor. A la vez hay un mayor esfuerzo sobre las zapatas y brazo del freno.



*Figura 1.3. Freno de Prony.*

El ensayo con el freno de Prony se realiza girando el motor (y tambor) a una velocidad uniforme y entonces se aprietan las zapatas contra el tambor. Cuando se opera así, aumenta la carga sobre el motor, al aumentar la carga del motor lo hace simultáneamente la fuerza medida en la escala. Para determinar la potencia máxima que puede desarrollar un motor a cualquier velocidad, se aumenta gradualmente la carga hasta que el motor trabaje al máximo. Si una vez aquí se aumenta aún la carga se producirá una disminución de la velocidad del motor. La carga máxima leída en la escala se utiliza entonces en la siguiente fórmula, que nos da la potencia desarrollada por el motor.

$$BHP = \frac{2pLNF}{33000} \quad (1.1)$$

donde:

L: Longitud del brazo (pies).

N: Velocidad del motor (RPM)

F: Fuerza (libras)

Actualmente no se usa el Freno de Prony porque presenta grandes dificultades para la disipación del calor y para mantener constante el par resistente.

Como ya se mencionó, la potencia real producida por un motor se llama potencia al freno y se mide con un dinamómetro en el cigüeñal. Los patrones para medir la potencia incluyen las clasificaciones de potencia bruta y neta. La potencia bruta es la potencia máxima que desarrolla un motor al funcionar sin accesorios, es decir se mide probando un motor básico. Esto es, un motor al cual se le ha eliminado todo, excepto los elementos incorporados que necesita para operar como son la bomba de agua, la bomba de combustible, la bomba de aceite, y los dispositivos incorporados de control de emisiones. El filtro de aire, el generador, el ventilador, el silenciador y otros accesorios son retirados.

La potencia neta es la potencia desarrollada por un motor totalmente equipado. Están instalados el filtro de aire, el silenciador, el alternador y todos los controles de emisiones.

Los caballos de fuerza netos es la potencia que se entrega a la transmisión. En el caso de un motor de seis cilindros, la diferencia entre los valores nominales brutos y netos de potencia es de aproximadamente 25 %.

Otra forma de definir potencia es la potencia de carretera. Es la potencia entregada a las ruedas motrices del vehículo y es medida en el dinamómetro de chasis. Los caballos de fuerza de carretera son mucho menos que los caballos de fuerza netos. Se pierde potencia por fricción en la transmisión y en el tren motor. También existe una pérdida de potencia para impulsar la bomba de la dirección, el compresor de aire acondicionado y de otros accesorios.

Existe una característica de los motores llamada potencia indicada. La potencia indicada es la realmente desarrollada en el interior del cilindro por el proceso de combustión. La base para esta potencia se calcula por el tamaño del motor, la velocidad de operación y la presión desarrollada en el cilindro.

En funcionamiento, parte de la potencia desarrollada por el motor es empleada en vencer los rozamientos en el interior del mismo. Por lo tanto, la potencia indicada (que es la desarrollada en el interior del motor) es siempre mayor que la potencia al freno (que es la que suministra el motor a la salida). Las pérdidas de potencia por rozamiento pueden ser pues, determinadas restando la potencia al freno de la potencia indicada.

## **1.2. Medición del Par y Potencia**

La medición del par y la potencia es de importancia básica al determinar la capacidad de producción de un motor, para realizar estas mediciones se utilizan dispositivos llamados dinamómetros.

### **1.2.1 Dinamómetros**

La palabra “Dinamómetro” está compuesta por dos partes; la primera, “dinamo”, que a su vez es una variación de “dina”, una palabra griega que significa “potencia”; la segunda, “metro”, también proviene de una palabra griega y quiere decir “medir”. Para nuestros



propósitos un dinamómetro puede describirse mejor como “un dispositivo que mide potencia”. Sin embargo, lo que un dinamómetro mide en realidad es par y velocidad angular, por medio de instrumentos conectados al mismo, pudiéndose por tanto, calcular la potencia desarrollada en el motor.

Un dinamómetro es un dispositivo que aplica una carga sobre el motor, dicha carga sostiene la velocidad del motor, así que también se le llama *freno*. La velocidad del motor bajo prueba se hará lenta a medida que aumenta la carga y se acelerará a medida que la carga disminuya, esta carga puede medirse como una fuerza, para lo cual se incorpora al dinamómetro algún dispositivo de medición.

Los dinamómetros se pueden clasificar en dos grandes categorías:

- a) Dinamómetros de absorción.
- b) Dinamómetros de transmisión.

Los Dinamómetros de absorción son medidores de potencia de acción directa en cuanto absorben y disipan la energía producida por el motor. Existe también una categoría de medidores de acción indirecta, a la que pertenecen los Dinamómetros de transmisión en los cuales se interpone entre el motor y el elemento impulsado un torsiómetro y no absorben energía durante la medición del par transmitido.

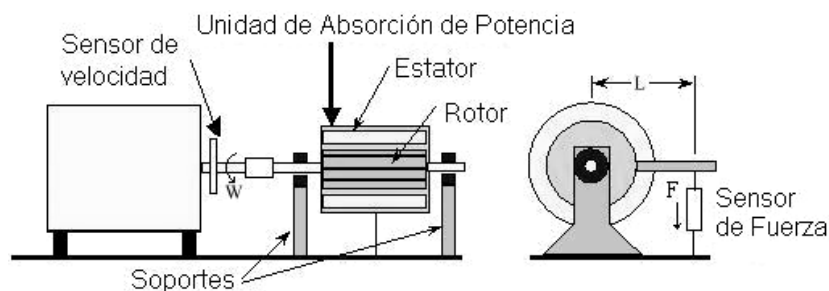
#### **1.2.1.1. Dinamómetros de Absorción**

Los dinamómetros de absorción trabajan sobre el principio de que cuando un motor en funcionamiento mueve algún conjunto de elementos mecánicos que ofrecen una resistencia a su propio movimiento, el trabajo lo realiza contra dicha resistencia (carga resistente) que, por tanto, hace el efecto de freno del motor. Cuando se emplea un dinamómetro de absorción, el motor bajo prueba se acopla mecánicamente a un dispositivo frenante cuya característica resistente se puede variar (variar la carga resistente) y que aplica un par resistente al eje común. El valor del par resistente se mide por medio de un instrumento conectado al dinamómetro.

Los dinamómetros de absorción absorben la potencia que se está midiendo y además disipan la energía extraída en forma de calor o de energía eléctrica.

En la figura 1.4 se muestra un dinamómetro de absorción, el cual consta principalmente de los siguientes elementos:

- Acoplamientos y soportes
- Unidad de Absorción de Potencia
- Sensor de Fuerza
- Sensor de Velocidad



*Figura 1.4. Dinamómetro de absorción.*

La estructura de acoplamiento es la que se encarga de conectar al motor que se desea evaluar con la Unidad de Absorción de Potencia para que esta pueda frenarlo.

La Unidad de Absorción de Potencia (PAU, por sus siglas en inglés), en realidad es un freno que se acopla al motor que se desea evaluar, para poder forzarlo o frenarlo, aplicándole diferentes intensidades de carga para observar su comportamiento. La PAU está compuesta de dos partes fundamentales: el rotor y el estator. El motor a evaluar siempre se acopla al rotor de la PAU, para que este sea frenado por medio del estator. La forma en que éste logra frenar al rotor depende de la tecnología que se utilice (mecánica, hidráulica o electromagnética). Al poseer el estator un montaje flotante, que permite que gire sobre su propio eje, intentaría girar en el mismo sentido que el rotor. Un brazo unido

al estator, que posee un punto de apoyo a una distancia del eje de giro, impide este giro, dando lugar a la aparición de una fuerza  $F$  en dicho punto. Este punto de apoyo actúa sobre el dispositivo de medida de fuerza, que generalmente es una celda de carga.

La celda de carga es un instrumento que se encarga de resistir la tensión que el motor ejerce sobre la PAU. Cuando el estator frena al rotor, éste tiende a girar en el mismo sentido que el rotor, lo cual se evita por la celda de carga. A pesar de ello, el estator logra girar ligeramente sobre el eje del rotor deformando la celda de carga. La deformación que sufre la celda de carga es proporcional a la fuerza que el motor ejerce sobre ella, si multiplicamos el valor de esta fuerza por la longitud del brazo del dinamómetro, podemos conocer el valor del par.

### *Tipos de Unidades de Absorción de Potencia*

La PAU o freno es la encargada de absorber y disipar la energía mecánica entregada por el motor, adicionalmente genera un par resistente que es el que proporciona la "carga" al motor. Esta carga ha de ser variable para ensayar distintas condiciones operativas del motor, el cual puesto en marcha es sometido por el freno a un par resistente, que limita la velocidad de rotación del motor, alcanzándose un estado de equilibrio cuando el par resistente se hace igual al par motor. Siendo el par proporcional a la magnitud de la carga resistente aplicada al motor. La naturaleza física de la carga no tiene influencia sobre la producción de potencia siendo ésta la misma si el par resistente es el mismo para la misma velocidad de giro del motor.

Se han desarrollado varios tipos de Unidades de Absorción de Potencia o frenos basados en distintos principios. La diferencia entre los distintos tipos de Unidades de Absorción de Potencia radica en la naturaleza de la fuerza resistente, el tipo de elemento de frenado y el procedimiento mediante el cual se disipa la energía absorbida. A continuación se mencionan algunos tipos de frenos.

*Unidades de Absorción de Potencia Mecánicas*

Los métodos mecánicos no son particularmente adecuados para la prueba de motores de gran potencia que giran a grandes velocidades. Los frenos mecánicos resultan muy voluminosos cuando se trata de potencias muy elevadas y no puede obtenerse un control flexible. Entre este tipo de frenos podemos mencionar el freno de cinta y el freno de Prony.

*Unidades de Absorción de Potencia Hidráulicas*

Los frenos hidráulicos son adecuados para las mediciones de potencia de la mayor parte de los motores de combustión interna. El tipo de acción es la debida a la fricción de un fluido (por lo general agua) entre los dos elementos sólidos (rotor y estator), regulada por la variación de nivel de fluido en la cámara hidráulica. Básicamente hay dos tipos de frenos hidráulicos: de turbulencia y de viscosidad.

En el freno hidráulico de turbulencia (Froude, Schenk, Zollner), que es el tipo más comúnmente usado, estator y rotor están provistos de cavidades y álabes oportunamente conformados que imparten al agua un movimiento turbulento que transforma en calor el trabajo desarrollado por el motor. El freno hidráulico es similar a un convertidor hidráulico de par, en el que el rotor transmite el par al estator mediante el impulso de una corriente de agua.

En el freno hidráulico de viscosidad (Ranzi, o Brotherhood, o Junkers) el rotor está en cambio formado por uno o más discos alternados con otros discos fijos a la carcasa; el espacio entre los discos móviles y los fijos es muy pequeño, por lo que el agua interpuesta es arrastrada violentamente y se calienta por rozamiento interior; los discos llevan generalmente unas perforaciones que sirven para aumentar la turbulencia del agua y por lo tanto la resistencia frenante.

En ambos casos la potencia absorbida se traduce en un aumento en la temperatura del agua por lo que su disipación térmica es fácil, mediante una renovación constante del agua que circula a través de la carcasa de modo que el calor es extraído a medida que se

va generando. En algunos casos se trabaja en un circuito cerrado con intercambiador de calor y la eventual recuperación de energía. La automatización de este tipo de frenos requiere de actuadores electromecánicos.

Los frenos hidráulicos presentan la ventaja de que su precio es bajo y que los diseños más avanzados permiten obtener una buena estabilidad. Tienen el inconveniente que ofrecen muy poco par resistente a bajas revoluciones, por lo que la absorción de potencia a regímenes bajos es muy reducida.

#### *Unidades de Absorción de Potencia Eléctricas*

Los frenos eléctricos son los absorbedores de potencia más prácticos en todos los casos en que su aplicación es posible. En el sector automotriz son usados a gran escala por su sensibilidad y precisión para las mediciones de par y potencia. Los frenos eléctricos pueden ser de alguno de los siguientes tipos:

Freno completamente eléctrico.

Para determinar la potencia efectiva se pueden utilizar generadores de corriente eléctrica. Así por ejemplo si se acopla un motor a un generador eléctrico conectado a una resistencia eléctrica, la potencia del motor se utilizará en accionarlo. Esta potencia se puede determinar midiendo la potencia eléctrica suministrada por el generador. En este método debe tenerse en cuenta que existirán pérdidas por rozamiento, por efecto del aire y pérdidas eléctricas dependientes de la carga en el generador, por lo que la medida no es muy precisa y deberá corregirse en magnitud para el rendimiento del generador. Ya que la eficiencia del generador depende de la carga, la velocidad y la temperatura, este dispositivo es más que inconveniente para usarse en un laboratorio y obtener mediciones precisas. Esto hace que sea mucho más común medir la potencia del motor indirectamente a través del par motor.

La regulación de la carga, cuando las variaciones no son demasiado grandes, puede ser hecha variando la excitación del generador con un reóstato. Haciendo crecer la reacción electromagnética entre el rotor y el estator, efecto que trasmite el par del rotor al estator,

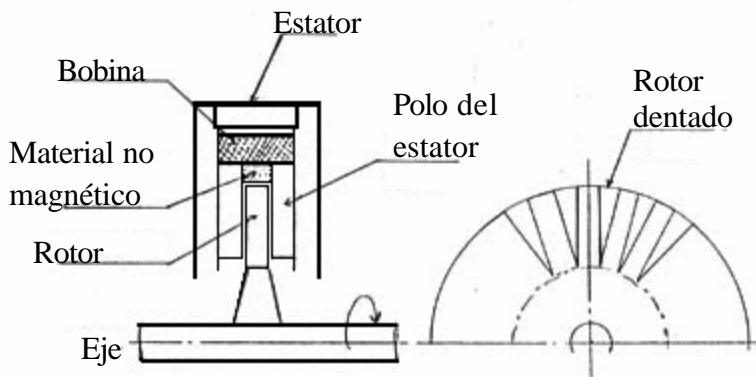
aumenta la carga resistente y viceversa. La corriente producida puede ser disipada en forma de calor mediante una carga externa (resistencias eléctricas).

Ahora bien, una ventaja de este tipo de freno es que la energía eléctrica generada durante el ensayo puede aprovecharse de alguna forma útil, ya que la potencia del motor no se pierde en un sistema de refrigeración. Aunque esto solamente se hace cuando el tiempo de trabajo es lo suficientemente grande como para amortizar los costos de acoplamiento.

Su reversibilidad y posibilidad de actuar como motores, permiten además efectuar pruebas de arrastre del motor (obtención de la eficiencia mecánica aproximada y simulación de cargas variables en su aplicación real).

#### Freno de corrientes parásitas

Una de las formas más antiguas de PAU es la de corrientes parásitas. El freno de corrientes parásitas consta de un rotor dentado acoplado al eje del motor a ensayar, y que gira dentro del estator, siendo muy pequeño el espacio entre el estator y los dientes del rotor. En la figura 1.5 se muestra el diagrama básico de un freno de corrientes parásitas.

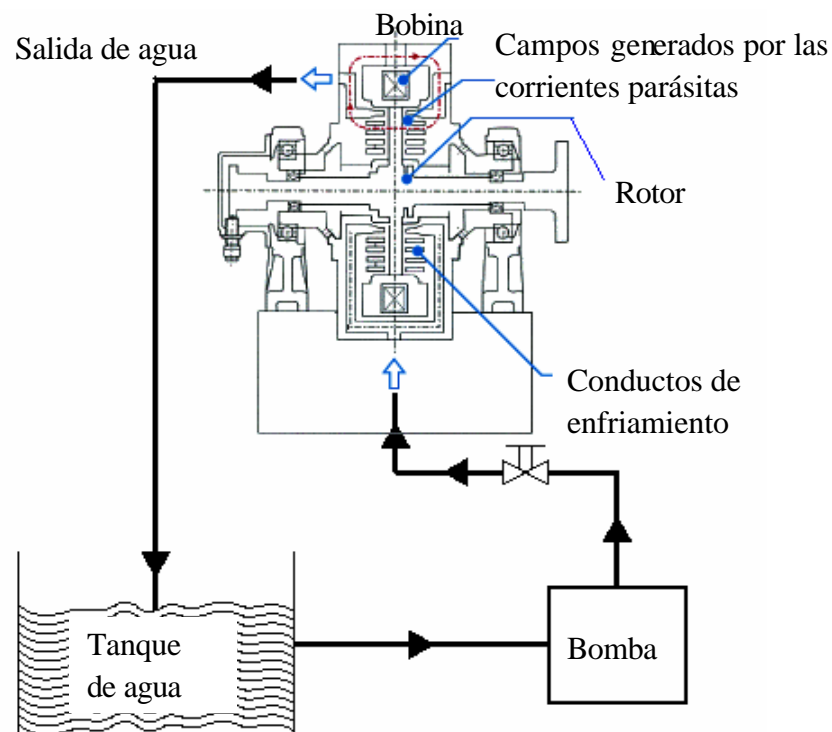


*Figura 1.5. Diagrama básico de un Freno de Corrientes Parásitas.*

El estator lleva un devanado de campo a base de bobinas circunferenciales, las cuales, al ser excitadas por una pequeña corriente continua, crean un flujo magnético que enlaza el rotor y el estator. Este flujo magnético se concentra en las proximidades de los dientes del

rotor y, cuando éste gira, se inducen corrientes parásitas de *Foucault* cerca de la superficie de la carcasa del estator. Los campos de las corrientes parásitas reaccionan con el campo principal y crean una fuerza de frenado en el rotor que tiende a resistir el par aplicado por el motor. La regulación del par de frenado se efectúa variando la alimentación de las bobinas del estator.

El calor cinético generado en este proceso es absorbido por el circuito refrigerante del estator. Al igual que en los frenos hidráulicos se hace necesaria la circulación de agua como se muestra en la figura 1.6, o bien en otros diseños de aire, aunque aquí solo tiene la función de actuar como refrigerante, evitando el excesivo calentamiento del rotor por efecto Joule y así poder mantener estables las condiciones de operación.

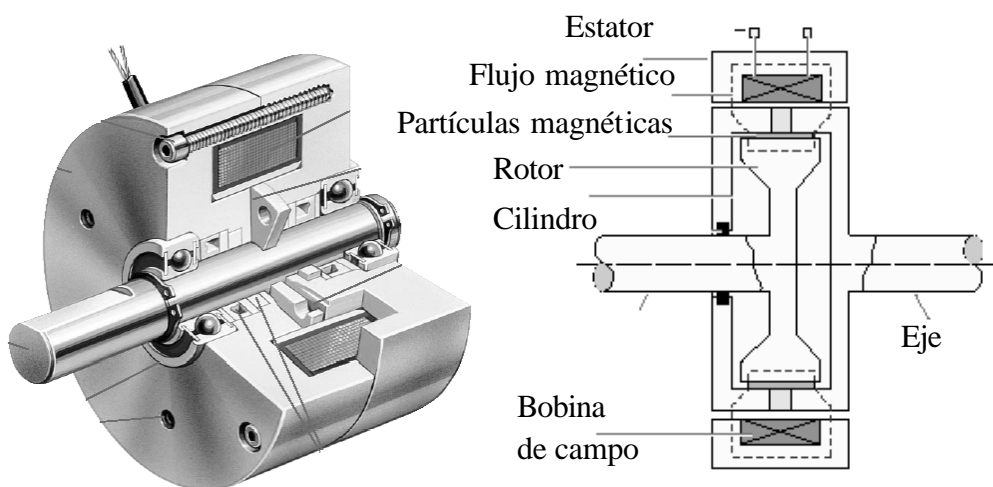


**Figura 1.6.** Circuito refrigerante en un freno de corrientes parásitas.

Los frenos de corrientes parásitas son ideales para aplicaciones que requieren altas velocidades y que también operan en el rango de media a alta potencia.

## Freno de partículas magnéticas

También conocido como de polvo magnético. La absorción de potencia se basa en la fricción de un gran número de partículas ferromagnéticas situadas entre estator y rotor. El freno de polvo magnético mostrado en la figura 1.7, tiene una estructura sencilla y consigue un par de giro alto a la vez que ocupan poco espacio. La unidad está compuesta de 2 inducidos alojados independientemente el uno del otro. El inducido exterior contiene una bobina anular que se alimenta con corriente continua para la activación.



*Figura 1.7. Freno de partículas magnéticas.*

En el espacio de aire entre los inducidos se encuentra el polvo magnético (hierro/cromo). Sometiendo a corriente a la bobina y debido a la magnetización se generan los granos de polvo que forman una especie de cadena. La rigidez de esta cadena varía en función del campo magnético y es directamente proporcional a la intensidad de la corriente a que se somete. De esta manera se produce una adherencia de frenado más o menos grande entre ambos inducidos, los cuales consiguen un par de frenado proporcional a la corriente.

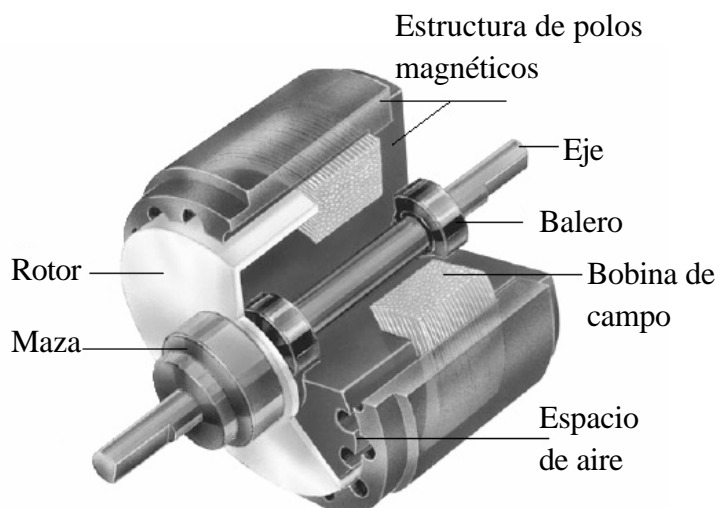
La disipación térmica se consigue mediante la evacuación de calor mediante la circulación de agua o aire.



Entre las prestaciones del freno de partículas magnéticas, cabe mencionar el buen par de frenado a bajas revoluciones hasta el paro completo. Su uso puede ser como elemento frenante secundario para cubrir la zona de bajas revoluciones, mientras que sus inconvenientes son el desgaste a altas velocidades y su precio es elevado, siendo poco frecuente en el ensayo de motores térmicos.

#### Freno de histéresis

Los frenos de histéresis producen el par resistente estrictamente a través de un espacio de aire entre polos magnéticos sin el uso de partículas magnéticas o componentes de fricción, ver figura 1.8.



*Figura 1.8. Freno de histéresis.*

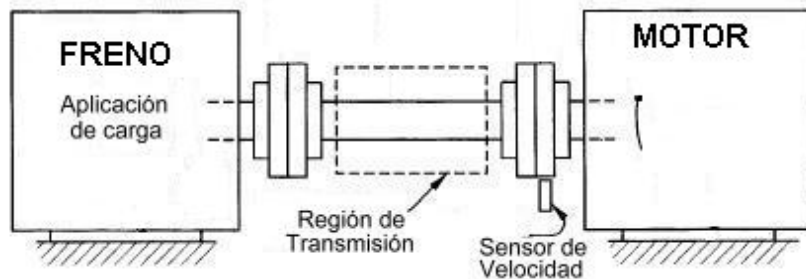
En el freno de histéresis, hasta que la estructura de polos magnéticos es energizada, el rotor puede girar libremente sobre su eje. Cuando se energiza la bobina de campo se genera una fuerza magnética en la estructura de polos, provocando que el espacio de aire entre rotor y estator se vuelva un campo de flujo magnético y el rotor se frene magnéticamente, proporcionando una acción de frenado entre la estructura de polos y el rotor.

La ventaja de estas unidades consiste esencialmente en la transmisión libre de contacto del par de giro, logrando obtener una vida útil muchísimo más alta que los otros tipos de freno, sin la consecuencia de la pérdida de exactitud en la repetición.

El valor del par de giro depende de la corriente en la bobina excitadora y se puede ajustar sin graduación hasta su respectivo valor máximo. El par es prácticamente constante en la gama de revoluciones nominales.

### 1.2.1.2. Dinamómetros de transmisión

Un dinamómetro de transmisión permite determinar el par en el eje del motor cuando trabaja con una carga normal; en este caso, el dinamómetro no absorbe potencia alguna, ver figura 1.9.



*Figura 1.9. Dinamómetro de transmisión.*

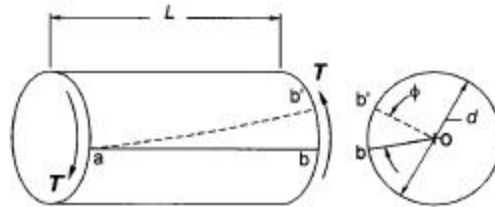
Los dinamómetros de transmisión trabajan según el principio de que, cuando se aplica un par a un eje, y este par es resistido por otro igual y opuesto, dicho eje experimenta torsión y puede sufrir alguno de los efectos producidos por la deformación del segmento del eje (siempre que no se rebase el límite elástico del material), tales como:

- a) Desviación angular relativa de dos secciones del eje separadas entre sí.
- b) Dilatación superficial del eje.
- c) Variación de la permeabilidad magnética del eje.

En el caso de la desviación angular para un eje cilíndrico sólido en el rango de comportamiento elástico, figura 1.10, el par aplicado puede calcularse conociendo el ángulo de torsión ( $\mathbf{f}$ ) para una longitud dada del eje ( $L$ ) y que está determinado como:

$$\mathbf{f} = \frac{TL}{GI_p} \quad (1.2)$$

Siendo el momento de inercia para este eje:  $I_p = \frac{\pi d^4}{32}$  y  $G$  el módulo de torsión del material, por lo que el par de torsión instantáneo será proporcional a la desviación angular.



**Figura 1.10.** Desviación angular de un eje debido a la torsión.

En esta proporcionalidad se fundamentan los torsiómetros de desviación angular que pueden ser mecánicos, eléctricos u ópticos.

Los torsiómetros consisten en un elemento intermedio de transmisión que al ser sometido a un par de torsión se deforma elásticamente alterándose sus características físicas o dimensionales.

En los dinamómetros de transmisión, el motor necesariamente tiene que estar siempre acoplado a un freno u otro dispositivo que provoque en la región de transmisión la reacción al par a medir.

### 1.3. Medición de la fuerza

La fuerza se define como el producto de la masa por la aceleración. La unidad de fuerza es el newton, siendo 1 newton la fuerza necesaria para proporcionar una aceleración de 1 metro por segundo a una masa de 1 kilogramo.

Un método para medir una fuerza consiste en compararla con otra conocida con exactitud, como se hace en las balanzas. Otro método consiste en medir el efecto de la fuerza sobre un elemento elástico, denominado celda de carga. En las celdas de carga eléctricas, el efecto es una deformación o desplazamiento. En las celdas de carga hidráulicas y neumáticas, el efecto es un aumento de la presión de un líquido o un gas, respectivamente.

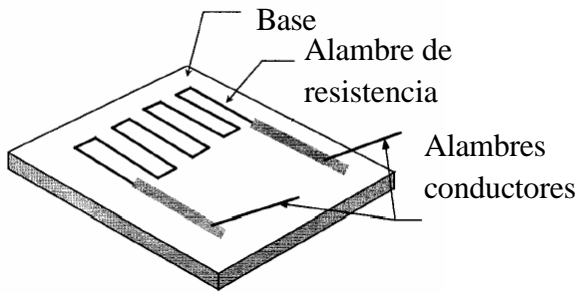
Al aplicar un esfuerzo mecánico a un elemento elástico inmóvil, éste se deforma hasta que las tensiones generadas por la deformación igualan las debidas al esfuerzo aplicado. El resultado es un cambio en las dimensiones del elemento, que si tiene una forma apropiada puede ser proporcional al esfuerzo mecánico.

#### *Celdas de carga eléctricas*

Una celda de carga es un dispositivo que suministra una señal eléctrica proporcional a la deformación que ésta sufre gracias a la acción de una fuerza que actúa sobre ella.

Una celda de carga puede ser considerada directamente como un transductor, pero en realidad está construida a partir de una serie de transductores denominados galgas extensiométricas, figura 1.11, las cuales son resistencias que varían su valor de acuerdo a la deformación a que son expuestas.

Una galga extensiométrica es básicamente un alambre conductor adherido de manera firme en el cuerpo de un objeto de alta resistencia mecánica, que es quien recibe la fuerza. Este objeto resistente se deforma ligeramente provocando que el alambre altere su forma física de modo que se estire o se contraiga según el sentido de dicha deformación.



*Figura 1.11. Galga Extensiométrica.*

Las galgas extensiométricas están construidas generalmente a partir de alambres de pequeños diámetros con el objeto de que puedan aumentar o disminuir su longitud a través de pequeñas fuerzas que actúen sobre ella. El material de alambre puede ser una aleación de níquel y cobre o de grabado de laminillas metálicas delgadas generalmente.

La resistencia eléctrica del alambre o de la laminilla delgada cambia a medida que se deforma. La propiedad utilizada es la de la resistividad, donde todo elemento conductor basa su resistencia eléctrica en la siguiente ecuación:

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (1.3)$$

donde:

R: Resistencia (  $\Omega$  )

$\rho$ : Constante de resistividad del material (  $\Omega \cdot m$  )

l: Longitud (m)

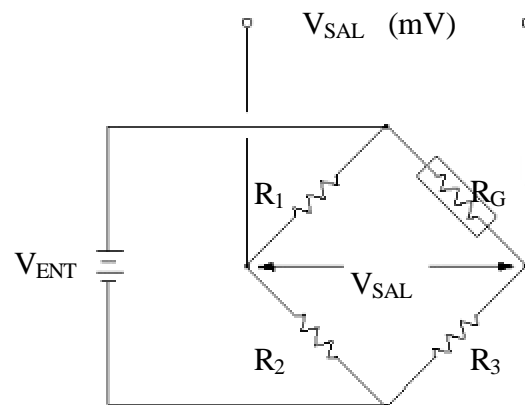
A: Área de sección ( $m^2$ )

Al deformarse la galga extensiométrica, varían la longitud y el área de sección, por lo cual la resistencia también varía. Si se comprime, aumenta su diámetro y disminuye su longitud, por lo cual, su resistencia eléctrica aumentará en forma proporcional.

Finalmente, la tensión o compresión del alambre representa la fuerza aplicada, lo que a su vez, puede convertirse a una señal eléctrica si medimos la variación de la resistencia eléctrica de la galga.

El cambio porcentual de la resistencia para un cambio dado en longitud se llama factor de galga  $K$ . Un factor de galga alto significa un cambio de resistencia relativamente grande para un mismo esfuerzo aplicado.

Como el cambio de resistencia de una galga extensiométrica por lo general es muy pequeño, lo usual es emplear puentes de Wheatstone para medirlo, figura 1.12. Además, como la resistencia misma de la galga es pequeña se necesitan conexiones especiales de puente para eliminar los efectos resistivos de los alambres conductores.



*Figura 1.12. Puente de Wheatstone.*

El puente de Wheatstone generalmente está diseñado para estar balanceado cuando la galga ( $R_G$ ) no ha sufrido variación alguna, en otras palabras, el voltaje medido en las terminales de salida del puente es igual a cero. A medida que la galga sufre variaciones en su resistencia, el puente se desbalancea y el voltaje medido es proporcional a dicho cambio, que a su vez es proporcional a la fuerza aplicada.

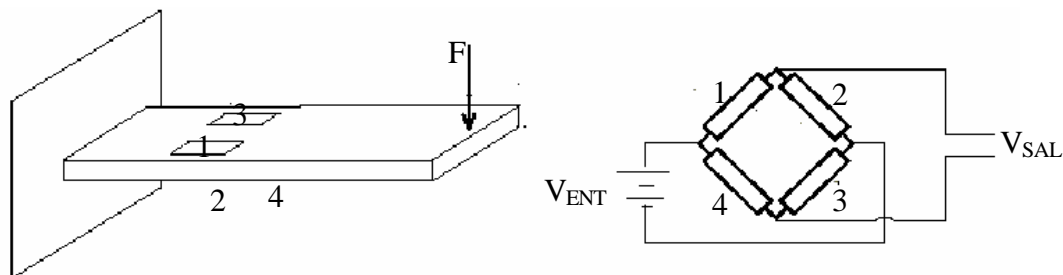
Una fuerza mayor crea un cambio mayor en la resistencia de la galga y una salida de voltaje mayor en el puente determinado por la siguiente ecuación:

$$V_{SAL} = V_{ENT} \left[ \frac{R_3}{R_3 + R_G} - \frac{R_2}{R_2 + R_1} \right] \quad (1.4)$$

Para compensar los efectos de la temperatura puede conectarse una segunda galga, de iguales características a la primera, formando un ángulo recto con la línea de aplicación de la fuerza. Así, la fuerza aplicada no tiene efecto sobre esta segunda galga; sin embargo, la temperatura la afecta de igual forma que a la primera, sólo que en sentido contrario, debido a su ubicación en el puente, por lo cual la variación por efectos de temperatura prácticamente se cancela. La galga que es afectada directamente por la fuerza es denominada galga activa mientras que la otra se denomina galga pasiva.

Para una medición precisa de la fuerza se utilizan celdas de carga formadas por varias galgas. Estas galgas son ubicadas estratégicamente en la superficie de la celda de carga a diferentes ángulos para proporcionar la mayor estabilidad térmica y la mejor linealidad posible entre resistencia y fuerza aplicada.

Una celda de carga posee generalmente cuatro galgas extensiométricas en forma de puente de Wheatstone, figura 1.13. Por dos extremos del puente se suministra alimentación de corriente directa y por los otros dos se obtiene la señal de salida.



**Figura 1.13.** Conexión de 4 galgas extensiométricas en una celda de carga.

Existen diferentes tipos de celdas de carga que difieren, además de su capacidad y resolución, en la forma en que reciben la fuerza a medir, es decir, si es por compresión, por tensión o por cizalladura.

Las celdas de carga que reciben la fuerza por compresión y por cillazadura son muy populares en medición de pesos grandes y medianos. Las celdas que reciben el esfuerzo en forma de tensión son utilizadas generalmente para pesos pequeños, del orden de 100 kg.

Los parámetros utilizados para la selección de una celda de carga son la capacidad y la resolución. La capacidad nos indica el peso máximo al cual se puede someter la celda de carga. La resolución nos indica la señal de voltaje que ella entrega a plena carga por el voltaje de excitación. Generalmente la resolución de una celda de carga varía entre 2 mV a 3 mV y entrega de 0 a 36 mV de señal. Antes de llevar la señal de las celdas de carga al conversor se debe hacer un acondicionamiento de señal.

#### **1.4. Medición de la velocidad angular**

La velocidad angular (también conocida como frecuencia angular) es una medida de la velocidad de rotación. Se mide en radianes por segundo (rad/s) o en revoluciones por minuto (rpm).

La medición de la velocidad angular de un eje que gira se realiza preferentemente con tacómetros, los cuáles pueden ser mecánicos o eléctricos.

##### **1.4.1. Tacómetros mecánicos**

Los métodos mecánicos para la medición de la velocidad angular fueron desarrollados inicialmente para el control de motores y turbinas de vapor. A continuación se mencionan dos tipos de tacómetros mecánicos.

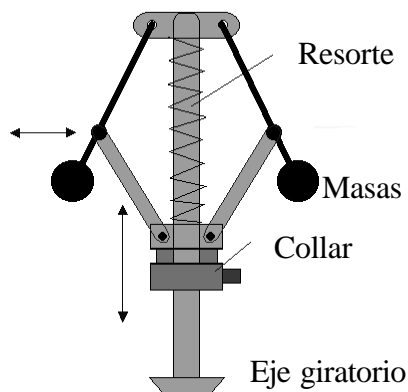
###### **1.4.1.1. Cuenta revoluciones y cronómetro**

El método de cuenta revoluciones y cronómetro es bastante satisfactorio para medir velocidades lentas, existiendo comercialmente algunos instrumentos que comprenden un cuenta revoluciones con un dispositivo de cronometrado incorporado.



### 1.4.1.2. Tacómetro de fuerza centrífuga

El tacómetro de fuerza centrífuga mostrado en la figura 1.14 se basa en el principio del regulador de Watt. Este tipo de tacómetros se componen básicamente de dos masas rotativas articuladas a un eje giratorio. Al aumentar la velocidad de giro, aumenta la fuerza centrífuga en las masas, lo cual hace que estas masas se desplacen hacia fuera y el collar deslizante se mueva hacia arriba del eje y comprima un resorte. La medida de la compresión del resorte, leída en una escala, representa la velocidad de giro del eje.



*Figura 1.14. Tacómetro de fuerza centrífuga.*

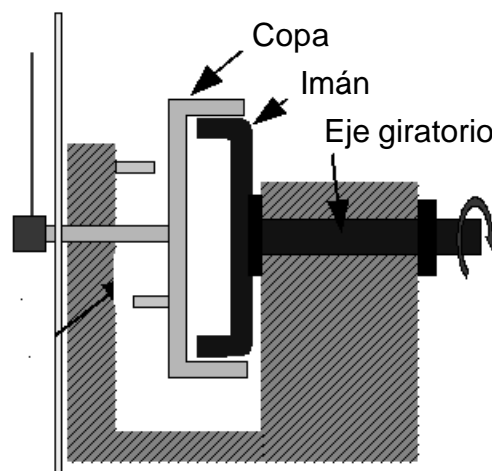
El tacómetro de fuerza centrífuga puede usarse para medir velocidades de giro de hasta 40,000 rpm, con una precisión máxima de 1%.

### 1.4.2. Tacómetros eléctricos

Estos tacómetros utilizan un transductor que produce una señal eléctrica analógica o digital relacionada con la velocidad de giro de un eje. Existen varios tipos de tacómetros eléctricos y pueden dividirse convenientemente en los siguientes tipos:

### 1.4.2.1. Tacómetro de corrientes parásitas

En este tipo de tacómetros, figura 1.15, el eje del cual se desea medir su velocidad angular, tiene acoplado un imán permanente, el cual gira dentro de una copa de aluminio. El giro del imán induce corrientes parásitas en el aluminio, produciéndose un par resistente proporcional a la velocidad. Un resorte frena el cabezal de aluminio quedando éste en una posición que se señala sobre una escala calibrada con una aguja indicadora que tiene acoplada.



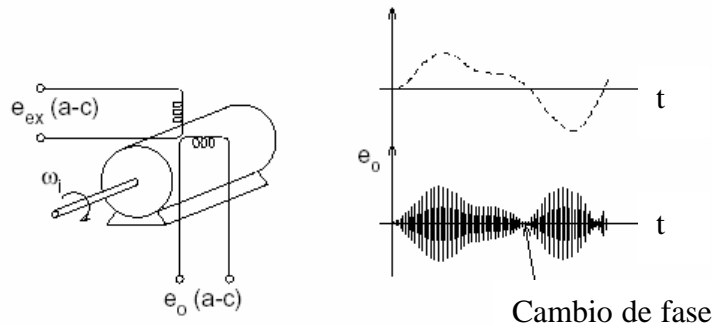
*Figura 1.15. Tacómetro de corrientes parásitas.*

El tacómetro de corrientes parásitas se usa normalmente para la medición de velocidades de rotación de hasta 12,000 rpm, con una precisión de 3% como máximo.

### 1.4.2.2. Tacómetros de corriente alterna

Un tacómetro de corriente alterna, figura 1.16, es un alternador sin escobillas con un imán permanente multipolar giratorio. El eje del rotor de este alternador está conectado al eje al cual se le quiere medir la velocidad, y por consiguiente el campo magnético rotatorio induce un voltaje de corriente alterna en los devanados de salida localizados en el estator, dicho voltaje es proporcional a la velocidad. Sin embargo, con este arreglo el entrehierro de aire no puede mantenerse con una gran estabilidad y el efecto del voltaje de corriente

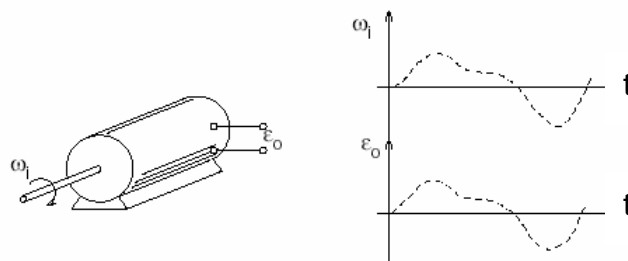
alterna no puede emplearse de modo tan útil como en un generador con escobillas. En consecuencia, la medición se realiza en la base de una señal de frecuencia más que de voltaje. Estos tacómetro pueden usarse con una precisión de  $\pm 2\%$ , hasta 5,000 rpm.



**Figura 1.16.** Tacómetro de corriente alterna.

**1.4.2.3. Tacómetros de corriente directa**

Los tacómetros de corriente directa, figura 1.17, son similares a los de alterna, pero “rectificando” la salida, tal como se hace en los generadores de corriente directa. Este tipo de tacómetros están formados por un estator de imán permanente y un rotor con un entrehierro uniforme. El voltaje de corriente directa a la salida del tacómetro es proporcional a la velocidad de giro. Estos tacómetros pueden usarse en mediciones de hasta 5,000 rpm, con una precisión de 2%.



**Figura 1.17.** Tacómetro de corriente directa.

La polaridad del voltaje de corriente directa depende de la dirección de rotación y, por lo tanto, puede usarse para determinar esta dirección mediante el uso de un indicador cuyo punto cero se encuentre en la parte media de la escala.

#### 1.4.2.4. Tacómetros eléctricos de captación de señal

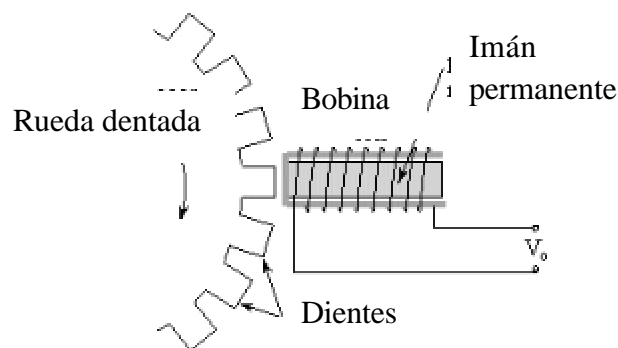
Los tacómetros eléctricos descritos hasta aquí proporcionan una indicación analógica de la velocidad, mientras que los de captación de señal o de no contacto dan una señal de salida de pulsos o digital. Por no existir una conexión física entre el transductor y el eje, se aplica poca carga, o ninguna, al eje de la máquina, lo cual significa una ventaja característica de este tipo de tacómetros.

Los tacómetros de no contacto producen una señal de salida en forma de un tren de pulsos, con una frecuencia que es proporcional a la velocidad angular del eje en rotación. Los sistemas de medición digital pueden usarse para velocidades de hasta 500,000 rpm.

En los siguientes párrafos se describen los principales tipos de tacómetros de no contacto o captadores de señal.

#### *Tacómetros inductivos*

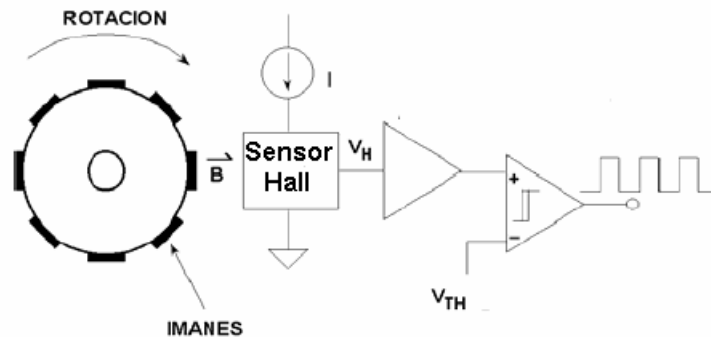
En la figura 1.18 se muestra un sistema típico de tacómetro inductivo. Cuando la rueda dentada gira, cada diente de la misma hace variar la reluctancia del circuito magnético, produciendo así una variación de f.e.m. en forma de un pulso.



**Figura 1.18.** Tacómetro inductivo.

### *Tacómetros de Efecto Hall*

El tacómetro de efecto Hall es una variante del tacómetro inductivo. Emplea también material magnetizado, pero el detector es de Efecto Hall, como se muestra en la figura 1.19.



*Figura 1.19. Tacómetro de Efecto Hall.*

El fenómeno Efecto Hall fue descubierto por E.H. Hall en 1879. Si una corriente fluye en un conductor (o semiconductor) y se le aplica un campo magnético perpendicular a dicha corriente, figura 1.19, entonces la combinación de corriente y campo magnético genera un voltaje perpendicular a ambos. Este fenómeno se denomina *Efecto Hall*, donde el voltaje  $V_H$  es una función de la densidad de corriente, el campo magnético, y la densidad de carga y movilidad portadora del conductor.

### *Tacómetros de tipo capacitivo*

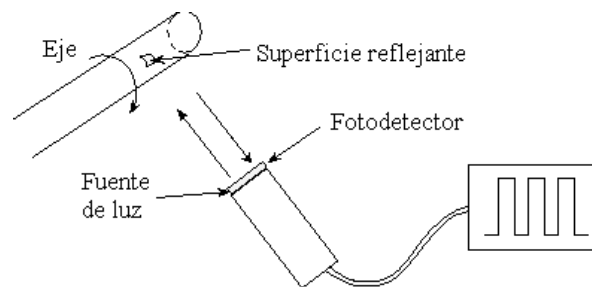
Los tacómetros capacitivos poseen un aspa unida al eje de la máquina. Al girar esta aspa entre las placas fijas de un capacitor se produce un cambio en la relación entre la capacitancia y tierra. El capacitor forma parte de un circuito oscilador, en tal forma que el valor de la frecuencia de oscilación de este circuito es una medida de la velocidad del eje.

***Tacómetros ópticos***

Una gran variedad de diseños utilizan el principio de la rotación de eje para interrumpir un haz de luz que incide sobre una celda fotoconductora o fotoeléctrica. Los pulsos así obtenidos se amplifican y se cuentan mediante un sistema eléctrico o se modelan para lograr una señal analógica antes de la conexión con el indicador.

***Tacómetros fotoeléctricos***

Estos instrumentos constan de una celda fotoeléctrica que es activada por pulsos luminosos desviados desde el eje en rotación, figura 1.20. El eje posee una superficie de reflexión intermitente y, cuando se enfoca un rayo de luz sobre éste, se obtiene un cierto número de pulsos luminosos. La frecuencia de bs pulsos luminosos es proporcional a la velocidad del eje y, por tanto, la frecuencia de bs pulsos eléctricos de salida de la celda fotoeléctrica será también proporcional a la velocidad del eje.

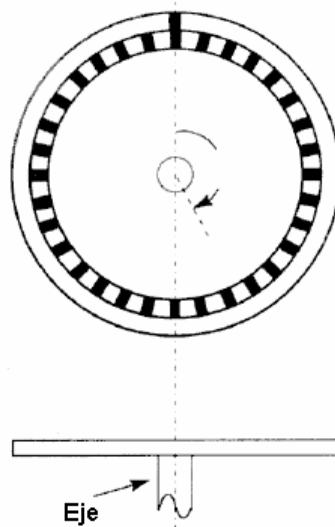


***Figura 1.20. Tacómetro fotoeléctrico.***

***Tacómetros basados en codificadores incrementales ópticos***

El *encoder* o codificador es un transductor rotativo que transforma un movimiento angular en una serie de pulsos digitales. En los codificadores incrementales hay un disco de poca inercia acoplado al eje en rotación. Dicho disco posee dos zonas o sectores, con una propiedad que las diferencia, dispuestas de forma alternativa y equidistante, tal y como se muestra en la figura 1.21. De este modo, para la medición de posición o desplazamiento angular, un incremento de posición produce un cambio definido en la

salida si se detecta dicha propiedad cambiante con la posición mediante un dispositivo sensor. Cuando los codificadores incrementales se emplean para medir velocidad angular, la salida básica suele ser en forma de un tren de pulsos con un ciclo de trabajo del 50%, cuya frecuencia es proporcional a la velocidad angular del eje en rotación.



*Figura 1.21. Codificador incremental óptico.*

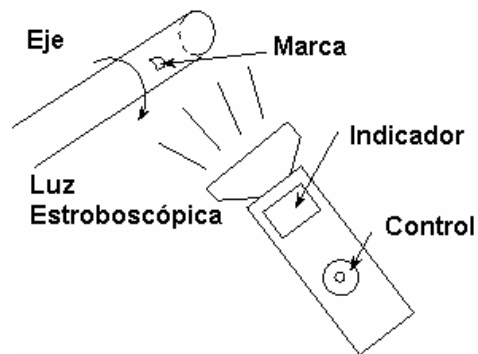
Los codificadores incrementales pueden estar basados en sectores opacos y transparentes, cromo sobre vidrio, metal ranurado, etc. En estos casos se emplean foto interruptores de barrera que están formados por un emisor de infrarrojos y un fotodetector separados una cierta distancia. Conforme gira el eje, la luz de la fuente en forma alternativa se transmite y se interrumpe, con lo cual se somete la señal digital al fotodetector, cuya frecuencia será proporcional a la velocidad angular. La sensibilidad del dispositivo puede mejorarse aumentando el número de cortes.

En el caso de que se empleen sectores reflectores, se instalan pequeñas cintas reflectoras en el dispositivo móvil, con lo cual la luz de la fuente se refleja de manera alternativa y se absorbe con el movimiento angular, presentando por lo tanto una señal digital. Para este tipo de arreglos se emplean fotointerruptores reflectivos, que están formados por un emisor y un receptor de rayos infrarrojos situados en el mismo plano de superficie.

*Tacómetros estroboscópicos*

Este aparato funciona según el principio de que, si un suceso repetitivo se ve sólo cuando se halla en un punto particular de su ciclo, aparece como estacionario. Si se marca una señal en un eje, y éste se hace girar lentamente debajo de una luz estable, puede obtenerse la velocidad angular observando la señal y contando el número de revoluciones durante un intervalo de tiempo definido. Sin embargo, a medida que aumenta la velocidad de giro, se hace más difícil apreciar las vueltas que da la señal.

Si se sustituye la luz estable por destellos de luz, y se ajusta la frecuencia y la duración de éstos de tal forma que sólo se produzca un destello muy corto por revolución, el observador podrá ver sobre el eje la señal aparentemente inmóvil. Esto puede apreciarse en la figura 1.22, donde el disco giratorio es iluminado en un punto durante cada revolución.



**Figura 1.22.** Tacómetro estroboscópico.

Es posible conocer la velocidad de un eje en rotación sin que exista contacto con él, por lo que el estroboscopio es particularmente útil para medir la velocidad de máquinas de poca potencia, ya que no precisa una fuerza adicional para accionar el instrumento de medición. Un eje en rotación aparecerá también como inmóvil si la frecuencia de los destellos es cualquier múltiplo de la velocidad del eje.



### 1.5. Instrumentos utilizados en pruebas automotrices

Como se mencionó anteriormente, el par y la potencia son los indicadores del comportamiento de un motor y nos informan la fuerza y rapidez a la que puede trabajar éste.

Para obtener las características de operación del motor de un automóvil, se puede recurrir a diferentes técnicas experimentales, las cuales están en función de dónde se realizan las mediciones requeridas; pudiendo ser realizadas en el cigüeñal, a la salida de la transmisión, o las ruedas motrices del automóvil.

Cuando se van a realizar mediciones en el cigüeñal se emplea el dinamómetro de banco o de motor, que básicamente es un banco de prueba para motores, equipado con un freno capaz de aplicar carga externa oponiendo resistencia al movimiento del eje del motor. Este banco de prueba desde luego está equipado para “conducir” el motor bajo diferentes condiciones, haciéndolo trabajar como lo haría dentro del vehículo en la calle.

Por otro lado, la determinación de las características en las ruedas motrices de un automóvil puede efectuarse tanto con dispositivos torsiométricos como con dispositivos externos, estos últimos análogos a los dinamómetros ordinarios de absorción.

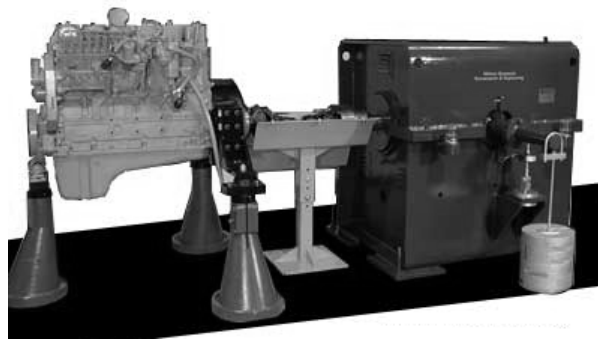
En el primer caso, que implica además la posibilidad de funcionamiento en la carretera, se aplican torsiómetros en los semiejes de la transmisión o, como alternativa, entre las ruedas motrices y las mazas correspondientes, figura 1.23; en el segundo, bancos de rodillos especiales, conectados a un freno medidor común, sobre el que actúan las ruedas motrices.



*Figura 1.23. Instalación de torsiómetros en las ruedas motrices de automóviles*

### 1.5.2. Dinamómetros de Motor o de banco

Para realizar pruebas de funcionalidad con los dinamómetros de motor o de banco, el motor del vehículo tiene que ser extraído del mismo. En una prueba en un dinamómetro de motor, el cigüeñal del motor del vehículo bajo prueba se acopla directamente al dinamómetro como se muestra en la figura 1.24. Este método requiere de adaptadores especiales y conexiones complejas, lo que implica mucho tiempo en cada prueba, por lo que es principalmente utilizado por los fabricantes de automóviles en el desarrollo de motores. También es el único método internacionalmente reconocido para determinar el rendimiento de potencia de un motor.



*Figura 1.24. Dinamómetro de Banco o de Motor.*

Cuando el motor está trabajando, el dinamómetro ejerce una fuerza de frenado en el motor. Los sensores conectados en el dinamómetro miden la velocidad de giro del motor así como el par. Sabiendo estos valores, se puede calcular la potencia de salida del motor. Los dinamómetros de banco nos permiten realizar una prueba bajo condiciones controladas y son particularmente adecuados para motores que desarrollan valores de potencia muy altos (por encima de los 400 BHP).

La desventaja principal de un dinamómetro de motor es el elevado costo de usar uno, tanto monetario como de tiempo.

### 1.5.3. Dinamómetros de Chasis

El dinamómetro de chasis mide la potencia del motor entregada a las ruedas motrices de un vehículo, lo que es muy importante, ya que la potencia en las ruedas es lo que determinará el desempeño real del automóvil.

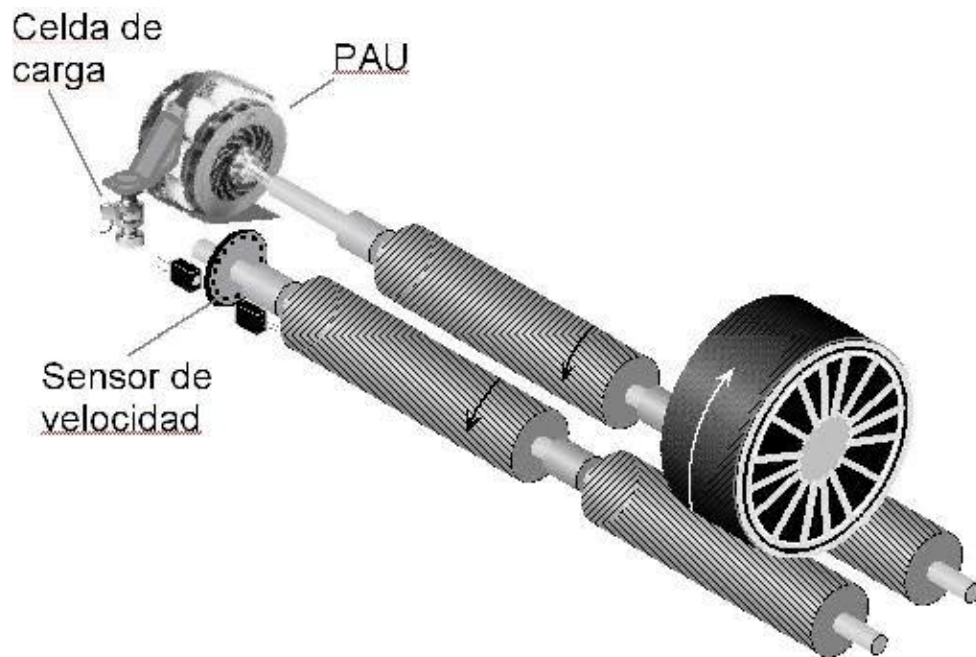
Con un dinamómetro de chasis también se pueden medir el consumo de combustible y las emisiones al escape mientras el vehículo opera, esto es siguiendo un programa de conducción específico sobre el dinamómetro, que simula la operación en carretera del vehículo. Los puntos de cambios de velocidades y otras condiciones de operación de una transmisión pueden también ser verificados.

Los dinamómetros de chasis generalmente se componen de un par de rodillos encima de los cuales se hace correr un automóvil. Estos rodillos se encuentran acoplados a algún freno mediante el cual se aplica una carga a las ruedas del automóvil.

Los instrumentos que se conectan a los rodillos informan sobre la velocidad de las ruedas, el par y la potencia. Normalmente se coloca un ventilador frente al vehículo para suministrar un flujo de aire por el radiador que ayuda a impedir el sobrecalentamiento del motor durante la prueba.

Existen básicamente dos tipos diferentes de dinamómetro de chasis. Uno de ellos se llama “dinamómetro de absorción de carga” y el otro “dinamómetro de inercia”.

El dinamómetro de absorción de carga mostrado en la figura 1.25 tiene una PAU acoplada a un rodillo y el automóvil se pone en marcha a una velocidad específica mientras se aplica una carga a las ruedas a través de los rodillos. La intensidad con que el motor hace girar las ruedas contra la carga aplicada, determinará la potencia que medirá el dinamómetro.



*Figura 1.25. Dinamómetro de chasis de absorción de carga.*

En los dinamómetros de chasis de tipo inercial las ruedas del vehículo impulsan a rodillos conectados con uno o más volantes de metal. Los volantes tienen una inercia que es igual o prácticamente la misma que la del vehículo. Como resultado del giro de las ruedas de inercia, el motor desarrolla aproximadamente la misma potencia de carga que si estuviera en carretera. Los dinamómetros de inercia trabajan sobre la base de que el vehículo se maneja con el acelerador a fondo desde una velocidad baja. Entonces se mide qué tan rápido el vehículo acelera los rodillos y a partir de allí se determina la potencia. Se le quita entonces la velocidad al vehículo y se mide la desaceleración, permitiendo a los rodillos y las ruedas parar por sí solos.

## **1.6. Emisiones vehiculares y su medición**

Los combustibles como la gasolina están formados aproximadamente por 14% de hidrógeno y 86% de carbono, los cuales se pueden unir para crear varios hidrocarburos (HC). Durante una combustión, donde el combustible y el oxígeno se queman completamente, sólo se produce CO<sub>2</sub> (dióxido de carbono) y H<sub>2</sub>O (agua). Este proceso

de una combustión completa muy pocas veces se lleva a cabo, y entonces surge el monóxido de carbono (CO) y consiguientemente aparecen oxígeno (O<sub>2</sub>) e hidrocarburos; tengamos en cuenta que la aparición de los mismos es porque al no completarse la combustión “siempre queda algo sin quemar”. También aparecen algunos subproductos de la mala combustión del nitrógeno del aire: NO, NO<sub>2</sub> (óxidos de nitrógeno); de los aditivos del combustible: óxidos de plomo, halogenuros de plomo; de las impurezas del combustible: dióxido de azufre.

Cabe mencionar que debido al efecto de la luz del sol se generan oxidantes a partir de los componentes del gas de escape: peróxidos orgánicos, ozonos, nitratos de perociacilo, etc.

Cuanto más incompleta es la combustión, tanto mayor es la expulsión de contaminantes en los gases de escape del motor.

### **1.6.1. Componentes principales de los gases de escape**

Los componentes principales de los gases de escape son: nitrógeno (N<sub>2</sub>), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y vapor de agua (H<sub>2</sub>O). Estos componentes son inocuos. Los componentes secundarios más importantes son monóxido de carbono (CO), hidrocarburos (HC) y óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>).

El carbono contenido en el combustible forma, en la combustión total, dióxido de carbono, en una proporción de aproximadamente 14 % en los gases de escape. La reducción del CO<sub>2</sub> es cada vez más importante, debido a su posible contribución al “efecto de invernadero”. Una reducción de la expulsión de CO<sub>2</sub> en los motores de gasolina, sólo es posible mediante una reducción del consumo de combustible, ya que el CO<sub>2</sub> es el producto final de una combustión optimizada (también en los gases de escape).

El hidrógeno se quema formando vapor de agua, que se condensa en su mayor parte al enfriarse. En días fríos se manifiesta como una nube de vapor en el tubo de escape.

El monóxido de carbono (CO) se produce como consecuencia de una combustión incompleta. El CO es un gas incoloro e inodoro. Este gas reduce la capacidad de admisión

de oxígeno de la sangre y conduce por lo tanto a la intoxicación del cuerpo. Por este motivo no está permitido que un motor funcione en estancias cerradas sin equipo de extracción conectado.

Los hidrocarburos (HC) constan de componentes de combustible no quemados o de hidrocarburos formados de nuevo. Los hidrocarburos alifáticos con bajo punto de ebullición son inodoros. Los hidrocarburos aromáticos anulares (benzol, toluol, hidrocarburos policíclicos) pueden percibirse con el olfato. Los hidrocarburos oxidados parcialmente (aldehidos, cetonas y otros) huelen desagradablemente. En presencia de óxidos de nitrógeno y a la luz del sol forman oxidantes que irritan las mucosas. Algunos hidrocarburos son cancerígenos.

Los óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) surgen como consecuencia de reacciones secundarias en todos los procesos de combustión con aire. Principalmente se trata de NO y NO<sub>2</sub>, que surgen a elevadas temperaturas de combustión a partir del nitrógeno del aire y del oxígeno. El NO es incoloro e inodoro y se transforma en el aire lentamente en NO<sub>2</sub>. El NO<sub>2</sub> en su forma pura es un gas venenoso de color marrón rojizo que huele penetrantemente. Bajo las concentraciones como las que aparecen en los gases de escape y en el aire muy contaminado, el NO<sub>2</sub> puede conducir a irritaciones pituitarias y destruye el tejido pulmonar.

El dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) aparece por la combustión del azufre contenido en el combustible. Estos contaminantes son debidos al tráfico en una proporción relativamente baja. El SO<sub>2</sub> en los gases de escape no puede ser eliminado por el convertidor catalítico y reduce su efecto de limpieza respecto a los demás componentes de los gases de escape. Por este motivo se están realizando intentos para reducir el contenido de azufre en los combustibles de gasolina y Diesel.

Macropartículas: comprenden todo material (excepto el agua no combinada), que en condiciones normales está contenido como cuerpo sólido (cenizas, carbón) o líquido en los gases de escape.

### 1.6.2. Pruebas de emisiones de gases de escape

Una prueba de emisiones de gases de escape es el procedimiento mediante el cual se extrae la totalidad o parte de los gases de escape de un vehículo para introducirlos a un analizador de gases, que mide la concentración de determinados contaminantes. Esta es una definición muy sencilla pues en la realidad existen muchas variantes y condiciones diferentes a las que se someten los vehículos para realizar dicha medición.

En general, las pruebas de emisiones de gases de escape se pueden clasificar en dos grupos:

*Las Pruebas Estáticas.* Son aquellas pruebas de emisiones durante las cuales no se aplica carga externa al vehículo, y mientras se efectúa la medición, éste opera con la transmisión en neutro, es decir en ralentí.

*Las Pruebas Dinámicas.* Son aquellas en las cuales se aplica una carga externa al motor y por consiguiente durante la prueba se debe operar el vehículo con la transmisión en posición distinta de neutro.

La razón de la existencia de ambos tipos de prueba es que las emisiones de un vehículo en ralentí son completamente diferentes de aquellas producidas cuando el vehículo está en marcha. Esta diferencia es considerablemente más marcada en el caso de las emisiones de  $\text{NO}_x$ , las cuales en ralentí son despreciables, pero no así en la situación de vehículo en marcha; por lo tanto, cualquier sistema de verificación y control que exija mediciones de  $\text{NO}_x$  tendrá que emplear pruebas dinámicas.

En las pruebas dinámicas se pueden utilizar dos posibles dispositivos para aplicar la carga externa al motor y poder operarlo con la transmisión en una posición distinta de neutro, sin necesidad de poner en marcha el vehículo, estos dispositivos son:

- a. El dinamómetro de chasis
- b. El dinamómetro de motor

Por otra parte, las pruebas dinámicas también se pueden separar en dos grupos diferentes, que son:

- a. *Las pruebas en estado estable.* Son aquellas en las cuales al auto se "conduce" a velocidad y carga constante y predeterminada, midiéndose las emisiones únicamente cuando se han alcanzado dicha carga y velocidad constantes, y se mantienen estas condiciones, y no durante los períodos de aceleración y desaceleración.
- b. *Las pruebas en estado transitorio.* Son aquellas en las cuales se "conduce" el auto a velocidad y carga variable de acuerdo a un programa de manejo predeterminado, llamado "ciclo de manejo", midiéndose las emisiones de forma ininterrumpida a lo largo de todo este ciclo.

#### **1.6.2.1. Ciclos de manejo**

Aunque es obvio que el equipo juega un papel determinante en el procedimiento de prueba, lo que podría llamarse el fundamento de la prueba es el ciclo de manejo. No debe perderse de vista que el objetivo de la prueba es determinar cómo serán las emisiones de un vehículo circulando en la calle, y el ciclo de manejo básicamente define como se debe "conducir" el auto y como y cuando se debe aplicar resistencia al dinamómetro, para simular de la mejor manera posible las condiciones que el auto enfrentaría en la calle.

Desde luego que las condiciones de manejo serán diferentes en cada país, o incluso en cada región o ciudad, por lo cual se han creado diferentes ciclos de manejo que pueden representar situaciones diferentes, por ejemplo, el tráfico en un centro urbano o en una carretera. De hecho, muchos países han desarrollado ciclos de manejo que representan las condiciones de sus propias ciudades y carreteras, y son esos ciclos los que utilizan para homologar tanto los vehículos fabricados en su país como los fabricados en otro país e importados a su territorio.

Los principales fabricantes de autos en el mundo se encuentran en Japón, Estados Unidos y la Unión Europea; cada uno de estos tres "bloques" ha creado sus propios ciclos de



manejo, y el resto de los fabricantes e importadores en otros países se rigen bajo las reglas de alguno de estos para certificar y homologar los autos que fabrican e importan.

### **1.6.3. Analizadores de los gases de escape**

La reciente proliferación de normas oficiales con respecto a los contaminantes atmosféricos ha demandado el desarrollo de métodos sensibles, rápidos y altamente específicos para la medición y análisis de los gases de escape de los vehículos.

Un analizador de gases de escape mide los volúmenes de los diversos contaminantes del aire en el gas de escape. El análisis de estas mediciones nos indicará si este gas contiene contaminantes en exceso. También si el motor está mecánicamente correcto y operando de manera adecuada. Estas mediciones en el tubo de escape pueden ayudar a determinar el estado y rendimiento del motor, encendido, sistema de combustible y controles de emisiones.

Para la determinación de la concentración de CO, HC y CO<sub>2</sub>, se utilizan equipos electrónicos que pueden ser de dos tipos: para uso de taller y para uso de laboratorio. Los primeros son del tipo llamado Medidores de Emisiones Infrarrojas no Dispersivas (NDIR, por sus siglas en inglés), el cual es un equipo robusto, capaz de soportar un trato brusco dentro de ciertos límites, pero que no posee la capacidad de medir concentraciones bajas de los contaminantes. En cambio, el equipo para uso de laboratorio es más frágil, emplean una tecnología llamada Detector de Ionización por Llama (FID, por sus siglas en inglés) y en la mayoría de los casos los equipos deben mantenerse bajo condiciones reguladas de temperatura y humedad, tienen la capacidad para medir concentraciones muy bajas de contaminantes.

En la mayoría de las pruebas de emisiones de escape se utiliza equipo para uso de taller, pero en aquellas pruebas en las cuales se diluyen los gases, es necesario utilizar equipo de laboratorio, pues las concentraciones pueden llegar a ser tan bajas por la dilución, que no se puedan detectar con los equipos para uso de taller.

Para la medición de  $\text{NO}_x$  se emplean analizadores quimiluminiscentes o electroquímicos, y en algunos tipos de pruebas, para autos con motor diesel, se emplean medidores de opacidad, como una medida de la cantidad de hollín, o filtros separadores de partículas para luego cuantificarlas. Otro parámetro que se mide, aunque no es contaminante, es el oxígeno. La razón para medir éste es porque la cantidad de oxígeno en los gases de escape es un indicador de la eficiencia de la combustión, lo cual a su vez es indicador de la cantidad de contaminantes (combustible sin quemar) que se emiten, esta medición también se realiza mediante sensores electroquímicos.

Los analizadores de los gases de escape de vehículos con motor a gasolina miden típicamente de dos a cinco gases. El analizador de dos gases solamente mide HC y CO. El analizador de cuatro gases mide HC, CO,  $\text{O}_2$  y  $\text{CO}_2$ . Un analizador de cinco gases también mide  $\text{NO}_x$ , además de los 4 mencionados. El HC y  $\text{NO}_x$  se miden en partes por millón (ppm). Los gases CO,  $\text{CO}_2$  y  $\text{O}_2$  se miden como un porcentaje del volumen.

Actualmente existen diversos tipos de sistemas para análisis de gases de escape. Para una determinación cuantitativa de los componentes de gases de escape del automóvil, los métodos de medición y los instrumentos de medición están basados en las diferentes propiedades físicas o fisicoquímicas de las moléculas de cada uno de los gases producidos.

Los métodos de medición más importantes se listan a continuación:

- Espectroscopia de absorción
- Métodos de quimiluminiscencia
- Métodos de Ionización
- Métodos electroquímicos
- Cromatografía
- Espectrometría de masas

En el presente trabajo sólo trataremos dos métodos de medición, que son los más utilizados para vehículos ligeros a gasolina según la normatividad vigente.

Los métodos a tratar son:

- Espectroscopia de absorción infrarroja no dispersiva, para la medición de HC, CO y CO<sub>2</sub>.
- Métodos electroquímicos para medir O<sub>2</sub> y NO<sub>x</sub>.

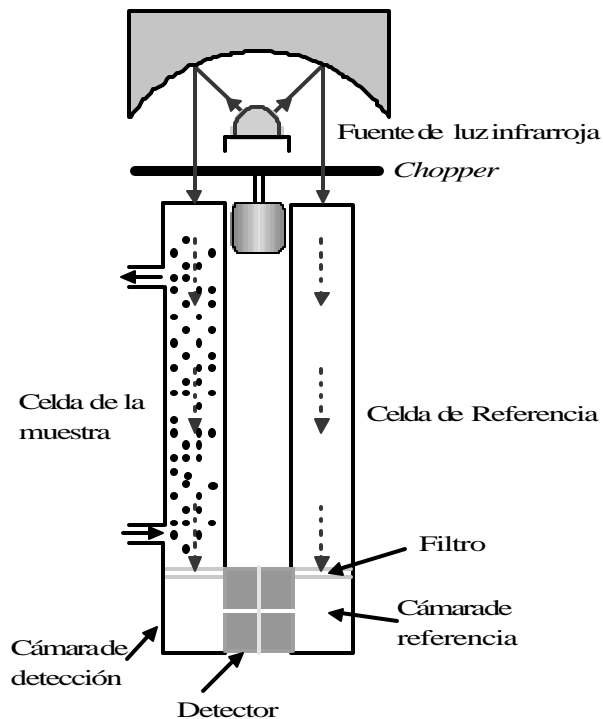
### **1.6.3.1. Espectroscopía de absorción infrarroja no dispersiva**

Muchos gases tienen la propiedad de absorber ondas de luz específicas. Es posible detectar la presencia de un gas, por medición del equivalente de la luz infrarroja absorbida en una onda particular de energía infrarroja que pasa a través de las células contenidas en la mezcla de un gas. Si un gas absorbe un espectro de luz infrarroja, y este espectro es característico y específico de dicho gas, entonces la indicación de esta absorción puede ser usada como indicación de la concentración de dicho gas. La concentración de un gas que se quiere medir puede ser expresada porcentualmente de acuerdo a la absorción de IR que pasa a través de una celda que contenga ese gas en una mezcla de gases.

El método frecuentemente usado en analizadores de gases de escape para poder medir la concentración de los gases presentes en la mezcla, consiste en hacer pasar luz infrarroja por una celda que contiene el gas y detectar la energía absorbida por cada uno de los gases con detectores apropiados, ver figura 1.26. Estos detectores consisten en un filtro óptico formado por un lente que permite solo pasar las longitudes de onda del espectro infrarrojo correspondientes al gas cuya concentración se quiere medir. Luego de este filtro, la luz es medida por un sensor óptico electrónico.

Entre la celda de medición y el emisor de infrarrojo existe un disco ranurado (*CHOPPER*) que deja pasar la luz infrarroja en intervalos irregulares, en el caso en que el analizador de

gases sea de dos gases, existe un filtro para cada uno de éstos, la celda de medición es también sometida a una temperatura que es controlada por un dispositivo.

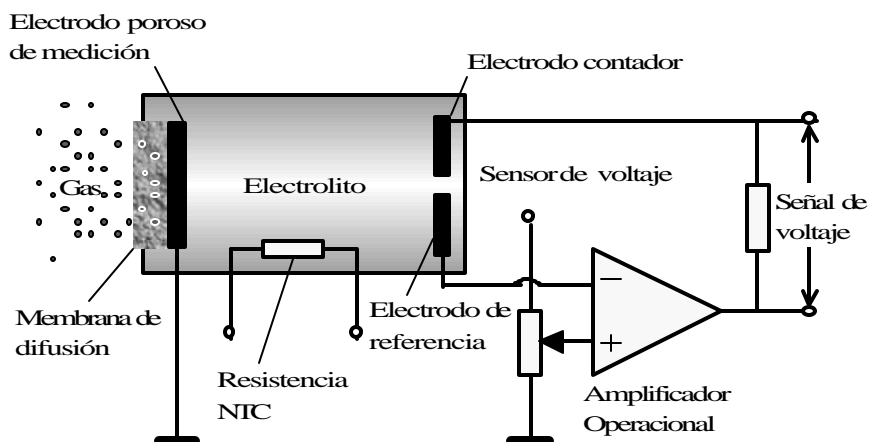


*Figura 1.26. Analizador de gases de tipo infrarrojo.*

Los sensores ópticos, así constituidos, envían señales eléctricas a circuitos electrónicos amplificadores, los cuales terminan marcando en un *display* los valores de cada uno de los gases que son medidos por estos dispositivos, o bien son transmitidos a una PC mediante comunicación RS-232.

### 1.6.3.2. Sensores Electroquímicos

Un sensor electroquímico, como el mostrado en la figura 1.27, genera una señal eléctrica proporcional a la concentración del gas a medir y básicamente consiste en un electrodo sensor (cátodo) y un electrodo contador (ánodo), separados por una delgada capa de electrolito.



*Figura 1.27. Sensor electroquímico.*

El gas en consideración se difunde a través de una membrana resistente al agua, entrando en contacto y reaccionando en la superficie del cátodo, lo que provoca un mecanismo de oxidación o reducción. Los materiales del electrodo específicamente diseñados para el gas de interés catalizan esa reacción, produciéndose iones y electrones, formando estos últimos una corriente en un circuito conectado a los electrodos del sensor. Un tercer electrodo mantiene constante el voltaje, para que la señal sea proporcional a la concentración de gas. Para compensar los efectos de la temperatura hay una resistencia de coeficiente de temperatura negativo puesta en el interior del sensor.

No todos los sensores electroquímicos tienen las mismas características de comportamiento y fiabilidad, sin embargo, las características más importantes de un sensor electroquímico son:

- Consume poca potencia, por lo que es apropiado para unidades portátiles que se alimentan a baterías.
- Comparado con otros muchos sensores es selectivo para un gas determinado. Sin embargo, algunos sensores tienen poca selectividad, dependiendo de que gas detectan.

- Su vida es normalmente corta, aunque algunos tienen una especificación de dosis de exposición al gas.

#### **1.6.4. Sistemas de verificación y control de las pruebas de emisiones**

Para mantener las emisiones vehiculares dentro de los límites fijados para garantizar el cumplimiento de los objetivos ambientales y/o de salud pública, las autoridades deben ejercer control sobre dos grandes sectores involucrados en el tema automotriz:

1. Los fabricantes de automóviles
2. Los usuarios de automóviles

Al primer grupo se les suele imponer obligaciones sobre la tecnología que emplean para la fabricación de los autos, de manera que cuando estos salen de la fábrica, se pueda tener garantía de que técnicamente hablando, sus modelos de autos que salen al mercado son capaces de cumplir con los límites de emisiones establecidos. Al segundo grupo en cambio, se les suele imponer obligaciones sobre el mantenimiento que deben darle a sus vehículos de manera que se pueda tener garantía de que a lo largo de su vida útil, estos funcionen adecuadamente, tal como fueron diseñados, para que sus emisiones de escape permanezcan dentro de los límites establecidos.

Las autoridades han tenido que idear sistemas de verificación y control para asegurarse de que sus regulaciones se cumplen de manera efectiva. Estos sistemas son llamados Sistemas Homologación o Sistemas de Certificación en el caso de los autos nuevos, y Sistemas de Inspección y Mantenimiento (I/M) en el caso de los autos en circulación, y los dos operan bajo el principio de someter a los autos a procedimientos metódicos de prueba en los cuales se miden sus emisiones de escape bajo condiciones específicas de funcionamiento del motor.

En los siguientes apartados se presentan los fundamentos de los Sistemas de Homologación y de los Sistemas de Inspección y Mantenimiento, incluyendo sus

principales procedimientos de prueba, es decir, los más empleados y aceptados en la mayoría de países.

#### **1.6.4.1. Sistemas de homologación**

Los procedimientos de prueba empleados en la homologación de los niveles de emisión de vehículos se clasifican en dos grandes grupos que son:

- Procedimientos de prueba para vehículos pesados.
- Procedimientos de prueba para vehículos livianos.

Los procedimientos de prueba para vehículos pesados se diferencian fundamentalmente de aquellos empleados en los vehículos livianos, en el hecho de que en los primeros no se monta el vehículo en un dinamómetro de chasis, sino que se quita por completo el motor y se coloca en un dinamómetro de motor. El resto del procedimiento es básicamente el mismo: se recolectan los gases de escape en un sistema de volumen constante, se diluyen y enfrían y se introducen en el analizador electrónico que dará el resultado en masa de cada contaminante por distancia recorrida.

En ambos casos se miden los siguientes parámetros: CO, HC, NO<sub>x</sub>, CO<sub>2</sub>, y O<sub>2</sub>, y en el caso de los vehículos a diesel, adicionalmente se miden partículas, y en algunas pruebas opacidad. La medición de NO<sub>x</sub> implica que todas las pruebas de emisiones serán pruebas dinámicas.

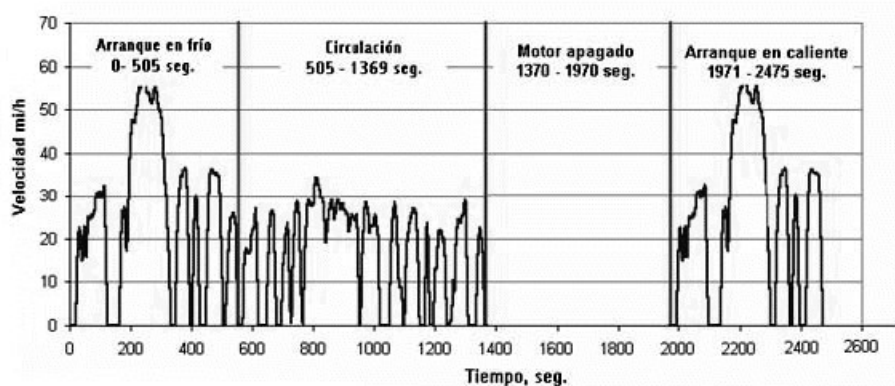
Para vehículos livianos, los ciclos de manejo utilizados en Japón, Estados Unidos y la Unión Europea son: el ciclo 10-15, el LA4 en la prueba FTP 75, y el ECE 15 + EUDC, respectivamente. De estos tres el ciclo 10-15 de Japón es el menos difundido pues además de Japón mismo, solamente algunos países en el este asiático lo utilizan. El resto de los países, con muy pocas excepciones, utilizan el ciclo estadounidense o el europeo.

Desde luego, para vehículos pesados también existen diferentes ciclos de manejo, siendo también los más utilizados aquellos creados en Estados Unidos, La Unión Europea y Japón, que respectivamente son llamados Heavy-Duty US Transient Cycle, la

combinación European Stationary Cycle - European Transient Cycle – European Load Response (ESC-ETC-ELR), y el ciclo de 13 modos.

### ***Prueba FTP 75***

La prueba FTP 75 es empleada en los Estados Unidos para la certificación de las emisiones de vehículos livianos, empleando el ciclo de prueba conocido como LA4, que simula una ruta urbana con rangos de velocidad que oscilan entre 0 y 91.2 km/hr, una duración de 2,475 segundos (41 minutos con 15 segundos) y 17.77 km recorridos, durante los cuales se pueden distinguir cuatro diferentes etapas: una de arranque en frío (después de mantener el motor apagado por un mínimo de 12 horas), otra de circulación a temperatura estabilizada, otra con el motor apagado, y la última de arranque en caliente (después de enfriar durante sólo diez minutos). Durante cada una de las etapas de circulación, hay períodos en los que el vehículo se está acelerando, otros en los que se va a velocidad constante, otros frenando y otros en los que permanece en neutro (simulando los altos en los semáforos). En la figura 1.28 se puede observar el ciclo LA4, en la prueba FTP 75, como una gráfica de la velocidad en función del tiempo transcurrido de la prueba.



***Figura 1.28. Ciclo de manejo LA4 en la prueba FTP 75.***

Las emisiones de escape a lo largo de este recorrido se diluyen, enfrían en un sistema de volumen constante y se recolectan en bolsas para cada una de las fases de circulación por



separado. Posteriormente son analizadas por el equipo de medición y finalmente se obtiene un resultado promedio para cada fase en gramos de contaminante emitido por kilómetro recorrido.

La velocidad máxima que alcanza este ciclo es de 91.2 km/h, la cual es más baja de la que la mayoría de autos emplea en las carreteras; por otra parte, también las aceleraciones y cargas que emplea son más bajas de las existentes en condiciones reales. Esto se debe a que el ciclo fue creado a principios de la década de 1970, cuando la capacidad de los dinamómetros para soportar condiciones extremas era muy limitada; y así mismo, el uso de aire acondicionado en los autos, que supone una carga significativa para el motor, tampoco estaba tan difundido en esa época como lo está ahora.

Actualmente las condiciones han cambiado, y a partir de los autos modelo 2000, es obligatorio en Estados Unidos adicionar dos pruebas complementarias para incluir las emisiones producidas a altas velocidades, bajo aceleraciones violentas, fluctuaciones rápidas de velocidad y las producidas cuando se utiliza el aire acondicionado. Los ciclos en mención son el Supplemental Federal Test Procedure US06 (SFTP-US06) y el Supplemental Federal Test Procedure SC03 (SFTP-SC03). El SFTP-US06 representa las condiciones de manejo a altas velocidades, aceleraciones bruscas y con fluctuaciones rápidas; es un recorrido de 12.8 km. con una duración de 596 segundos y una velocidad máxima de 129 km/h. El SFTP-SC03 representa las condiciones de manejo con el aire acondicionado del auto encendido; es un recorrido de 5.8 km con una duración de 596 segundos, una velocidad máxima de 88.2 km y una temperatura ambiente de 35°C.

#### **1.6.4.2. Sistemas de Inspección y Mantenimiento**

Imponer regulaciones y controles a los fabricantes de vehículos puede lograr que los vehículos nuevos cumplan con límites estrictos de emisión de contaminantes durante un tiempo, pero debe recordarse que el deterioro que sufren los autos debido a su uso normal, provoca que ciertas partes del motor se desgasten y que la eficiencia de la combustión disminuya, o bien que los sistemas de control de emisiones con los que esté

equipado el vehículo se deterioren, siendo el resultado de ambos casos que las emisiones de contaminantes aumentan.

Para lograr entonces que el auto cumpla con los límites de emisiones no sólo cuando está nuevo, sino también durante toda su vida útil, es necesario someterlos periódicamente a un mantenimiento adecuado de acuerdo a las especificaciones del fabricante. Esta responsabilidad recae directamente sobre el propietario de cada vehículo, por lo cual se vuelve necesario imponer regulaciones y controles también a estos, para garantizar que efectivamente mantienen sus autos en condiciones tales que cumplan con los límites de emisiones.

Un Sistema de Inspección y Mantenimiento (I/M) tiene entonces como objetivo fundamental identificar dentro de la flota de autos en circulación, a aquellos que por desajustes o problemas mecánicos en el motor o por mal funcionamiento en los sistemas de control de gases de escape, están descargando a la atmósfera cantidades de contaminantes mayores a los permitidos por la ley. Una vez identificados, estos autos pueden ser obligados a someterse a las reparaciones necesarias.

Las pruebas de emisiones de gases empleadas en los sistemas I/M se basan en el mismo principio que las empleadas en los sistemas de homologación, es decir, en recolectar los gases de escape del vehículo e introducirlos en un equipo analizador de gases que determinará la concentración de cada contaminante. Sin embargo, el objetivo que persiguen las pruebas en ambos sistemas es completamente distinto y sobre esta base han sido diseñadas en forma diferente.

En los sistemas de homologación se desea comprobar si el vehículo, cuando salga de la fábrica, será capaz, técnicamente hablando, de cumplir con los límites de emisiones de contaminantes establecidos. Para ello las pruebas se diseñan de manera que representen todas las posibles condiciones de manejo que el auto tendrá que enfrentar en la calle y de allí que se requiera siempre de pruebas dinámicas con ciclos de manejo complejos y con tiempos de duración relativamente largos. Sin embargo, estas pruebas no se les aplican a todos los autos que son fabricados, sino que se seleccionan muestras por lotes de acuerdo

a algún sistema estadístico de control de calidad, y así se certifican lotes enteros de un modelo determinado.

En los sistemas I/M en cambio, el objetivo que se persigue es identificar a los autos que por falta de un mantenimiento adecuado, ya no cumplen con los límites de emisiones. En este caso es necesario aplicarle la prueba absolutamente a todos los autos en circulación, por consiguiente se busca que la prueba sea sencilla, que no requiera de equipo caro y sofisticado y que sea de corta duración.

Para satisfacer estos requisitos se eliminó, en la mayoría de las pruebas para sistemas I/M, la necesidad de recolectar todos los gases de escape en el complicado sistema de recolección, dilución y enfriamiento a volumen constante que emplean las pruebas en los sistemas de homologación. En sustitución se emplea una sonda que recolecta sólo parte de los gases de escape y las introduce directamente en el equipo analizador; como consecuencia de esto, los resultados ya no se obtienen en gramos de contaminante por distancia recorrida, sino que directamente en concentración.

Otra variante importante ocurre con los vehículos pesados. Como es lógico suponer, resulta imposible desmontar el motor de cada autobús y camión en circulación para colocarlo en un dinamómetro de motor y hacer la prueba; por consiguiente se utiliza también una sonda en el escape que lleva los gases directamente al analizador.

En los siguientes apartados se verán en detalle los principales procedimientos de prueba de emisiones de gases empleados alrededor del mundo en los sistemas I/M.

#### *Prueba Ralentí – Ralentí Elevado*

Esta es una prueba estática para vehículos con motor a gasolina, que conlleva la medición de CO, HC y CO<sub>2</sub> en los siguientes modos de operación del motor:

- A su velocidad normal de ralentí (1000 rpm).
- A una velocidad mayor de 2000 y menor de 3000 rpm.

En muchos países se exige, antes de realizar la prueba, un preacondicionamiento del motor que consiste en operarlo durante un breve período en ralentí a rpm elevadas. El tiempo y las rpm empleados dependen de las regulaciones de cada país, pero por b general oscilan entre 30 segundos a un minuto, y 2500 a 3000 rpm.

La prueba básicamente consiste en introducir una sonda en el escape del motor, succionando parte de los gases para llevarlos al equipo analizador, el cual arroja resultados en concentración expresados en partes por millón para los HC, y en porcentaje en volumen para el CO y el CO<sub>2</sub>. La duración total de la prueba puede oscilar entre uno y diez minutos dependiendo del preacondicionamiento.

Hasta la fecha esta prueba es la más utilizada en los sistemas I/M alrededor del mundo, debido principalmente a que son muy rápidas de ejecutar, muy sencillas y muy baratas. En los autos carburados, esta prueba puede detectar en forma efectiva el mal funcionamiento del sistema de preparación de mezcla y en general son un indicativo de la eficiencia con la que opera el motor, ya que si emiten demasiados contaminantes en su etapa de ralentí y ralentí elevado, con toda seguridad lo harán en cualquier otra etapa de su funcionamiento.

Ahora bien, el inconveniente de esta prueba surge con los autos equipados con sistemas de inyección electrónica y catalizador de tres vías. En este tipo de vehículos, los excesos de emisiones de contaminantes ya no se deben sólo a la mala regulación de la mezcla, sino que pueden ser provocados también por un mal funcionamiento en componentes como el sensor de oxígeno y el catalizador. Este último componente en particular, es capaz de funcionar en forma muy eficiente con bajos flujos de emisiones (propios de la etapa de ralentí) aun cuando se encuentre vencido, y sin embargo emitiría grandes cantidades de contaminantes en otras etapas de funcionamiento del motor que no son consideradas en esta prueba, y que sólo podrían ser medidas en pruebas dinámicas.

Otra desventaja de esta prueba es que las emisiones de NO<sub>x</sub> en la fase de ralentí son insignificantes, pero no lo son en las otras etapas de funcionamiento del motor; de tal forma que la prueba ralentí – ralentí elevado resulta inadecuada para la medición de este

contaminante, y tendría que complementarse con la realización de pruebas dinámicas para poder incluirlo en el sistema I/M.

### *Prueba de Aceleración Libre*

Esta es una prueba estática aplicada a los vehículos con motor a diesel y consiste en acelerar el motor con la transmisión en neutro hasta su máxima velocidad y luego desacelerarlo hasta su velocidad de ralentí. Durante todo este proceso, una sonda en el escape lleva parte de los gases hasta un equipo que mide la cantidad de hollín en las emisiones.

El equipo de medición puede emplear dos métodos diferentes: el método Bacharach, y el método de opacidad. En el primero se hacen pasar los gases a través de un filtro de color blanco; el hollín, al quedar retenido en el filtro, deja una mancha oscura en éste, que luego se compara visualmente con un patrón de referencia e indica la cantidad de hollín en una escala llamada Bacharach. Una variante de este método es el método de Bosch, que también emplea filtros, pero con la diferencia de que la lectura se hace con un aparato fotoeléctrico que mide el grado de oscuridad en el filtro y arroja un resultado numérico de acuerdo a un patrón de comparación interno del equipo de lectura.

En el método de opacidad en cambio, se hace pasar parte de los gases a través de una cámara dentro de la cual se emite permanentemente un rayo de luz; los gases bloquean en cierta medida la transmisión de la luz, y la atenuación de esta transmisión es expresada en porcentaje de opacidad, siendo 0% de opacidad cuando el rayo de luz pasa sin ningún obstáculo, y 100% cuando el rayo de luz es bloqueado completamente por el humo. De las tres variantes mencionadas para esta prueba, el método de opacidad es el más aceptado y empleado en los sistemas I/M, debido principalmente a que puede tomar en consideración en su medición a las partículas de aceite que hay en los gases de escape (y que provocan refracción en el rayo de luz); cosa que no pueden hacer los otros dos métodos, pues el aceite únicamente moja los filtros, pero no los vuelve más negros.

Independientemente del método empleado, la prueba de aceleración libre es actualmente la más difundida en los sistemas I/M para la medición de vehículos a diesel; la razón

principal es que es muy rápida de ejecutar, muy barata y muy sencilla. Las desventajas son primero que no mide  $\text{NO}_x$ , que es un contaminante muy importante en este tipo de vehículos, y segundo que es una prueba estática, y por consiguiente no dice nada sobre las emisiones del vehículo cuando su motor funciona con carga completa, como es común que lo hagan los vehículos a diesel.

### *Prueba ASM*

Considerando las limitaciones que presentan las pruebas estáticas para representar otras condiciones de operación del motor, se ha intentado buscar una prueba dinámica que fuera lo suficientemente sencilla y lo suficientemente corta para poder ser aplicada en los sistemas I/M. La mayoría de las pruebas creadas con este fin han tomado como base la FTP 75 e intentan de alguna manera representarla, midiendo su éxito a través de un coeficiente de correlación con ésta. Una de estas pruebas es la de Modo de Aceleración Simulada (ASM, por sus siglas en inglés), que es una prueba dinámica en estado estable para vehículos livianos empleada en los sistemas I/M de varios lugares como los estados de Arizona y Florida en Estados Unidos.

La prueba funciona operando el auto sobre un dinamómetro de chasis a velocidad y carga constantes, durante un período mínimo de 30 segundos durante los cuales se efectúa la medición de los contaminantes CO, HC y  $\text{NO}_x$  en concentración, sin necesidad del sistema de recolección a volumen constante que utilizan las pruebas de homologación. El aparato de medición relaciona luego dicha lectura de concentración con el "desplazamiento" realizado por el vehículo para estimar el resultado en unidades de masa por distancia recorrida.

Existen dos modalidades de esta prueba: la ASM2540 y la ASM5024. En la primera, el vehículo se corre a una velocidad constante de 40 km/hr con el dinamómetro ajustado para que alcance un 25% de la aceleración máxima alcanzada en la FTP. En la segunda, el vehículo se corre a 24 km/hr con el dinamómetro ajustado para que alcance el 50% de la aceleración máxima alcanzada en la FTP. Al uso combinado de las dos modalidades se le ha llamado prueba ASM2.

La duración de la prueba ASM2 es de aproximadamente 10 minutos, y el equipo que requiere es relativamente sencillo; sin embargo, para aumentar el grado de correlación con la FTP, algunas agencias estatales en Estados Unidos han considerado la posibilidad de medir directamente en masa por distancia recorrida, para lo cual le adaptan a esta prueba un sistema de recolección de gases a volumen constante, haciéndola más cara y complicada de lo que se pretendía originalmente, aunque también más exacta y cercana a la FTP.

#### *Prueba IM240*

Esta es una prueba dinámica en estado transitorio con un ciclo de manejo que pretende representar las condiciones de manejo de la FTP 75, pero en un período de tiempo significativamente más corto. Para ello se tomaron como base los primeros 240 segundos de la prueba FTP, con etapas de aceleración, frenado, velocidad constante y períodos con la marcha en neutro. El dinamómetro empleado es de carga variable y con ruedas volantes para simular el efecto de la inercia, y también se emplea el colector de gases a volumen constante y analizadores de alta precisión con los que se obtienen los resultados en masa por distancia recorrida.

Esta prueba proporciona un grado de correlación bastante alto con la FTP 75, con coeficientes que oscilan entre 0.89 y 0.97 para los tres contaminantes; valores superiores a los que se obtienen con la ASM. El inconveniente que presenta esta prueba para ser aplicada en los sistemas I/M es el elevado costo del equipo que se utiliza.

#### *Prueba para el control de emisiones evaporativas*

Para aquellos autos equipados con sistemas de control de emisiones evaporativas, se han desarrollado dos pruebas sencillas que se pueden aplicar en los sistemas I/M. El sistema de control de vapores consiste en un filtro de carbón activado llamado "Canister" que va conectado al sistema de ventilación del tanque de combustible y que retiene los vapores, purgándolos luego hacía el motor. El objetivo de la prueba de emisiones evaporativas es verificar que efectivamente el canister esté realizando esa labor de manera eficiente.

El procedimiento propuesto por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (USEPA, por sus siglas en inglés) consiste en desconectar la línea de vapor que va del tanque de combustible al canister, e inyectarle nitrógeno, para asegurarse que el sistema mantiene la presión y efectivamente retiene las emisiones evaporativas. La línea del canister al motor también se desconecta y se le instala un medidor de flujo, determinando así si la purga funciona.

La desventaja de esta prueba es el hecho mismo de desconectar líneas cuando se está un ambiente en el que se inspecciona un alto volumen de vehículos, pues existe mucho riesgo de introducir accidentalmente problemas en los autos, especialmente porque la ubicación de estas líneas de vapor y del canister es distinta en cada marca y modelo de vehículo, y en algunos es bastante inaccesible.

Hasta la fecha esta prueba ha sido implementada únicamente en programas piloto de sistemas I/M mejorados, con resultados no muy alentadores, pues se ha encontrado que cerca del 35% de los autos revisados no han podido ser sometidos a la prueba debido a la ubicación inaccesible del canister.

#### *Inspección visual del vehículo*

Independientemente del procedimiento de prueba que se seleccione para el sistema I/M, existen varios aspectos del vehículo que deben verificarse visualmente, antes de iniciarlo; esto se refiere a la existencia o el adecuado funcionamiento de algunos de sus componentes directamente relacionados con el control de emisiones y son los siguientes:

- El filtro de aire. Debe verificarse que no falte.
- El Tubo de escape. No deben existir fugas o daños.
- El tapón de combustible. No debe faltar.
- La ventilación positiva del cárter. Debe estar conectada.



- La velocidad de ralentí. Debe ser la correcta de acuerdo a las especificaciones del fabricante.
- El convertidor catalítico. No debe faltar (cuando corresponda).
- La presión de las llantas. Debe ser la correcta (en el caso de las pruebas dinámicas).

Si alguna de estas condiciones no se cumple, la prueba no debería ejecutarse ya que con seguridad el auto no aprobará.

#### *Equipos de medición a distancia*

A diferencia de todas las pruebas mencionadas anteriormente, con estos equipos el vehículo puede estar circulando en una carretera mientras se efectúa la medición, sin necesidad de estar conectados entre sí.

El sistema funciona midiendo las emisiones de hidrocarburos, CO y CO<sub>2</sub>, utilizando el principio de absorción mediante rayos infrarrojos. Un equipo emisor de dichos rayos se coloca a un lado de la carretera y un receptor al otro, de manera que el haz de luz infrarroja atraviese la calle a lo ancho. El receptor está conectado a una computadora que efectúa una medición continua de los contaminantes, y cuando el vehículo pasa y sus gases de escape atraviesan el rayo, detecta el cambio de concentración de las sustancias y hace una comparación de esa lectura con los niveles esperados para una combustión ideal y con los niveles medidos antes del paso del auto, calculando así el nivel de contaminantes en sus emisiones.

Paralelo a esto, el sistema cuenta con un radar para medir la velocidad del vehículo, factor muy determinante en la medición puntual del nivel de sus emisiones. También cuenta con una cámara de vídeo que permite, en forma simultánea a la medición de gases, grabar el número de matrícula del vehículo, haciendo posible que posteriormente las autoridades puedan contactar a los propietarios de los vehículos que no pasen la prueba.

Este sistema se encuentra aún en una fase experimental, y a pesar de que promete grandes beneficios, aun no ha sido puesto en funcionamiento por ninguna autoridad reconocida de medio ambiente. La razón principal de esto es que posee un nivel de incertidumbre en las mediciones demasiado alto en comparación con mediciones realizadas con equipo tradicional. En estos últimos, se miden las emisiones del motor en diferentes etapas controladas de aceleración, pero no así con el equipo remoto, que hace una medición puntual en un estado de aceleración que podría considerarse aleatorio.

En definitiva los equipos de medición a distancia, aún cuando se mejore su tecnología y con ello la precisión en las mediciones, difícilmente podrían llegar a ser sustitutos de las pruebas tradicionales en un sistema I/M, pero si podría llegar a ser un complemento estupendo como sistema de verificación y control en carretera. Esto es porque durante el período transcurrido en medio de dos inspecciones sucesivas, muchos vehículos se desajustan y vuelven a contaminar, y por lo general esto no se logra detectar sino hasta la siguiente inspección, seis meses o un año después. Esta situación se suele contrarrestar normalmente con un programa de control en carretera en el que los autos se sacan a orilla de la calle y se les efectúan mediciones con cualquiera de los equipos portátiles tradicionales. Pero de esta manera se mide apenas un pequeño porcentaje de la flota y las probabilidades de ser detectado contaminando son muy bajas. Con los equipos de medición a distancia, este problema se solucionaría en gran medida, ya que se pueden medir grandes cantidades de vehículos en relativamente poco tiempo.

#### *Los Sistemas de Diagnóstico a Bordo*

A principios de la década de 1980, la tecnología empleada en la fabricación de vehículos cambió drásticamente al introducirse los motores con sistemas de inyección y eliminarse el uso del carburador. Posteriormente surgieron los sistemas de inyección electrónica, controlados por una computadora instalada en el auto, que además ejerce control sobre otros sistemas electrónicos del vehículo, no necesariamente relacionados a las emisiones.

Con esta nueva tecnología, los fabricantes de autos también comenzaron a instalar sistemas para diagnosticar los diferentes componentes electrónicos del motor (sensores y

activadores) y poder detectar en estos mal funcionamiento y deterioro. Estos sistemas son llamados Sistemas de Diagnóstico a Bordo (OBD, por sus siglas en Inglés) y consisten en un software instalado en la computadora del vehículo, que constantemente monitorea el funcionamiento de los componentes electrónicos y avisa al conductor del vehículo, a través de una luz en el tablero de control, cuando se detecta una falla. Esta luz en el tablero únicamente indica que un componente del motor está fallando, pero no especifica cual, ni tampoco la gravedad del problema. Para saber esto es necesario llevar el auto a un taller, donde con el equipo adecuado se puede tener acceso a la computadora del auto y "leer" a través de códigos predeterminados por cada fabricante, cual componente es el que se ha detectado con fallas, y de esta manera el mecánico puede fácilmente hacer las reparaciones y cambios pertinentes.

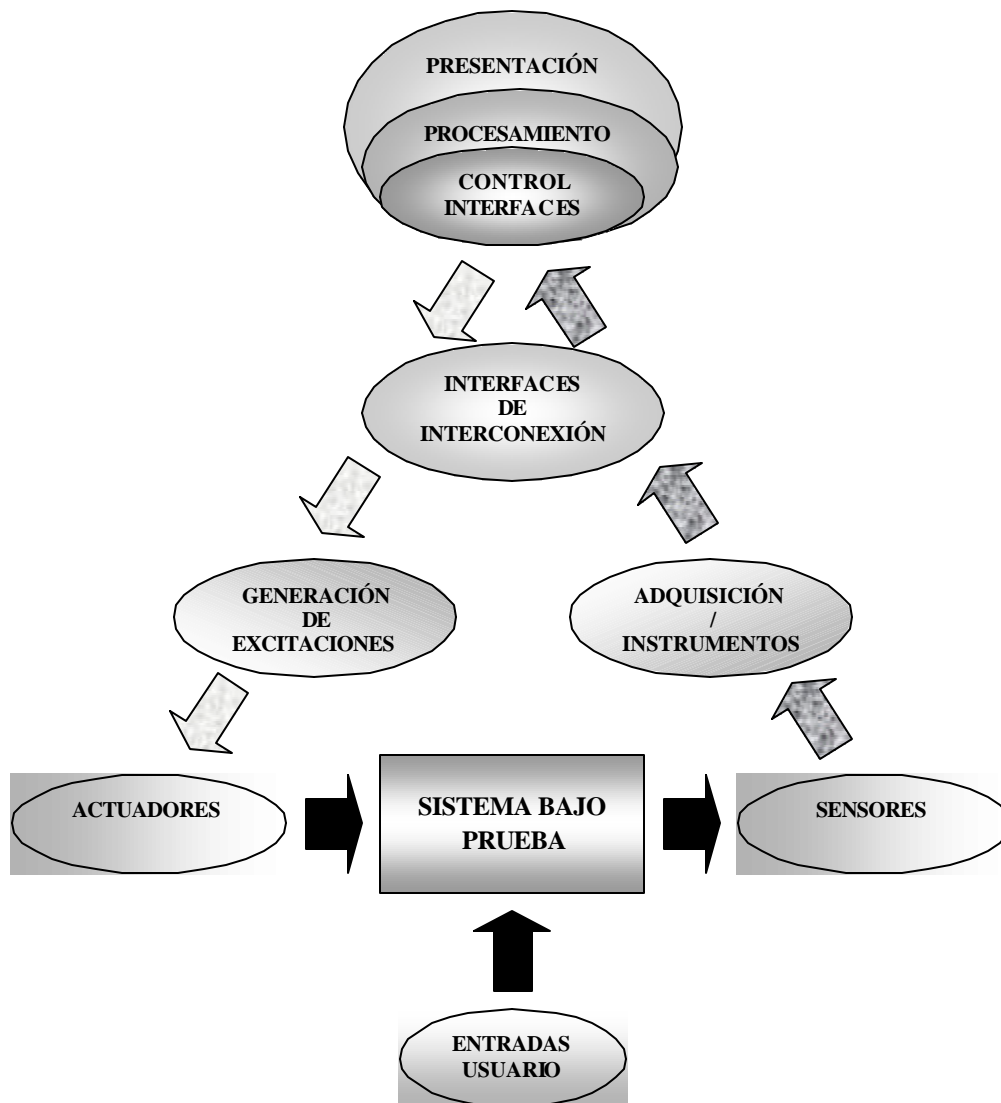
En el caso de los sistemas de control de emisiones del vehículo, los OBD son muy útiles ya que pueden detectar fallas que de otra manera pasarían desapercibidas hasta la próxima inspección de emisiones. Recuérdese que componentes como el convertidor catalítico, el sensor de oxígeno, el sistema de recirculación de gases de escape, el sistema de ventilación positiva del cárter, etc., pueden fallar sin afectar visiblemente el desempeño del motor del vehículo, o su capacidad de ser conducido de manera segura y efectiva, de tal forma que un conductor común y corriente no se percataría de un fallo de esta naturaleza, cosa que no ocurre con otro tipo de fallos.

Incorporar la revisión de los Sistemas de Diagnóstico a Bordo en los programas I/M parece ser una herramienta muy prometedora para mejorar la identificación de autos que contaminen más de lo permitido, pero requiere de personal muy capacitado en los centros de inspección, y desde luego, para que su efecto sea significativo en la calidad del aire, debe haberse renovado por completo la flota vehicular, es decir, ya no deben circular autos con tecnología de carburador, lo cual en muchos países es algo todavía muy lejano.

### 1.7. Sistemas de Instrumentación

El objetivo básico de un sistema de instrumentación es la adquisición de información del mundo físico a la mayor velocidad posible, con la mayor exactitud que se pueda obtener y con el menor costo.

En la figura 1.29 se puede ver el esquema conceptual de un sistema de instrumentación genérico.



*Figura 1.29. Esquema conceptual de un sistema de instrumentación.*

El sistema bajo prueba recibe excitaciones generadas por una serie de dispositivos e instrumentos que están conectados a él. Estas excitaciones se aplican a través de actuadores para el caso de un sistema no eléctrico. El sistema puede además recibir entradas directas del usuario. La respuesta a las excitaciones es adquirida por los elementos de adquisición. Al igual que para los generadores de excitación, estos elementos pueden ser circuitos diseñados a medida o bien instrumentos comerciales independientes.

Sin embargo, los componentes del sistema no sólo deben efectuar correctamente sus funciones individuales, sino que también deben trabajar eficazmente con los demás componentes que constituyen el sistema. Este requisito resalta la importancia de asegurar que exista la interconexión adecuada entre todos los componentes del sistema. Así una interfaz de interconexión se define como la unión de los componentes de tal modo que puedan funcionar en forma coordinada.

Los sistemas de instrumentación actuales tienen como elemento principal un microprocesador. Todo el proceso de controlar el flujo de las señales de control y adquisición de datos, el almacenamiento de la información adquirida y su posterior procesamiento y presentación es realizado por este elemento.

### **1.7.1. Instrumentación Virtual**

Mucho hemos oído hablar sobre la “instrumentación virtual” y sus beneficios. El concepto de instrumentación virtual nace a partir del uso de la computadora personal (PC) en la medición de fenómenos físicos representados en señales de corriente y/o voltaje. Sin embargo, el concepto de “instrumentación virtual” va más allá de la simple medición de corriente o voltaje, sino que también involucra el procesamiento, análisis, almacenamiento, distribución y despliegue de los datos e información relacionados con la medición de una o varias señales específicas.

El término “virtual” nace precisamente a partir del hecho de que cuando se utiliza la PC como “instrumento” es el usuario mismo quién, a través del *software*, define su funcionalidad y “apariencia” y por ello decimos que “virtualizamos” el instrumento, ya

que su funcionalidad puede ser definida una y otra vez por el usuario y no por el fabricante.

El instrumento virtual es definido entonces como el conjunto de *software* y *hardware* que se le agrega a una PC, en tal forma que permite a los usuarios interactuar con la computadora como si estuviesen utilizando su propio instrumento electrónico “hecho a la medida”. En otras palabras, un instrumento virtual es simplemente un conjunto de programas y equipos con una interfaz gráfica, que tiene la apariencia y el aspecto de un instrumento físico en el que el usuario puede manejar el instrumento a través del panel gráfico, como si fuera un instrumento real.

Cuando se ejecuta un programa que funciona como instrumento virtual, el usuario ve en la pantalla de su PC un panel cuya función es idéntica a la de un instrumento físico, lo que facilita la visualización y el control del aparato. A partir de los datos reflejados en el panel frontal, el instrumento virtual debe actuar adquiriendo o generando señales, como lo haría su homólogo físico.

Para construir un instrumento virtual, sólo requerimos de una PC, una Tarjeta de Adquisición de Datos (TAD) con acondicionamiento de señales y el software apropiado, los tres elementos clave en la conformación de un instrumento virtual, teniendo un módulo de acondicionamiento de señales como elemento opcional. Decimos que el "acondicionamiento de señales" es opcional, porque dependiendo de cada señal y/o aplicación, se puede o no requerir de la amplificación, atenuación, filtrado, aislamiento, etc.

Los instrumentos virtuales se benefician de la arquitectura abierta de los estándares de las computadoras, para ofrecer las capacidades de procesamiento, almacenamiento y visualización, mientras que las tarjetas de adquisición sirven de vehículo para incrementar las capacidades del instrumento virtual. La instrumentación virtual también puede ser implementada en equipos móviles, equipos distribuidos en campo, equipos a distancia (conectados vía radio, Internet, etc.), o equipos industriales.

En el instrumento virtual, el conjunto de software y hardware es la clave del sistema, a diferencia del instrumento tradicional, donde la clave es únicamente el *hardware*. El *software* ofrece además al usuario las herramientas necesarias para construir instrumentos virtuales y expandir su funcionalidad ofreciendo una conectividad con las enormes posibilidades de las PC y las estaciones de trabajo, y otras aplicaciones.

La flexibilidad, el bajo costo de mantenimiento, la personalización de cada instrumento, la rápida incorporación de nuevas tecnologías, el bajo costo por función, el bajo costo por canal, etc. son por algunos de los beneficios que ofrece la instrumentación virtual. Sin embargo, estas ventajas pueden llevar un costo asociado mayor que el del instrumento tradicional, además si el usuario no dispone de las herramientas adecuadas de programación para el desarrollo de la aplicación, las horas invertidas en la realización de los programas encarecerán el valor real del instrumento final.

#### **1.7.1.1. *Software* para la instrumentación virtual**

Para gestionar los diferentes pasos requeridos en un sistema de instrumentación y control, es necesario el uso de software y un entorno adecuados para realizar su programación. Dos características son exigibles al software:

- Debe ser capaz de controlar todo el sistema (instrumentos, comunicaciones, etc.).
- Debe permitir realizar un diseño personalizado del instrumento.

Así, el software de control gestiona los procedimientos de medición (enviando las órdenes que los instrumentos deben ejecutar y adquiriendo los datos medidos) y procesa los datos procedentes de los diferentes instrumentos conectados a la PC. Para disminuir el tiempo de programación necesario y reducir las dificultades de desarrollo de la aplicación, han sido creadas algunas herramientas de programación orientadas al control de instrumentación. Este conjunto de herramientas constituye lo que se denomina *software* de instrumentación virtual.

Los entornos de programación para el control de sistemas de instrumentación virtual pueden clasificarse en diversas categorías o clases según el grado de flexibilidad y facilidad de uso.

El primer grupo lo comprenden aquellos entornos que han sido desarrollados para el control de un instrumento específico o tarjeta de adquisición de datos. Permiten, mediante una interfaz de menús desplegables configurar y programar el dispositivo para la adquisición de una señal y su visualización. Permite configurar el número de canales, la ganancia y la frecuencia de muestreo de sus tarjetas y visualizar en pantalla las señales adquiridas así como salvarlas a un archivo.

En el segundo grupo están los entornos de programación lingüísticos. El acceso a las funciones para la adquisición de datos se hace a través de un determinado lenguaje de programación, este puede ser estándar (C, BASIC, etc.) o propio del entorno. Además, se dispone de librerías con funciones para el análisis y la presentación de datos. Algunos de estos entornos incorporan una interfaz gráfica de menús desplegables que permite el acceso a estas funciones para facilitar la generación del programa. Otro parámetro importante es el modo de ejecución de la aplicación final. Algunos entornos permiten únicamente la ejecución de la aplicación dentro del mismo. Tienen como ventaja las facilidades de depuración que incluyen y la simplificación de la interfaz con el *hardware* del controlador. Sin embargo, la velocidad de ejecución es mucho menor.

Algunos de los entornos más utilizados son: LabWindows y LabWindows/CVI. Estos son entornos de programación propios desarrollados en lenguaje C y Basic, con menús de ayuda para la generación de código de forma interactiva y para aplicaciones MS-DOS y MS-Windows, respectivamente, de prueba, medida y control.

Los entornos de programación gráficos forman el tercer grupo. Su aparición en el mercado es más reciente. El desarrollo de aplicaciones es totalmente diferente. Permiten crear al usuario soluciones completas uniendo íconos de una forma totalmente gráfica y según una estructura jerárquica. Una de las características más importantes de la programación gráfica es que se dispone de iconos para crear interfaces de usuario muy



similares a las de cualquier instrumento convencional. Al igual que los lenguajes de programación clásicos se dispone de múltiples tipos de datos y estructuras de programación (ciclos, condiciones, E/S, etc.) incluyendo algunos entornos un compilador gráfico para aumentar la velocidad de ejecución.

Existen en el mercado diversos paquetes de programación gráfica, no todos son iguales y deben hacerse algunas distinciones. Una diferencia básica es que algunos, como LabVIEW, son entornos que funcionan por sí solos y otros, como el Visual DAS de Keithley, son adaptaciones de entornos de programación de uso común como el Visual Basic. Otra diferencia importante a considerar a la hora de la adquisición del paquete de programación son los controladores para dispositivos, instrumentos, tarjetas de adquisición, etc., que incluyen. Algunos paquetes únicamente cubren los del propio fabricante, por lo que obligan prácticamente a utilizar su hardware.

Uno de los primeros y más conocido de los entornos de programación gráfica es el LabVIEW, que apareció en el año 1986. Las primeras versiones funcionaban sólo sobre equipos Macintosh, que eran entonces los únicos que disponían de memoria suficiente, 1 Mbyte, y de un sistema operativo avanzado. Actualmente está disponible en versiones Macintosh, PC MS-Windows y para estaciones de trabajo Sun SPARC.

En LabVIEW el usuario dispone de una completa gama de librerías de iconos para la manipulación de datos, control de flujo, interfaz de usuario (botones, gráficos, menús, etc.), tarjetas de adquisición de datos del propio fabricante y *drivers* de la mayoría de instrumentos controlables (GPIB, IEEE-488, VXI, RS-232, CAMAC) disponibles en el mercado. También pueden incluirse rutinas en lenguaje C como iconos y llamadas a funciones de librerías externas, por ejemplo DLL de MS-Windows. Permite el análisis, la presentación y el almacenamiento de datos, para la depuración de errores incluye herramientas convencionales de desarrollo de programas, de manera que podemos colocar puntos de ruptura y animar su ejecución para ver cómo los datos pasan a través del programa paso a paso.

Destacamos las siguientes librerías:

- File I/O: Guarda y recupera datos de soportes físicos.
- Analysis Measurement: Realiza todo tipo de medidas.
- Signal Generation: Simula todo tipo de señales.
- Signal Processing: Se encarga del tratamiento de señales, FFT, convoluciones...
- Filtros: Contiene todo tipo de filtros digitales.
- DAQ: Nos permite actuar sobre las tarjetas de adquisición de datos.
- Instrument I/O: Para comunicaciones vía GPIB, VXI, RS-232...
- VI: Esta librería permite utilizar otros programas realizados previamente en otra aplicación.

Los programas realizados en LabVIEW son denominamos Instrumentos Virtuales (VI) porque su aspecto y utilización imita instrumentos reales. Los VI son una interfaz interactiva para el usuario que acepta parámetros procedentes de VI de niveles superiores; ello se concreta de la siguiente manera:

La interfaz interactiva con el usuario de un VI es el panel frontal, ya que simula el panel frontal de un instrumento físico. El panel frontal puede contener botones, interruptores, gráficos y otros controles e indicadores (LabVIEW dispone ya de una serie de objetos predefinidos). Los datos son introducidos con ayuda del *mouse* y el teclado, o bien provienen de una tarjeta de adquisición de datos y los resultados son presentados en la pantalla de la PC.

Las instrucciones se proporcionan mediante el VI, elaborado en lenguaje G, cuyo resultado es un diagrama de bloques. El diagrama es una solución gráfica al problema de la programación y es también el código fuente para el VI.

Los VI son jerárquicos y modulares. Se pueden utilizar como programas principales o como subprogramas. Un VI incluido dentro de otro VI se denomina subVI. El icono y el conector de un VI trabajan como una lista gráfica de parámetros; de esta manera, otros VI pueden pasar datos a un subVI.

### **1.7.1.2. Tarjetas de Adquisición de Datos**

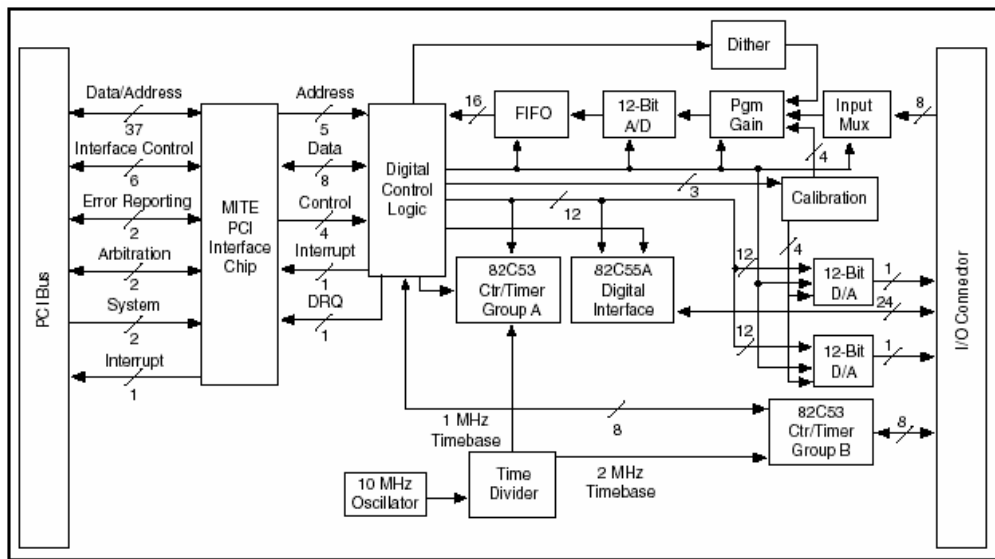
La utilización de las Tarjetas de Adquisición de Datos ha conseguido una gran aceptación en muchas aplicaciones. Se conectan directamente al *bus* de la PC y permiten adquirir y procesar datos en tiempo real.

Cada modelo de tarjeta presenta varias funciones, lo que proporciona mucha flexibilidad y operatividad para las necesidades de medida y de control. El objetivo final de esta flexibilidad es la posibilidad de poder adoptar la misma tarjeta a diferentes aplicaciones. Existe una tarjeta de adquisición de datos para casi cualquier *bus* o canal de comunicación en PC (ISA, PCI, USB, serial RS-232/485, paralelo, PCMCIA, CompactPCI, etc.), y existe un controlador para casi cualquier sistema operativo (WIN 3.1/95/98/NT/XP, DOS, Unix, MAC OS, etc.).

Una tarjeta de adquisición se caracteriza por una serie de parámetros que permiten decidir sobre su utilización. Estos parámetros son fijados por un conjunto de funciones y dispositivos internos de la tarjeta, entre los cuales destacan el número de canales de entrada y salida analógicos y digitales, los conversores analógicos a digitales, los sistemas de multiplexado y los márgenes dinámicos de entrada y de salida. Un ejemplo de una TAD es el modelo PCI-1200.

#### ***TAD PCI-1200***

La tarjeta PCI-1200, figura 1.30, es una tarjeta analógica de bajo costo multifuncional, que dispone también de temporizadores de entrada y salida.



*Figura 1.30. Diagrama a bloques de la tarjeta PCI-1200.*

Las características más relevantes de la PCI-1200 son:

- Un conversor analógico digital de 12 bits.
- 8 entradas analógicas, configurables como 8 entradas unipolares o 4 entradas diferenciales.
- Ganancia programable de 1,2,5,10,20,50 y 100.
- Velocidad máxima de muestreo de 75 kHz.
- Rangos dinámicos de entrada de 0 a 10 V o de  $\pm 5$  V.
- *Buffer* con capacidad para 512 palabras.
- Dos conversores digitales a analógicos de 12 bits.
- Posibilidad de disponer de salida unipolar (0 a 10 V) o bipolar ( $\pm 5$  V).
- Timer interno para la generación de señales.

- 24 líneas digitales de entrada/salida, compatibles con la lógica TTL y configuradas como tres puertos de ocho bits.
- Software configurable para posibilitar transferencias de entrada, salida o bidireccionales.
- Dos líneas de protocolo.
- Posibilidad de generar interrupciones.
- Tres contadores independientes de 16 bits.
- Interfaz para acceso directo a memoria (DMA, por sus siglas en inglés)

Podemos utilizar las 24 líneas TTL de entrada/salida para conmutar dispositivos externos, leer el estado de lógica digital externa y generar interrupciones, entre otros.

Pueden usarse los tres temporizadores/contadores para sincronizar acontecimientos, generar pulsos, medir frecuencia y tiempo.

Las aplicaciones de esta tarjeta pueden destinarse a ambientes industriales y académicos. Las entradas analógicas son útiles en el análisis de la señal y las medidas de voltaje DC. Los canales de salida analógicos pueden generar estímulos experimentales, señales de control de máquinas y procesos y funciones analógicas.

Una vez que se han presentado los conceptos teóricos del funcionamiento de los elementos que conforman el sistema, en el siguiente capítulo se realizará un análisis de la problemática que implica el proyecto, así como de la propuesta de solución del mismo.

## CAPÍTULO 2

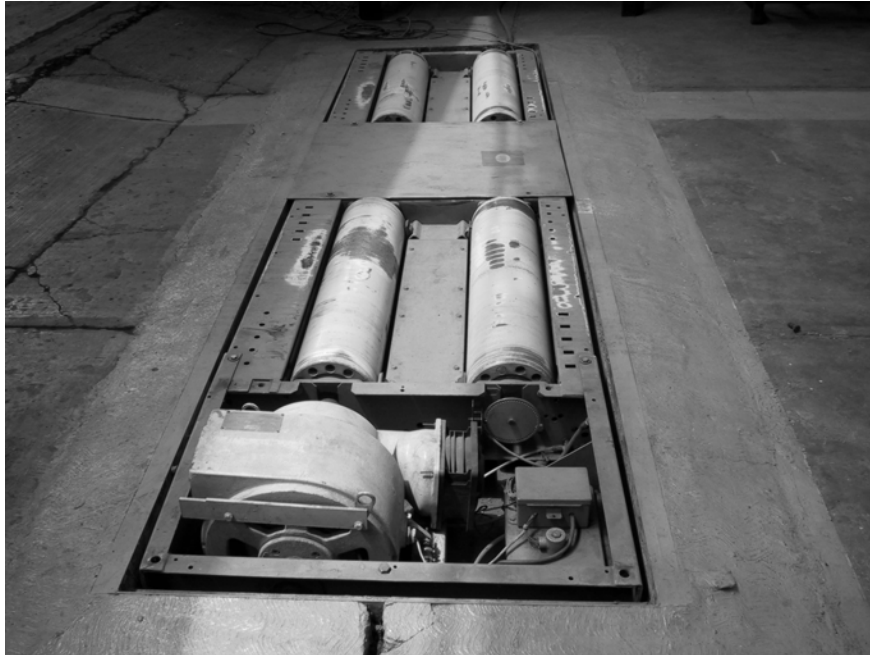
# ANÁLISIS Y DISEÑO DEL SISTEMA

Una vez establecidas las bases teóricas sobre las que se fundamenta el presente trabajo, el objetivo de este capítulo es el hacer una descripción detallada del sistema. Para tal efecto, se hará una descripción del estado inicial del equipo con que se cuenta en la empresa Control y Diagnóstico Automovilístico. Posteriormente se definirán las características del sistema a desarrollar, así como el camino a seguir para dar solución a nuestro problema. Finalmente se realizará la descripción del diseño de cada uno de los módulos tanto de hardware como de software que componen nuestro sistema.

### **2.1. Estado actual del sistema**

El sistema de instrumentación se diseñará alrededor de un dinamómetro de chasis de la marca CLAYTON, mostrado en la figura 2.1, el cual es operado en forma manual desde un gabinete de control. Cabe mencionar que el conjunto así operado no cuenta con algún tipo de dispositivo de despliegue en el cual se puedan observar los valores

correspondientes a los distintos parámetros de funcionamiento del vehículo sometido a prueba.



*Figura 2.1. Dinamómetro de chasis.*

El dinamómetro de chasis está compuesto por dos pares de rodillos metálicos de 22 cm. de diámetro. El par de rodillos delanteros se encuentra acoplado al rotor de la PAU, mientras que el trasero se encuentra completamente libre. Los rodillos se sujetan o liberan mediante unas zapatas, las cuales se accionan por medio de una instalación neumática.

La PAU del dinamómetro es del tipo de corrientes parásitas y de una capacidad de 30 BHP a 1943 rpm. La cantidad de carga aplicada por dicha unidad puede controlarse de forma manual por medio de una etapa de electrónica de potencia ubicada en el gabinete de control, sin embargo no se cuenta con un método para determinar exactamente el valor de la potencia absorbida por la PAU, ya que el brazo de dicha unidad no se encuentra conectado a ningún dispositivo de medición de fuerza, lo que impide realizar mediciones tanto de par como de potencia desarrollados por las ruedas del vehículo. Además de que no se tiene ningún dispositivo que pudiera utilizarse para medir la velocidad de giro de

los rodillos, la cual es necesaria para determinar la potencia en las ruedas del vehículo. En esta etapa del proyecto, tampoco se cuenta con el analizador de gases.

En resumen, las características originales del sistema son las siguientes:

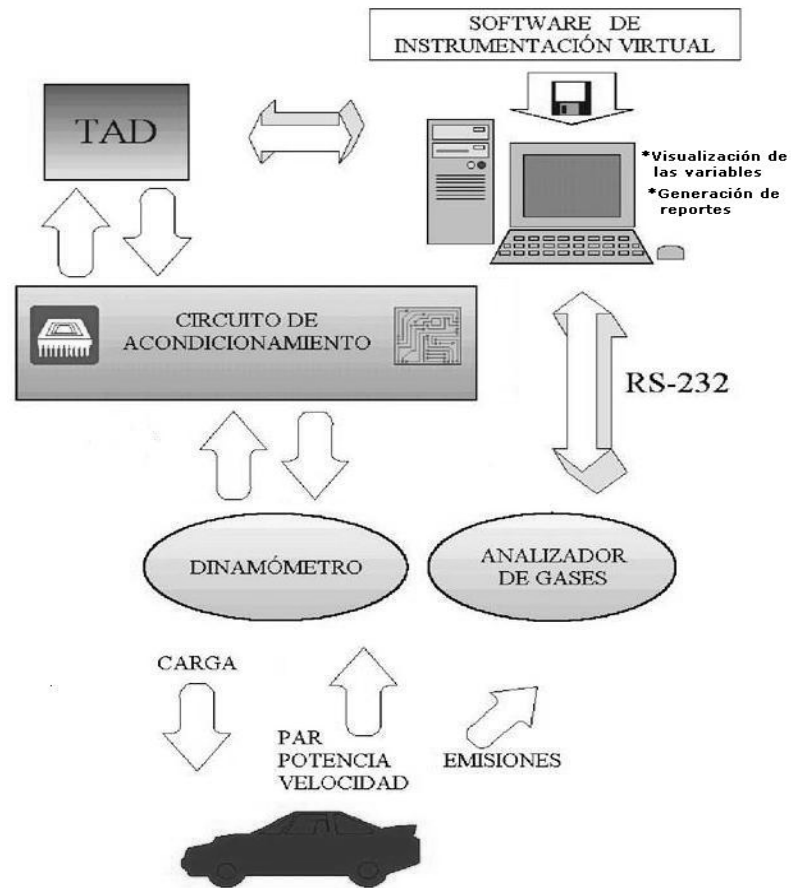
- Operación manual del dinamómetro
- No se tiene control preciso de la carga aplicada por la PAU
- Pruebas sin mediciones de par, potencia y velocidad del automóvil
- No se cuenta con el analizador de gases
- No se generan reportes de las pruebas

## **2.2. Propuesta de modernización**

Dadas las tendencias actuales de automatización en la operación de la mayoría de los procesos, el desarrollo del sistema se llevará a cabo mediante el uso de instrumentación virtual, aprovechando sus partes todavía útiles y haciendo las modificaciones necesarias al equipo para su correcta utilización en el diagnóstico de vehículos automotores.

En términos más prácticos, se busca desarrollar un sistema conformado alrededor de una computadora personal, figura 2.2, que mida algunos de los parámetros de funcionamiento de un automóvil como son el par y la potencia. Asimismo, con dicho sistema se pretende evaluar los contaminantes emitidos por el vehículo a la atmósfera.





*Figura 2.2. Esquema del sistema a desarrollar.*

### 2.3. Especificaciones del sistema

El sistema a desarrollar deberá cumplir con las siguientes características de funcionamiento:

- Parámetros a medir
  - Par y potencia desarrollados en las ruedas del automóvil
  - Velocidad del vehículo
  - Revoluciones en el motor

- Emisiones de gases (NO<sub>x</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, HC, O<sub>2</sub>)

- Parámetros a controlar

- Intensidad de la carga aplicada por la PAU del dinamómetro
- Sujeción / liberación de los rodillos del dinamómetro
- Operación del analizador de gases mediante comunicación serie RS-232

El sistema deberá contar con interfaces gráficas que faciliten su manejo por el operador; además, el equipo desplegará en pantalla los valores correspondientes a la velocidad y la potencia desarrolladas por el vehículo durante el período de prueba. También deberá mostrar cualquier mensaje de error, por ejemplo, si la velocidad o la potencia se encuentran fuera de los límites permisibles. Asimismo mostrará los valores de cada uno de los gases emitidos.

El dinamómetro debe estar equipado con un freno para los rodillos, lo que facilitará la colocación y remoción del vehículo antes y después de la prueba, para que pueda quedar imposibilitado a realizar pruebas mientras que el freno esté en sus posiciones de carga/descarga. Por otro lado, el dinamómetro debe permitir la realización de pruebas a cualquier velocidad entre 0 y 100 km/h.

La medición de los gases se hará de acuerdo al procedimiento especificado en la normatividad vigente para la Ciudad de México, para lo cual se empleará un equipo analizador para cinco gases (NO<sub>x</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, HC, O<sub>2</sub>), el cual se comunicará con la computadora personal a través del puerto serie. Además, mediante el software se programarán los ciclos de manejo adecuados para tal fin. El analizador debe tener la capacidad de medir:

- Hidrocarburos (HC) en partes por millón de Hexano (μmol/mol).
- Monóxido de Carbono (CO) en porcentaje (cmol/mol).
- Bióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>) en porcentaje (cmol/mol).

- Oxígeno (O<sub>2</sub>) en porcentaje (cmol/mol).
- Oxido Nítrico (NO) en partes por millón (μmol/mol).

En la tabla 2.1 se muestra un resumen de las especificaciones del sistema.

Parámetro	Margen de medición	Resolución	Incertidumbre
Intensidad de carga	0-19kW	0.1kW	± 2%
Velocidad del vehículo	0-100 km/h	0.1 km/h	± 1%
Par	No disponible	No disponible	± 5%
Potencia	0-25.5 BHP	0.1BHP	± 2%
Hidrocarburos	0 - 2000 ppm	1 ppm	± 3%
	2001 - 5000 ppm	1 ppm	± 5%
	5001 - 9999 ppm	1 ppm	±10%
Monóxido de carbono	0 - 10.00 %	0.01 %	± 3%
	10.01 - 14.00 %	0.01 %	± 5%
Bióxido de Carbono	0 - 16.0 %	0.1 %	± 3%
	16.1 - 18.0 %	0.1 %	±5%
Oxígeno	0 – 25%	0.1 %	±5%
Óxido Nítrico	0 - 4000 ppm	1 ppm	±4%
	4001 – 5000 ppm	1 ppm	±8%
Revoluciones del motor	0 - 10 000 rpm	1 rpm	±5%

**Tabla 2.1.** Especificaciones del sistema a desarrollar.

## **2.4. Descripción general del sistema**

En el sistema se necesita instalar un dispositivo que mida la fuerza en el extremo del brazo de la PAU del dinamómetro y un sensor de velocidad angular que vaya acoplado a uno de los rodillos, además se requiere la integración de un analizador de 5 gases.

Una vez realizado lo anterior, el diseño del sistema se desarrollará bajo dos perfiles: *hardware* y *software*. Como ya se mencionó, se pretende que el diseño del sistema se construya alrededor de una computadora personal y de una Tarjeta de Adquisición de Datos (TAD) del fabricante Nacional Instruments. De esta forma el hardware que se requiere en el sistema puede reducirse al diseño de circuitos de acondicionamiento de las señales de control y de datos provenientes de los dispositivos con que cuenta el dinamómetro para que sean adquiridos y/o controlados a través de la TAD.

La etapa de software se encargará de controlar los dispositivos del dinamómetro, así como del analizador de gases, desplegar las variables de interés y generar una base de datos con los resultados de las pruebas efectuadas. Para ello se pretende utilizar el software de instrumentación virtual denominado LabVIEW, el cual permitirá controlar la tarjeta de adquisición de datos.

## **2.5. Hardware del sistema**

El hardware del sistema se compone básicamente de cinco módulos independientes: el de control de la carga aplicada a la PAU, el de sujeción de los rodillos, el de medición de la velocidad, el de medición del par (con base en estos dos últimos se realiza el cálculo de la potencia) y el analizador de cinco gases.

### **2.5.1. Módulo de control de carga aplicada a la PAU**

Una parte muy importante del proyecto es controlar la carga aplicada a la PAU, como ya se mencionó, la PAU con la que cuenta el dinamómetro es de corrientes parásitas, la cual controla la cantidad de carga al aplicarle un voltaje de 0 hasta 45 volts de corriente directa, variando este voltaje se varía la intensidad de la carga.

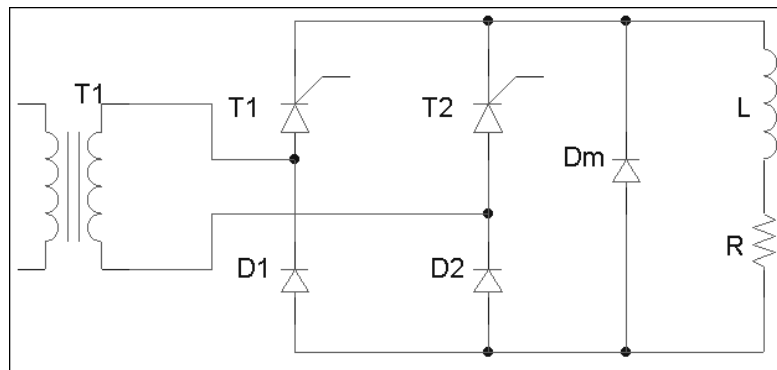
Para realizar el control de este voltaje es necesario utilizar un circuito conversor de voltaje de corriente alterna a voltaje de corriente directa. Si bien los circuitos rectificadores con diodos proporcionan un voltaje de corriente directa, para obtener voltajes de salida controlados, se utilizan tiristores, ya que es posible modificar la magnitud del voltaje de salida de los rectificadores a tiristores controlando el ángulo de disparo de los mismos. Un tiristor funcionando en esta forma se conoce como tiristor de control de fase, que se activa mediante la aplicación de un disparo en la compuerta y se desactiva mediante la conmutación natural o de línea.

Los rectificadores controlados por fase son sencillos, económicos y logran eficiencias del orden de 95%. Se conocen como conversores de CA-CD, puesto que transforman el valor de un voltaje de Corriente Alterna (CA) en un voltaje de Corriente Directa (CD).

Los rectificadores controlados utilizan los mismos esquemas que los rectificadores con diodos, si bien aquí hay que distinguir entre dos tipos:

- a. Rectificadores semicontrolados. Formados por tiristores y diodos.
- b. Rectificadores totalmente controlados. Formados únicamente por tiristores.

En este caso se utilizará un puente rectificador de onda completa semicontrolado que contiene dos SCRs y tres diodos. La disposición del circuito se muestra en la figura 2.3, en donde para su análisis se supone que la inductancia de la carga es lo suficientemente alta para que la corriente de la carga se considere continua y tenga una componente ondulatoria despreciable. Este tipo de conversores presentará un mejor factor de potencia debido a la operación del diodo de marcha libre (Rashid, 1993, p.133).



**Figura 2.3.** Diagrama general del rectificador semicontrolado.

A continuación se describe el funcionamiento de un rectificador semicontrolado de onda completa en configuración de puente.

Durante el semiciclo positivo  $T1$  está polarizado directamente. Cuando  $T1$  se dispara en  $\omega t = \alpha$ , la carga se conecta a la alimentación de entrada a través de  $T1$  y  $D2$  durante el período  $\alpha < \omega t < \delta$ . Durante el período  $\alpha < \omega t < (\delta + \alpha)$ , el voltaje de entrada es negativo y el diodo de marcha libre  $D$  tiene polarización directa, por lo que conduce para proporcionar la continuidad de corriente de la carga inductiva. La corriente de carga se transfiere de  $T1$  y  $D2$  a  $D$ , y el tiristor  $T1$  y el diodo  $D2$  se desactivan. Durante el semiciclo negativo del voltaje de entrada, el tiristor  $T2$  queda con polarización directa y el disparo del tiristor  $T2$  en  $\omega t = \delta + \alpha$ , hasta  $\omega t = 2\delta$  invierte la polarización de  $D$ . El diodo  $D$  se desactiva y la carga se conecta a la alimentación a través de  $T2$  y  $D1$ .

El voltaje promedio de salida o voltaje de corriente directa se puede calcular a partir de la siguiente expresión (Rashid, 1993, p.133):

$$V_{CD} = \frac{2}{2\pi} \int_{\alpha}^{\delta} V_M \sin \omega t d(\omega t)$$

$$V_{CD} = \frac{2V_M}{2\pi} [-\cos]_{\alpha}^{\delta}$$

$$V_{CD} = \frac{V_M}{p}(1 + \cos \alpha) \quad (2.1)$$

pudiéndose variar el voltaje de corriente directa  $V_{CD}$  desde 0 hasta  $2V_M/\delta$ , simplemente con variar  $\alpha$  entre 0 y  $\delta$ .

El voltaje eficaz de salida (o voltaje rms) se determina a partir de las siguientes ecuaciones (Rashid, 1993, p.133):

$$V_{rms} = \left[ \frac{2}{2p} \int_a^p V_M^2 \sin^2 \omega t d(\omega t) \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$V_{rms} = \left[ \frac{V_M^2}{2p} \int_a^p (1 - \cos 2\omega t) d(\omega t) \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$V_{rms} = \frac{V_M}{\sqrt{2}} \left[ \frac{1}{p} (p - \alpha + \frac{1}{2} \sin 2\alpha) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.2)$$

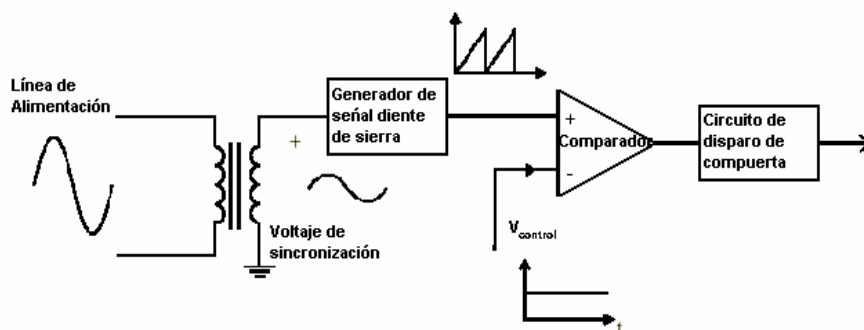
El voltaje eficaz a la salida del rectificador puede variar desde 0 hasta  $V_M/\sqrt{2}$ , simplemente con variar  $\alpha$  entre 0 y  $\delta$ .

La técnica utilizada para el disparo de los tiristores será la que a continuación se explica: una señal de referencia es comparada con una señal de entrada variable, resultado de esta comparación, el tiristor (o grupo de ellos) es conmutada hacia conducción cuando la señal de entrada ha sobrepasado la magnitud de la referencia.

Una forma de lograr lo antes dicho es mediante la derivación de una señal lineal a partir de la señal senoidal de la línea de alimentación. Si esta señal se incrementa linealmente a partir de cero desde el comienzo de un ciclo de la corriente alterna de entrada, y crece a su máximo valor cuando esta señal ha alcanzado un semiciclo, entonces la magnitud de la señal de referencia será directamente proporcional al ángulo de variación de la señal alterna, durante cada medio ciclo. De esta forma, una señal de disparo, basada en el

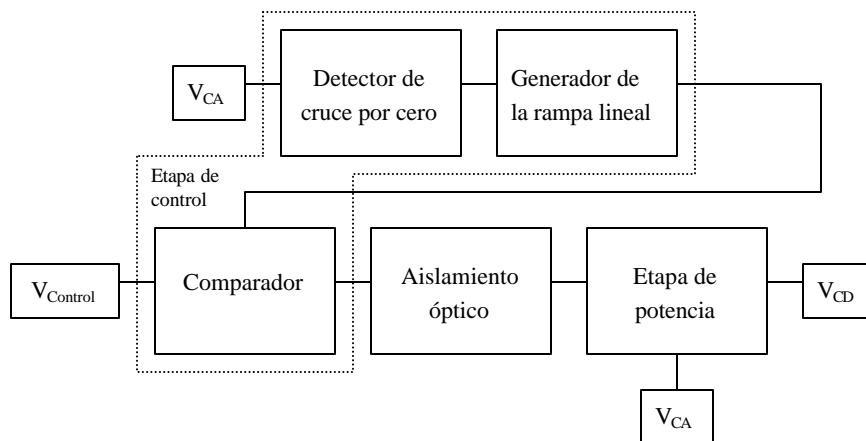
monitoreo de esta señal de referencia, podrá controlar la activación de los tiristores en una manera linealmente proporcional al periodo de la señal de alimentación.

La figura 2.4 muestra el diagrama de bloques de un circuito generador del disparo de tiristores de un rectificador semicontrolado. La señal de disparo se obtiene de la comparación entre una señal de diente de sierra sincronizada con la línea de alimentación de CA y un voltaje de control de corriente directa.



*Figura 2.4. Circuito generador de disparo en un rectificador semicontrolado.*

Los bloques que integran el circuito convertidor CA-CD completo se muestra en la figura 2.5



*Figura 2.5. Diagrama a bloques del convertidor CA-CD.*



### ***Etapa de control***

Los módulos que integran la etapa de control se encuentran enmarcados con líneas punteadas y se describen a continuación:

*Detector de cruce por cero:* Esta etapa se encarga de monitorear la señal de entrada mediante la detección del cruce de la señal alterna por la línea de referencia de cero, de tal forma que su señal de salida servirá para sincronizar la señal de alimentación y las etapas subsecuentes.

*Generador de la señal de diente de sierra:* Esta etapa consiste en un integrador, que a partir de un voltaje fijo de corriente directa genera una rampa, esta señal al estar sincronizada con la línea de alimentación, mediante el detector de cruce por cero, se volverá periódica y dará origen a una señal de diente de sierra.

*Comparador:* Consiste en la comparación de la señal producida por el integrador y una señal de control ( $V_{\text{Control}}$ ), ésta última es producida desde la PC. La señal de diente de sierra se compara con  $V_{\text{Control}}$ , de tal forma que en el momento en que la rampa supera a  $V_{\text{Control}}$ , se produce un nivel de voltaje de salida alto. La señal de control se suministra por medio de un puerto analógico de la TAD que está conectada en la PC, dicha señal tiene un valor de voltaje de entre 0 y 10 volts.

### ***Aislamiento***

La función de esta etapa es convertir los niveles de voltaje proporcionados por el circuito comparador en una conmutación de los tiristores, así como la de aislar la etapa de control de la de potencia. En este caso, consiste en un optoacoplador para cada uno de los SCR de la etapa de potencia, es decir el puente rectificador de onda completa semicontrolado.

### ***Etapa de potencia***

La etapa de potencia del módulo, para controlar la intensidad de carga aplicada a la PAU, está compuesta por un rectificador semicontrolado de onda completa, en configuración de

punto, diseñado para que se pueda obtener en sus terminales de salida un voltaje de corriente directa cuyo valor puede variar entre 0 y 45 volts.

### 2.5.2. Módulo para sujetar los rodillos del dinamómetro

Para liberar o sujetar los rodillos del dinamómetro, y así poder introducir o sacar el vehículo del dinamómetro con seguridad, se dispone de una instalación neumática que controla unas zapatas; para tener control sobre éstas se utiliza una electroválvula que al ser activada permite el flujo de aire y hace que las zapatas sujeten los rodillos del dinamómetro.

La válvula con que se cuenta opera con un voltaje de corriente directa de 24 Volts. Para que desde la computadora se pueda controlar la operación de la electroválvula, se utilizó un circuito basado en un MOSFET de potencia, el cual es controlado por una línea digital de la TAD y se muestra en la figura 2.6.

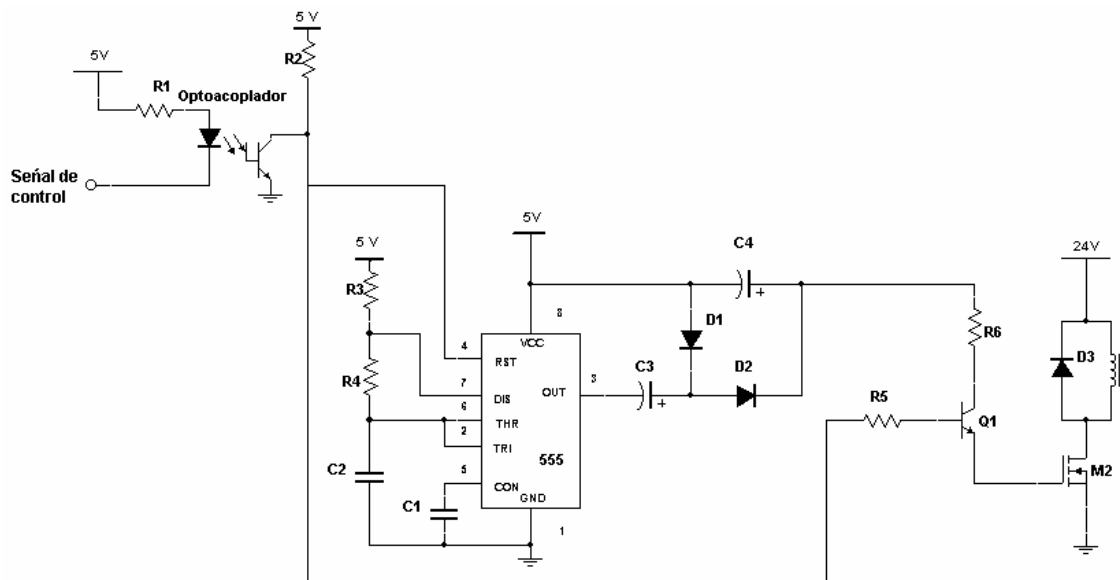


Figura 2.6. Circuito para activar la electroválvula.

El circuito mostrado permite conmutar el voltaje de 24 volts necesario para accionar la electroválvula, utilizando la señal de control de nivel TTL (5V) proveniente de un puerto digital de la TAD.

El circuito para activar la electroválvula tiene un temporizador, basado en el circuito integrado 555, configurado como multivibrador astable. El control de encendido de este multivibrador se logra utilizando la terminal de *reset* como una entrada de control. Cuando dicha terminal se encuentra en un valor de voltaje alto se producen oscilaciones; cuando el voltaje es bajo, las oscilaciones se inhiben.

La salida del circuito astable está conectada a un circuito doblador de voltaje, construido por los diodos D1 y D2 y los capacitores C3 y C4. La salida del doblador de voltaje es de aproximadamente 8.5 V.

La señal de control proveniente de la TAD se transmite a la terminal de *reset* del circuito astable a través de un optoacoplador. El optoacoplador proporciona el aislamiento entre la TAD y la electroválvula. Cuando la señal de control es alta, el diodo de entrada del optoacoplador está apagado y su transistor de salida también está apagado. Esto hace que la terminal de *reset* del oscilador se encuentre en un valor alto y el temporizador oscile, mientras que a la salida del doblador de voltaje se puede medir un voltaje de aproximadamente 8.5 V.

La salida del optoacoplador también está conectada a la base del transistor bipolar que funciona como interruptor del MOSFET, mientras que el colector está conectado a la salida del doblador de voltaje. Así, un valor alto en la señal de control, enciende el transistor y estarán disponibles aproximadamente 8V en la compuerta del MOSFET que es suficiente para encenderlo y permitir que haya una circulación de corriente a través de la electroválvula.

Por consiguiente, cuando la señal de control es alta, el MOSFET conducirá y cuando la entrada es baja, el MOSFET estará apagado.

### 2.5.3. Módulo de medición del par

Para efectos de la medición del par y determinación de la potencia aplicada al freno, se utilizó una celda de carga. La señal proveniente de la celda de carga es un voltaje proporcional a la fuerza aplicada en el extremo del brazo de la PAU, que a su vez es una medida del par.

La señal suministrada por el juego de galgas extensiométricas de la celda de carga es analógica, del orden de milivolts. Para manejar esta señal se requiere de un circuito acondicionador de señales, el cual recibe el voltaje de salida de la celda de carga y lo amplifica. En el proceso de amplificación el circuito debe rechazar el ruido y las desviaciones por temperatura que se puedan presentar en la operación del sistema.

El diseño del circuito de acondicionamiento de la señal proveniente de la celda de carga será a partir de un amplificador de instrumentación (AI), con el cual la señal entregada en milivolts se amplificará a un nivel de voltaje de 10 volts, para la máxima carga soportada por la celda (500 lb) y que así pueda ser utilizada por la TAD. Para determinar el valor de la ganancia requerida para obtener este valor de voltaje es necesario conocer el voltaje que se obtiene en la celda de carga, para lo cual se utiliza la siguiente expresión:

$$V_{SPC} = R_s * V_{ENT} \quad (2.3)$$

donde:

$V_{SPC}$  : voltaje de salida a carga máxima

$R_s$  (mV/V): es la constante de la celda de carga que nos indica el valor del voltaje de salida para la carga máxima soportada por ésta, que se puede obtener por cada volt de alimentación que se suministra a la celda de carga

$V_{ENT}$  : es el voltaje de alimentación de la celda de carga

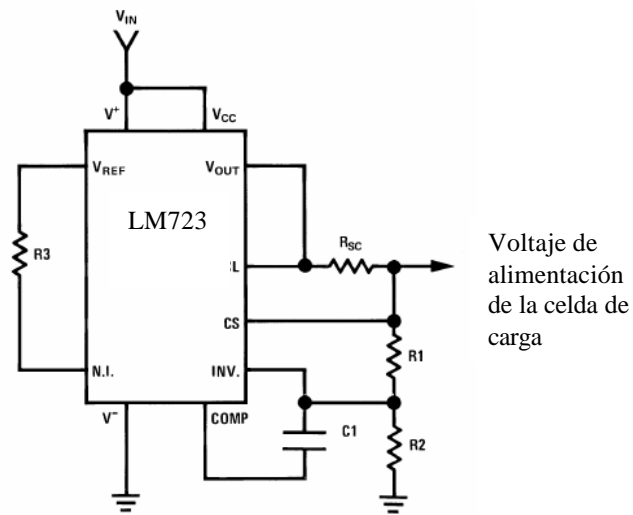
En la celda de carga se encuentra indicado el valor de la constante, que es de 3.431 mV/V, y considerando que el voltaje de alimentación será de 10 Volts, entonces el voltaje de salida para la máxima carga soportada por la celda será de 34.31 mV. Para se pueda obtener un voltaje de 10 V a la salida del circuito de acondicionamiento es necesario que la ganancia global de éste tenga un valor de 291.46.

El circuito de acondicionamiento propuesto para el módulo de medición de par se compone de los siguientes subsistemas:

- Voltaje de alimentación
- Amplificador de Instrumentación
- Amplificador de salida

*Voltaje de alimentación.* Para obtener una señal como resultado de la variación experimentada por uno o más sensores dispuestos en un puente de Wheatstone, hay que aplicar a éste una señal de alimentación o excitación. Con independencia de la naturaleza de ésta, una condición que debe cumplir inicialmente es la de permanecer estable con el tiempo, la temperatura y otros factores ambientales.

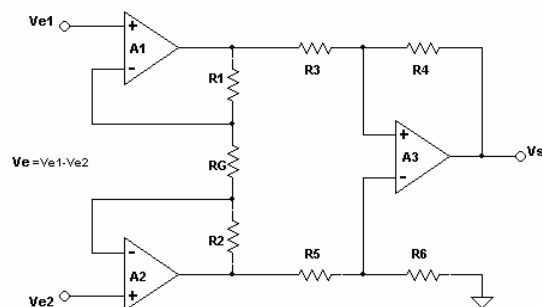
Para la alimentación del circuito puente (de tipo resistivo), que compone la celda de carga, se dispone del circuito mostrado en la figura 2.7, para el cual se utiliza un regulador de voltaje integrado y del cual se obtiene un voltaje estable de 10 V. Este voltaje se aplica a las terminales de alimentación del puente.



**Figura 2.7.** Circuito propuesto para la alimentación de la celda de carga.

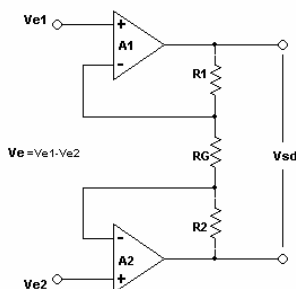
*Amplificador de Instrumentación.* El amplificador de instrumentación es ideal para su uso con celdas de carga donde se requieren una elevada exactitud y linealidad, ya que puede amplificar señales con un bajo nivel de voltaje aún en presencia de ruido o señales de modo común de un valor alto. Otra característica del amplificador de instrumentación es su alta impedancia de entrada.

La configuración más popular para un AI está compuesta por tres amplificadores operacionales y algunas resistencias, figura 2.8. Esta configuración consta de dos etapas, una preamplificadora y otra diferencial.



**Figura 2.8.** Amplificador de instrumentación.

La primera etapa del AI es un amplificador de entrada diferencial a salida diferencial, con ganancia ajustable, figura 2.9. Esta etapa está formada por A1 y A2 y además de amplificar las señales aplicadas en sus entradas tiene la función de acoplar impedancias.



**Figura 2.9.** Primera etapa amplificadora de un AI.

Del circuito de la figura se observa que la ganancia del amplificador está definida principalmente por  $R_G$ , la cual se conecta entre las terminales inversoras de los dos amplificadores de entrada, A1 y A2. Así, el voltaje diferencial de entrada ( $V_e = V_{e1} - V_{e2}$ ) se reflejará completamente en las terminales de resistencia  $R_G$  (puesto que el voltaje diferencial de entrada de cada uno de los amplificadores operacionales es cero).

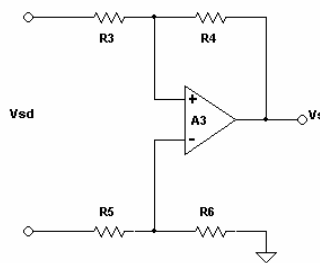
La corriente que circula a través de  $R_G$  es igual a  $V_e/R_G$ . Esta corriente circula por las resistencias  $R_1$  y  $R_2$  y el voltaje presente entre las tres resistencias define el valor del voltaje diferencial de salida de la primera etapa del amplificador de instrumentación. Por consiguiente, los amplificadores A1 y A2 operarán con ganancia y amplificarán la señal de entrada. Si las resistencias  $R_1$  y  $R_2$  son iguales a un valor  $R_f$ , entonces la ganancia de esta etapa puede ajustarse al variar solamente el valor de  $R_G$  y el valor del voltaje de salida diferencial ( $V_{sd}$ ) de la primera etapa será:

$$V_{sd} = (V_{e1} - V_{e2}) \left( 1 + \frac{2R_f}{R_G} \right) \quad (2.4)$$

Sin embargo, si un voltaje de modo común se aplica a las entradas del amplificador, los voltajes en cada lado de  $R_G$  serán iguales y no circulará ninguna corriente a través de esta resistencia. Dado que no circulará corriente a través de  $R_G$  (y, por consiguiente, a través de  $R_1$  y  $R_2$ ), los amplificadores  $A_1$  y  $A_2$  operarán como seguidores de voltaje de ganancia unitaria. Por tanto, las señales de modo común pasarán a través de los amplificadores de entrada solamente con ganancia unitaria, pero los voltajes de modo diferencial serán amplificados.

En teoría, esto significa que se puede tener ganancia de modo diferencial sin aumentar la ganancia y el error de modo común. Es decir, la señal diferencial se amplificará por la ganancia, pero el error del modo común no, por lo que la razón de rechazo en modo común (CMRR, por sus siglas en inglés) aumentará teóricamente en proporción directa a la ganancia.

La segunda etapa del amplificador de instrumentación, mostrada en la figura 2.10, corresponde a un amplificador diferencial básico, formado por el amplificador operacional  $A_3$  y las resistencias  $R_3$ ,  $R_4$ ,  $R_5$  y  $R_6$ .



**Figura 2.10.** Amplificador diferencial básico.

El voltaje de salida del amplificador de instrumentación, incluyendo la etapa del amplificador diferencial y considerando  $R_4=R_6$  y  $R_3=R_5$  será el que se indica en la ecuación 2.5:

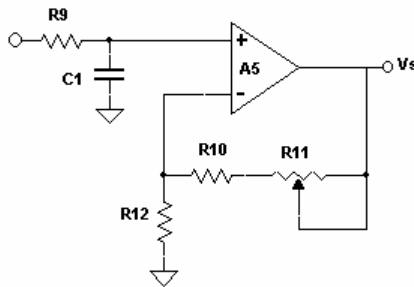


$$V_s = (V_{e1} - V_{e2}) \left( 1 + \frac{2R_f}{RG} \right) \left( \frac{R4}{R3} \right) \quad (2.5)$$

Con el objeto de balancear los voltajes de modo común que pudieran estar presentes en el circuito, la resistencia R6 debe ser variable. En algunas aplicaciones el voltaje de salida debe estar referido a un nivel de referencia u *offset* que no sea de cero volts, por lo que se debe añadir un voltaje de referencia en serie con la resistencia R6 del amplificador diferencial básico.

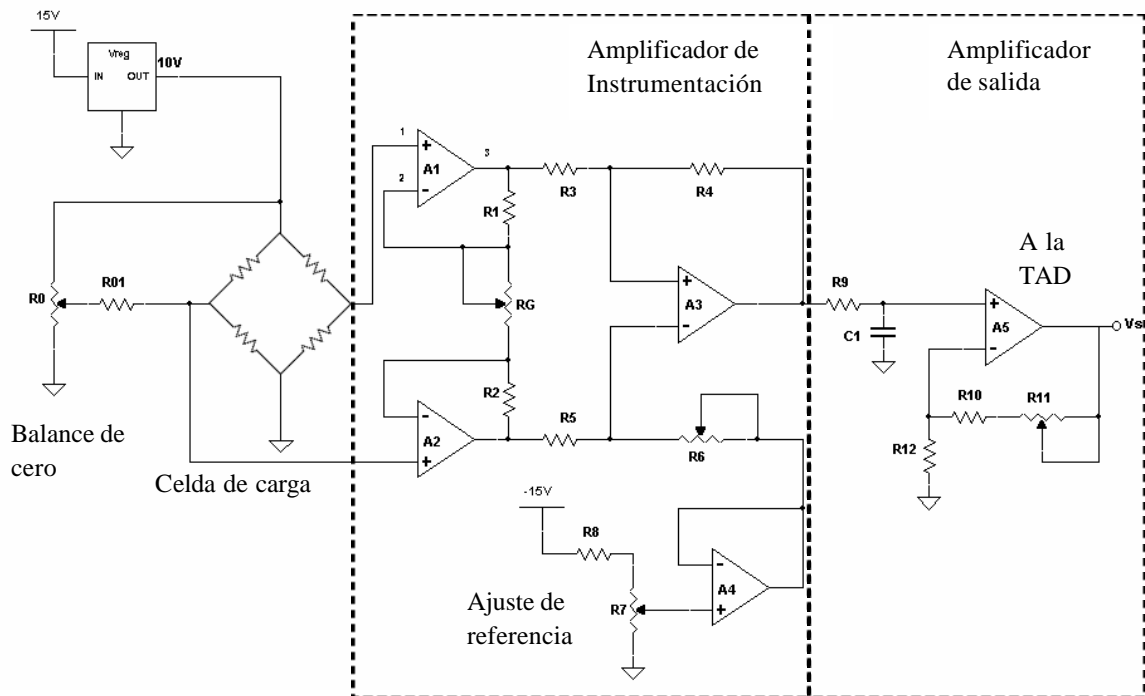
*Amplificador de salida.* La salida del AI se conecta a un filtro pasivo paso bajas formado por C1 y R9 y posteriormente a un amplificador no inversor, figura 2.11. En este circuito se ajusta también la ganancia final del sistema, la cual está dado por la ecuación 2.6:

$$A = \left( 1 + \frac{(R10 + R11)}{R12} \right) \quad (2.6)$$



**Figura 2.11.** Amplificador y filtro de salida.

El circuito propuesto para el acondicionamiento de la señal de la celda de carga es el de la figura 2.12



**Figura 2.12.** Circuito acondicionador de señal para la celda de carga.

La salida del circuito puente se conecta directamente a un amplificador de instrumentación construido en forma discreta por tres amplificadores operacionales.

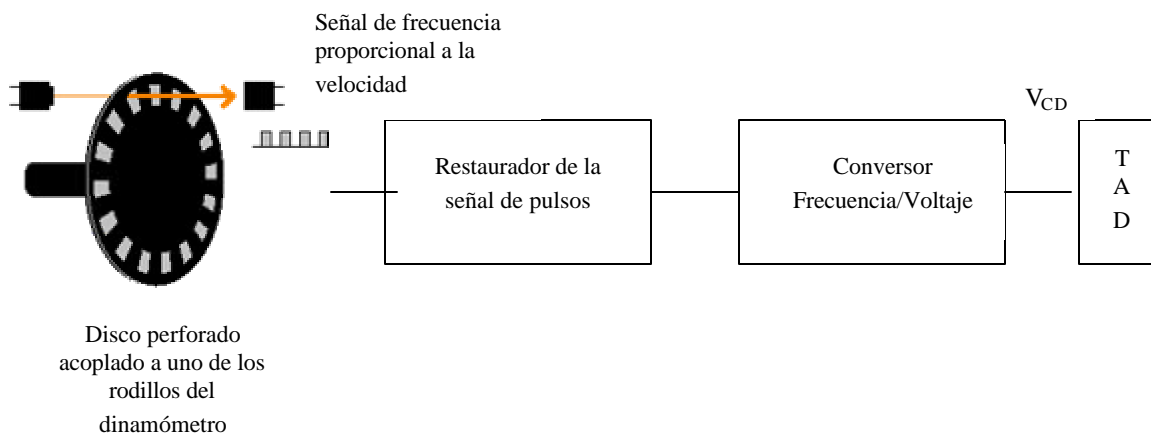
Los amplificadores A1, A2 y A3 forman el amplificador de instrumentación, cuya ganancia se puede ajustar mediante  $R_G$ . La razón de rechazo de modo común se puede ajustar mediante  $R_6$ . La ganancia está distribuida entre el AI y el amplificador de salida. Cabe comentar que entre estas etapas la señal también es filtrada.

En el circuito de acondicionamiento de la celda de carga se debe ajustar el voltaje de *offset* que se presenta a la salida de ésta. Dicho voltaje se debe a que en ausencia de carga mecánica el puente puede estar desequilibrado, además de que al colocar el brazo de la PAU para realizar la medición de la fuerza se presenta carga que no corresponde a la medición de la fuerza. Para poder ajustarlo, y considerando que en las celdas de carga no se puede ajustar el puente de resistencias, hay que sumar o restar un voltaje de corriente

directa estable a la salida del amplificador de instrumentación. Para ello se utiliza el circuito formado por A4 y las resistencias R7 y R8.

#### 2.5.4. Módulo de adquisición de la señal de velocidad

Para realizar la medición de la velocidad angular de los rodillos del dinamómetro se utilizará un tacómetro óptico, que opera según el principio de un codificador incremental. Este tacómetro consiste en un disco perforado que va acoplado al eje de uno de los rodillos, a partir del cual y con ayuda de un arreglo opto-electrónico, se obtiene un tren de pulsos con una frecuencia proporcional a la velocidad angular del rodillo, la cual es utilizada para los cálculos de potencia y velocidad del vehículo. Un diagrama a bloques de este módulo se muestra en la figura 2.13.



**Figura 2.13.** Circuito de acondicionamiento de la señal de velocidad.

El optointerruptor está compuesto de dos elementos: Por un lado se usó un diodo emisor de luz (LED), que genera luz de forma continua, y por el otro, un fototransistor como fotodetector, que sólo conduce cuando recibe luz. Ambos dispositivos interaccionan mediante un disco perforado acoplado al eje de uno de los rodillos del dinamómetro de chasis. Al interrumpir la recepción de luz en el fotodetector mediante el disco perforado acoplado al eje, se genera una señal de pulsos cuya frecuencia depende de la velocidad de rotación del disco.

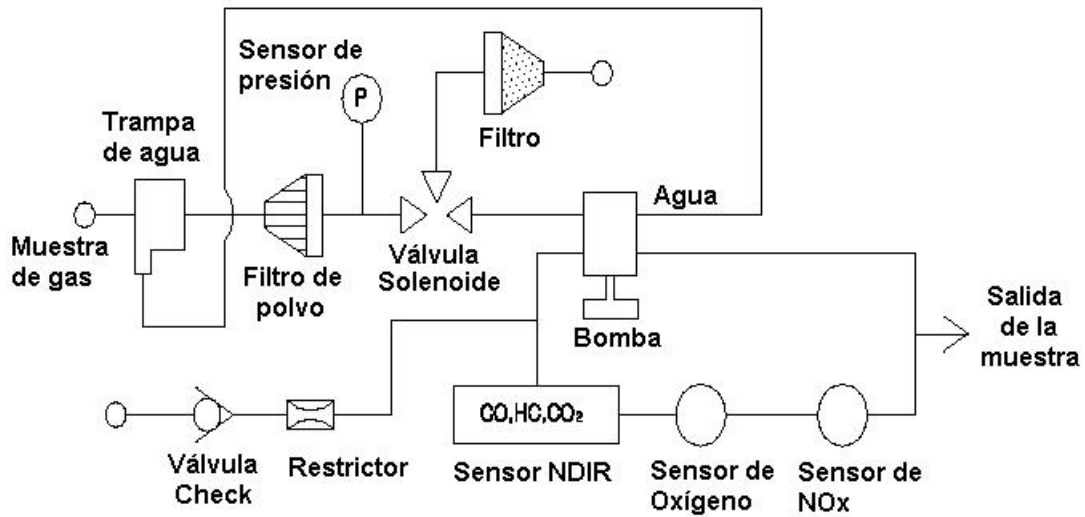
Para obtener una señal cuadrada se utilizó un circuito restaurador de onda, éste simplemente toma la señal que sale del transistor del optointerruptor y lo amplifica, formando una señal cuadrada, para que pueda ser utilizada por el conversor frecuencia voltaje.

La parte final de este módulo está constituida por el circuito conversor frecuencia/voltaje. Este conversor recibe como entrada la señal de pulsos, proveniente del disco perforado y el arreglo optoelectrónico, cuya frecuencia depende directamente de la velocidad de rotación del eje, y entrega a su salida una señal de voltaje de corriente directa (siempre positivo) que variará proporcionalmente con la frecuencia de la señal de entrada.

El disco construido para realizar las mediciones de velocidad consta de 60 perforaciones, y considerando que el diámetro del rodillo al que está acoplado es de 20.32 cm, para el valor máximo de velocidad (100 km /hr), se obtendrá una velocidad angular en los rodillos del dinamómetro de 43.51 revoluciones por segundo, lo que implica que la señal generada por la interacción del disco con el arreglo optoelectrónico tendrá una frecuencia de 2.61 kHz. El diseño del conversor frecuencia voltaje se hará para obtener un voltaje de salida de 10 volts para una señal de 3 kHz, para lo cual se tomará la configuración de tacómetro de las hojas de especificaciones del fabricante del conversor en circuito integrado LM2917.

#### **2.5.5. Analizador de gases**

El analizador de gases contiene como elemento principal una banca de análisis de gases infrarroja, para la medición de CO, CO<sub>2</sub>, y HC, así como sensores electroquímicos, para medir O<sub>2</sub> y óxidos de nitrógeno NO<sub>x</sub>. Además de la banca (consistente principalmente de un sensor infrarrojo de estado sólido, un microprocesador, electrónica analógica y digital, y de sensores electroquímicos), el sistema de análisis de gases requiere de mangueras, filtros, fuentes de alimentación de voltaje, bombas, válvulas solenoides, válvulas check y una serie de conectores. El diagrama a bloques del analizador de gases se muestra en la figura 2.14.



*Figura 2.14. Analizador de gases.*

Para la medición de las revoluciones del motor la banca cuenta con una entrada para un tacómetro de tipo inductivo.

Cabe mencionar que no se requirió de algún circuito de acondicionamiento de las señales provenientes del analizador de gases hacia la TAD, ya que se puede establecer la comunicación directa del analizador con la computadora personal a través del puerto serie RS-232 de la PC.

Una vez que se han descrito los módulos de hardware que componen nuestro sistema, procederemos a hacer la descripción del software del sistema.

## 2.6. Software

Para el desarrollo del sistema de control y procesamiento de datos se empleó el software de Instrumentación Virtual denominado LabVIEW.

Nuestro instrumento virtual, desarrollado en LabVIEW, permitirá controlar el *hardware* a través de la TAD, mediante una interfaz gráfica de usuario (GUI, por sus siglas en inglés). Además de lo que es la propia representación de los datos en el panel frontal, que funciona como si se tratara de instrumentación real, se podrá realizar otro tipo de manejo y registro de datos, esto se hará directamente en el panel frontal o mediante la ejecución de las rutinas programadas en el diagrama a bloques del instrumento virtual. La capacidad de comunicación con el analizador de gases será muy importante en este sistema y será a través del puerto serie de la PC.

### 2.6.1. Estructura del programa principal

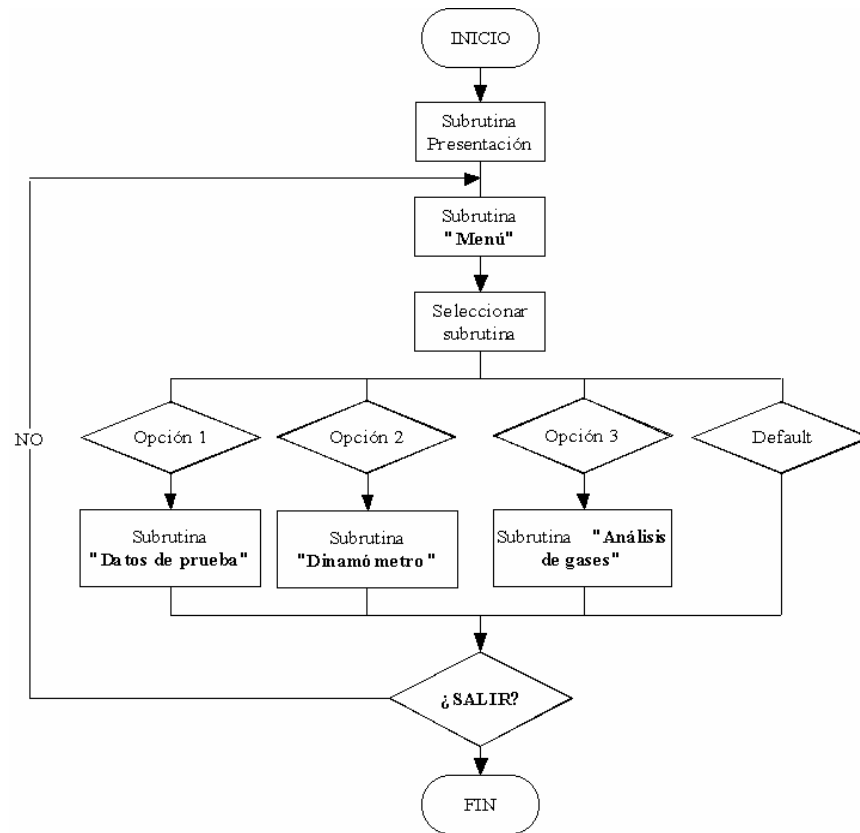
El software desarrollado realiza varias tareas. A partir de un programa principal se selecciona la prueba a realizar; una vez seleccionada la prueba, se procede a adquirir los datos generados en ella, así como el control de los dispositivos utilizados. En este proceso también se deben generar los reportes de las pruebas realizadas y el almacenamiento de los datos adquiridos, para su análisis posterior. Con base en la información colectada se puede realizar un diagnóstico completo y óptimo de los vehículos sometidos a prueba.

El programa desarrollado consta de una rutina principal y de varias subrutinas independientes entre sí, figura 2.15.

Las subrutinas incluidas en el programa son:

- Presentación
- Menú
- Datos de prueba

- Dinamómetro
- Análisis de gases



*Figura 2.15. Programa principal.*

En el diagrama se muestra que la primera rutina, llamada “Presentación”, sólo se realiza una vez durante la ejecución del programa, mientras que la subrutina “Menú” es repetitiva y se requiere para seleccionar alguna de las otras subrutinas, como son “Datos de prueba”, “Dinamómetro” y “Análisis de gases”, cuando se termina alguna de éstas, nuevamente se ejecuta.

### 2.6.2. Subrutina Presentación

Esta rutina permite que se despliegue en pantalla un logotipo del Instituto de Ingeniería de la UNAM y el nombre del sistema, con la única finalidad de presentar al usuario el inicio del programa. Esta pantalla se muestra en la figura 2.16.



*Figura 2.16. Pantalla del programa principal.*

### 2.6.3. Subrutina Menú

Mediante la subrutina menú se permite al usuario seleccionar alguna de las subrutinas (Datos de prueba, Dinamómetro o Análisis de Gases).

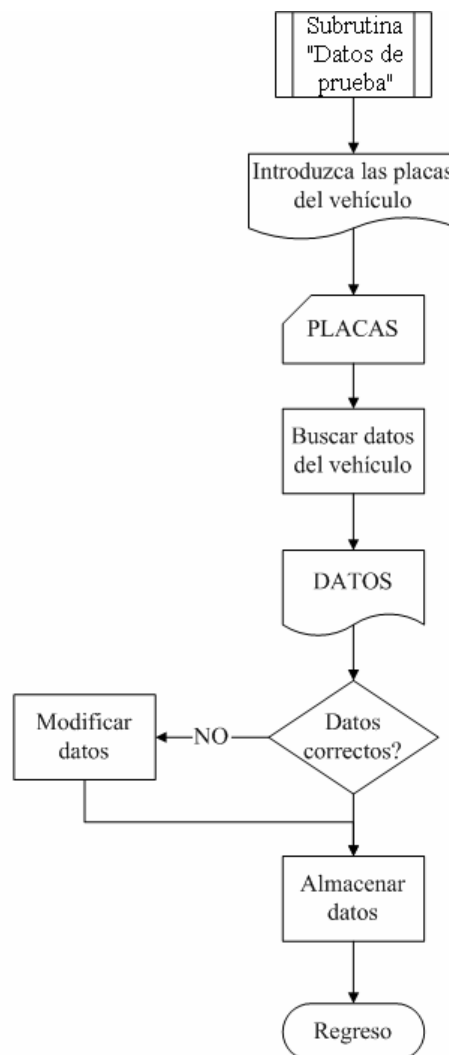
Al terminar cualquiera de estas rutinas el control del programa regresa al menú para la selección de otra rutina o para salir del programa, lo que permite la terminación del mismo y regresar al sistema operativo.



#### 2.6.4. Subrutina Datos de prueba

Esta rutina permite al usuario introducir, o bien leer, las características del vehículo que será sometido a alguna de las pruebas que se pueden llevar a cabo con el equipo, además de generar el archivo en el que serán almacenados dichos datos, así como los resultados de las pruebas. Cabe comentar que con los datos adquiridos se generarán archivos con los datos de los vehículos que han sido sometidos a pruebas tanto con el analizador de gases como con el dinamómetro de chasis.

En la figura 2.17 se muestra el diagrama de flujo de la subrutina “Datos de prueba”.



*Figura 2.17. Subrutina “Datos de prueba”.*

Al inicio de la subrutina “Datos de prueba”, aparecerá una pantalla como la mostrada en la figura 2.18, en la que se pide introducir los datos del número de placas del vehículo bajo prueba, con el objeto de que el programa realice una búsqueda de éstas en un archivo que contiene los datos de todos los vehículos que han sido sometidos a prueba con este software.



TECLEE LAS PLACAS DEL  
VEHÍCULO

CONTINUAR

*Figura 2.18. Captura de las placas del vehículo.*

Una vez finalizada la búsqueda de las placas, si los datos del vehículo fueron encontrados, aparecerá una pantalla con dichos datos, en caso contrario los campos de los datos aparecerán con los datos que están en el programa por defecto y tendrán que capturarse dichos datos, figura 2.19.



VEHÍCULO

COMBUSTIBLE GASOLINA

MARCA CHRYSLER / DODGE

SUBMARCA OTRO CHRYSLER / DODGE

CARROCERÍA AUTOMÓVIL SEDÁN

CILINDROS 4 cil

AÑO\_MODELO 2006

PLACAS

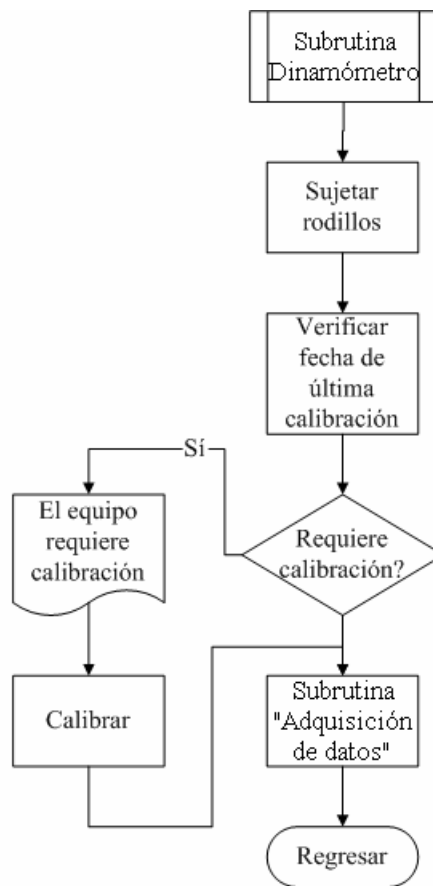
CONTINUAR

*Figura 2.19. Captura de los datos del vehículo.*

Una vez que se han capturado correctamente las características del vehículo, se creará un archivo con estos datos para almacenar los resultados de las pruebas; y por otro lado se actualizará la base de datos de los vehículos que han sido sometidos a pruebas.

### 2.6.5. Subrutina Dinamómetro

Las pruebas realizadas a los vehículos automotores en el dinamómetro son muy importantes, ya que con base en ellas se puede conocer el estado real de las condiciones de funcionamiento de éstos. Pensando en ello, para la realización de dichas pruebas se hace uso de la subrutina “Dinamómetro”, mostrada en la figura 2.20.



*Figura 2.20. Subrutina “Dinamómetro”.*

Al iniciar esta subrutina se manda sujetar los rodillos del dinamómetro, para garantizar que las ruedas motrices del vehículo puedan situarse en éstos de una forma segura. Posteriormente, se procede a verificar en un archivo la fecha de la última calibración del dinamómetro, si ésta fue realizada hace más de 30 días, entonces se desplegará un mensaje en el que se informa que el equipo requiere calibración.

Para realizar la calibración se utilizan un procedimiento estático que se refiere a la calibración de la celda de carga instalada en el brazo de la PAU.

Una vez finalizada la calibración del dinamómetro, si hubiese sido requerida, se procede a efectuar la etapa de las pruebas en el dinamómetro. Estas pruebas permiten conocer, con precisión, el valor de la potencia (HP) y el par (Nm) que suministra el motor de un vehículo, sin necesidad de desmontarlo del mismo.

El uso del dinamómetro de chasis resulta indispensable para alcanzar una puesta a punto óptima del motor de un vehículo. Durante las pruebas en el dinamómetro de chasis se pueden realizar la corrección en marcha de parámetros de carburación y puesta a punto del encendido. También se realiza la medición de consumo de combustible.

Para realizar pruebas en el dinamómetro de chasis es necesario aplicar distintos valores de carga al vehículo en marcha y medir las características de operación del vehículo en distintas condiciones.

Para llevar a cabo cualquier prueba de adquisición de datos es necesario liberar primero los rodillos. Por esta razón, en la pantalla correspondiente a la subrutina Dinamómetro, figura 2.21, aparece la opción “Liberar Rodillos,” y no podrá realizarse ninguna prueba mientras no se seleccione esta opción.

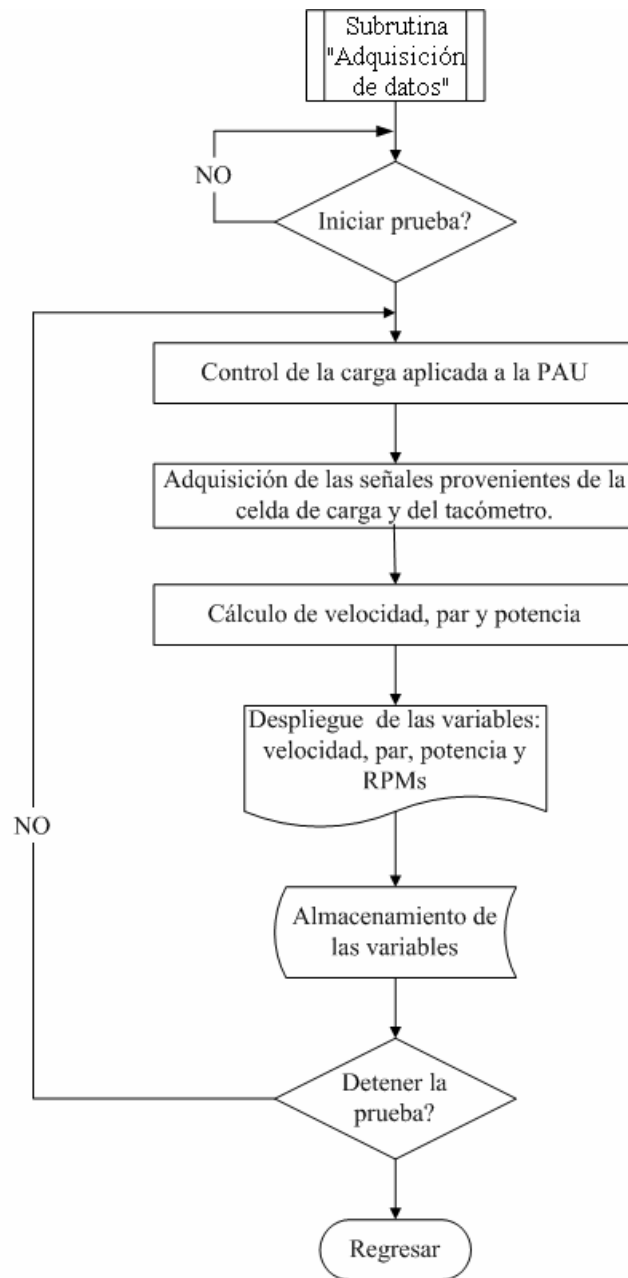


*Figura 2.21. Pantalla correspondiente a la subrutina “Dinamómetro”.*

#### **2.6.6. Subrutina Adquisición de datos**

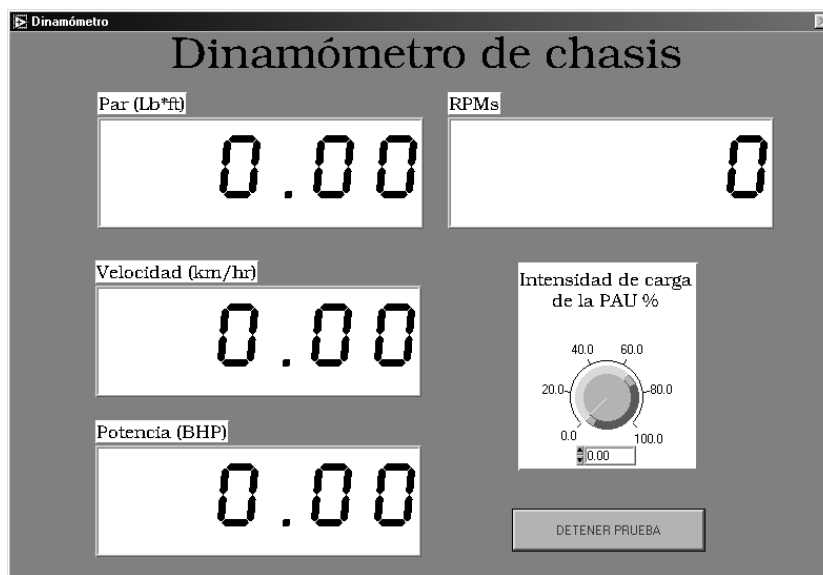
Esta subrutina, mostrada en la figura 2.22, es un proceso iterativo, durante el cual, en cada ciclo de prueba se realizan las siguientes funciones:

- Adquisición de las señales provenientes de los sensores a través de la TAD.
- Aplicación de la intensidad de freno desde el panel de control.
- Cálculos para hacer mediciones indirectas con los parámetros adquiridos.
- Despliegue y almacenamiento de la información.



*Figura 2.22. Subrutina Adquisición de datos.*

Para iniciar la adquisición de datos se requiere seleccionar la opción Iniciar prueba en la pantalla correspondiente a esta subrutina, mostrada en la figura 2.23.



*Figura 2.23. Prueba en dinamómetro.*

### 2.6.7. Subrutina Análisis de Gases

En el caso de las pruebas de medición y análisis de gases, se controla la operación del analizador de gases y se realiza la adquisición de los datos correspondientes a las mediciones realizadas para su posterior análisis, así como la programación de los ciclos de manejo correspondientes.

El programa permite correr automáticamente la secuencia apropiada de prueba después de que se ha tecleado la información de identificación del vehículo. El tipo de prueba de medición de contaminantes se determinará a partir de las características del vehículo.

Sin embargo, independientemente del tipo de prueba se debe cumplir con un procedimiento de ajuste de cero que elimina los gases residuales de la manguera de analizador y de los dispositivos de medición.

El programa debe realizar un ajuste de cero sobre cada uno de los gases de HC, CO, CO<sub>2</sub> y NO antes de cada secuencia de prueba, el ajuste de cero debe incluir la revisión de los residuales en la sonda. El proceso a seguir debe ser el siguiente:

1. Antes de iniciar una prueba de verificación, se debe tomar una muestra de aire ambiente por medio de la sonda y comparar su contenido de HC con el cero absoluto del banco óptico. Sólo cuando la lectura sea menor a 15 ppm se permite continuar con la siguiente etapa del ajuste de cero.
2. Cuando los residuales de HC están abajo de 15 ppm, vía la sonda, se inicia el proceso de ajuste de cero tomando aire del puerto de aire cero ubicado en el gabinete del equipo y con ello, se deben ajustar a cero las lecturas de HC, CO, CO<sub>2</sub> y NO y ajustando el valor de O<sub>2</sub> con el del aire estándar, 20.95 % .
3. Una vez realizado el ajuste de cero:
  - 3.1. Tomar una muestra de aire ambiente del puerto de calibración del analizador.
  - 3.2. Tomar una muestra de aire ambiente vía la sonda de muestreo.
  - 3.3. El equipo no está listo para utilizarse hasta que:
    - La diferencia entre las lecturas anteriores sea menor de 7ppm de HC.
    - El aire ambiente tenga menos de 15 ppm de HC, 0.02 % de CO y 25 ppm de NO.

Una vez realizado satisfactoriamente el proceso de ajuste de cero, se está en condiciones de llevar a cabo la medición de emisiones contaminantes, para lo cual debe tenerse en cuenta que deben medirse las revoluciones del motor durante todo el proceso de la prueba funcional, así como que las concentraciones de los gases de escape deben ser analizadas cuando menos una vez por segundo. Durante el desarrollo de la prueba, si alguno de los valores medidos está fuera de los límites el indicador correspondiente en la pantalla cambiará al color rojo para así indicarlo.

Las pruebas de medición de emisiones pueden ser estáticas o dinámicas.



### 2.6.7.1. Prueba estática de medición de emisiones

Este protocolo cubre las necesidades para realizar pruebas estáticas (sin dinamómetro) en aquellos vehículos que por sus dimensiones, peso vehicular o sistemas de tracción y de frenado, no puedan ser sometidos a pruebas en dinamómetro y para cuya realización se despliega la pantalla mostrada en la figura 2.24.



*Figura 2.24. Prueba estática de medición de gases.*

La secuencia de prueba es la siguiente:

#### *1. Revisión visual de humo*

Se empieza a tomar el tiempo de esta etapa cuando las revoluciones del motor hayan estado dentro de su banda de tolerancia de  $2,500 \pm 250$  rpm por 2 segundos consecutivos. Si durante el desarrollo de esta etapa las revoluciones del motor salen de esta banda preestablecida (hacia arriba o hacia abajo) el cronómetro debe pararse, reanudándose una vez que se haya entrado de nuevo a la banda. Si se sale de la banda de tolerancia por 2 segundos o más, el cronómetro debe restablecerse en cero.

Al alcanzar el tiempo cronometrado de 30 segundos, se da por terminada esta etapa de la prueba. Se despliega un mensaje al técnico de verificación para que reduzca las revoluciones del motor a velocidad de ralentí y una vez que tenga un valor de menos de 1,200 rpm, desplegar la pantalla de captura para escoger entre las opciones de “Humo negro”, “Humo azul” o “Carece de humo” para la revisión visual.

En el caso de seleccionar “Humo negro” o “Humo azul” el programa debe dar por terminada la prueba.

En el caso de seleccionar “Carece de humo” visible por el escape se da por aprobada esta etapa de la prueba y debe continuarse con la siguiente etapa.

### *2. Etapa de crucero*

Se empieza a tomar el tiempo de esta etapa cuando la velocidad del motor del vehículo esté dentro de su banda de tolerancia de  $2,500 \pm 250$  rpm por 5 segundos consecutivos. Si durante el desarrollo de esta etapa, la velocidad del motor sale de sus bandas establecidas (hacia arriba o hacia abajo), el cronómetro debe pararse, reanudándose una vez que haya entrado de nuevo a sus bandas. Si se sale de la banda de tolerancia por 2 segundos o más, el cronómetro debe restablecerse en cero. Al alcanzar el tiempo cronometrado de 30 segundos, se da por terminada esta etapa de la prueba.

Para cada uno de los gases, se obtiene el promedio aritmético de las lecturas de los últimos 5 segundos de la etapa quedando descartada cualquier lectura obtenida mientras el cronómetro estuviera parado. Las lecturas promedio se deben de comparar con los límites marcados por la norma actual para determinar la aprobación o rechazo de la prueba.

### *3. Etapa de ralentí*

Al terminar la etapa de crucero se despliega un mensaje para que el técnico de verificación reduzca las revoluciones del motor a ralentí. Cuando las revoluciones del motor tengan un valor menor a 1,200 rpm debe darse por iniciada la etapa de ralentí.

Se empieza a tomar el tiempo de esta etapa cuando las revoluciones del motor estén dentro de su banda de tolerancia de 350 a 1,200 rpm por 2 segundos consecutivos. Si durante el desarrollo de esta etapa, las revoluciones del motor sale de su banda preestablecida (hacia arriba o hacia abajo), el cronómetro debe pararse, reanudándose una vez que se haya entrado de nuevo a su banda. Si se sale de la banda de tolerancia por 2 segundos o más, el cronómetro debe restablecerse en cero. Al alcanzar el tiempo cronometrado de 30 segundos, se da por terminada esta etapa.

Para cada uno de los gases (HC, CO, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> y NO) debe obtenerse el promedio aritmético de sus lecturas de los cinco últimos segundos de la prueba, quedando descartado cualquier valor obtenido mientras que el cronómetro esté parado. A los valores promedio obtenidos serán comparados para determinar la aprobación o rechazo contra los límites establecidos en la Norma Oficial Mexicana correspondiente.

#### 2.6.7.2. Prueba dinámica de medición de emisiones

Este protocolo cubre las necesidades para realizar pruebas dinámicas en dinamómetro y está diseñados para verificar las emisiones de vehículos propulsados por motores de 4 tiempos a gasolina, gas licuado de petróleo, gas natural comprimido u otros combustibles alternos, figura 2.25.



*Figura 2.25. Prueba dinámica de medición de emisiones.*

Este protocolo se caracteriza por contar con dos etapas de aceleración simulada, con duración de 60 segundos.

El programa debe seleccionar la potencia al freno a aplicar por el dinamómetro para cada módulo de la prueba ASM de la tabla maestra. En el caso que un vehículo que no esté contenido en la tabla maestra, se seleccionará la carga de una tabla auxiliar.

Para iniciar la prueba se deberán posicionar las llantas motrices del vehículo en los rodillos del dinamómetro, para lo cual el programa tendrá que activar la electroválvula para suministrar aire a la instalación neumática que controla las zapatas que sujetan los rodillos del dinamómetro, además de esto se debe asegurar el vehículo de tal forma que se le impida el movimiento. Una vez colocado el vehículo, el operador podrá liberar los rodillos para poder inicial la prueba.

La secuencia de prueba es la siguiente:

#### 1. *Revisión visual de humo y preacondicionamiento*

Se empieza a tomar el tiempo de esta etapa cuando la velocidad del vehículo sobre los rodillos del dinamómetro esté dentro de su banda de tolerancia de  $24 \pm 2.4$  km/h y el par aplicado en el dinamómetro esté dentro de su banda de tolerancia de  $\pm 5\%$  de su valor nominal, consultado en la tabla maestra de referencia para el vehículo en cuestión, todo en un lapso de 5 segundos consecutivos.

Si durante el desarrollo de esta etapa la velocidad del vehículo sobre los rodillos del dinamómetro, o el par aplicado por el dinamómetro, sale de sus bandas establecidas (hacia arriba o hacia abajo) el cronómetro debe pararse, reanudándose una vez que hayan entrado de nuevo a sus bandas. Al alcanzar el tiempo cronometrado de 30 segundos, se da por terminada esta etapa de la prueba funcional.

#### 2. *Etapas PAS 5024*

Se empieza a tomar el tiempo de esta etapa cuando la velocidad del vehículo sobre los rodillos del dinamómetro esté dentro de su banda de tolerancia de  $24 \pm 2.4$  km/h y el par

aplicado en el dinamómetro esté dentro de su banda de tolerancia de  $\pm 5\%$  de su valor nominal, consultado en la tabla maestra de referencia para el vehículo en cuestión. Estas condiciones se deben mantener en un lapso de 5 segundos consecutivos.

Si durante el desarrollo de esta etapa la velocidad del vehículo sobre los rodillos del dinamómetro, o el par aplicado por el dinamómetro, sale de sus bandas reestablecidas (hacia arriba o hacia abajo) el cronómetro debe pararse, reanudándose una vez que hayan entrado de nuevo a sus bandas.

Al alcanzar el tiempo cronometrado de 60 segundos, se da por terminada esta etapa de la prueba funcional. Para cada uno de los gases (HC, CO, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> y NO) debe obtenerse el promedio aritmético de sus lecturas de los diez últimos segundos de la prueba, quedando descartado cualquier valor obtenido mientras que el cronómetro esté parado. Estos valores serán comparados para determinar la aprobación o rechazo contra los límites establecidos en la Norma Oficial Mexicana correspondiente; asimismo, si se presenta emisión de humo azul o negro en cualquier momento de esta etapa de prueba, no debe continuarse con el procedimiento de medición y deberán tenerse por rebasados los límites máximos permisibles establecidos en la Norma Oficial Mexicana correspondiente.

### *3. Etapa de aceleración*

Al alcanzar el tiempo cronometrado de 60 segundos en la prueba PAS 5024, el programa le muestra al conductor del vehículo, una curva de aceleración de 24 a 40 km/h en 3 segundos para lograr una aceleración uniforme del vehículo de 1.556 m/s<sup>2</sup>.

El par aplicado por el dinamómetro cambia automáticamente y sin brusquedad de su valor requerido en la prueba PAS 5024 al nuevo valor requerido en la prueba PAS 2540.

Se empieza a tomar el tiempo de esta etapa cuando la velocidad del vehículo sobre los rodillos del dinamómetro exceda los 26.4 km/h y el tiempo cronometrado de la etapa PAS 5024 exceda 60 segundos.

Se termina de tomar el tiempo de esta etapa 10 segundos después de que el vehículo logra mantener durante 5 segundos consecutivos las condiciones estables de prueba requeridas para arrancar el cronómetro en la etapa PAS 2540.

#### 4. Etapa PAS 2540

Se empieza a tomar el tiempo de esta etapa cuando la velocidad del vehículo sobre los rodillos del dinamómetro este dentro de su banda de tolerancia de  $40 \pm 4.0$  km/h y el par aplicado en el dinamómetro este dentro de su banda de tolerancia de  $\pm 5\%$  de su valor nominal consultado en la tabla maestra de referencia para el vehículo en cuestión.

Si durante el desarrollo de esta etapa, la velocidad del vehículo sobre los rodillos del dinamómetro, o el par aplicado en el dinamómetro, sale de sus bandas preestablecidas (hacia arriba o hacia abajo) el cronómetro debe pararse, reanudándose una vez que hayan entrado de nuevo en sus bandas. Si se sale de la banda de tolerancia por 2 segundos o más, el cronómetro debe restablecerse en cero.

Al alcanzar el tiempo cronometrado de 60 segundos se da por terminada esta etapa de la prueba.

Para cada uno de los gases (HC, CO, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> y NO) debe obtenerse el promedio aritmético de sus lecturas de los diez últimos segundos de la prueba, quedando descartado cualquier valor obtenido mientras que el cronómetro esté parado. Estos valores serán comparados para determinar la aprobación o rechazo contra los límites establecidos en la Norma Oficial Mexicana correspondiente, asimismo si se presenta emisión de humo azul o negro en cualquier momento de esta etapa de prueba, no debe continuarse con el procedimiento de medición y deberá tenerse por rebasados los límites máximos permisibles establecidos en la Norma Oficial Mexicana correspondiente.

Después de terminar cualquier secuencia de prueba, el programa realiza las siguientes acciones:

1. Almacena los resultados de las pruebas, junto con los límites de las concentraciones de los gases medidos.

2. Despliega en pantalla un mensaje al técnico para retirar el sensor de rpm del vehículo así como también la sonda de muestreo.
3. En el caso de pruebas dinámicas, despliega en pantalla un mensaje al técnico para informarle que debe sujetar los rodillos del dinamómetro, para poder sacar el vehículo de una forma segura.
4. Una vez retirada la sonda del tubo de escape del vehículo, deberá iniciarse un procedimiento de limpieza del sistema de muestreo del analizador, en el que se expulsa aire por medio de la bomba del analizador, así como un autocero.

#### **2.6.8. Generación de reportes**

Los datos del vehículo, así como los resultados y la fecha de cada una de las pruebas que le fueron realizadas, son almacenadas en un archivo de tipo texto, para que puedan ser consultadas posteriormente.

Estos resultados también pueden ser impresos directamente desde pantalla una vez que finaliza cada una de las pruebas, ya sea en el dinamómetro o de medición de emisiones.

Ahora que se ha finalizado con el diseño del sistema tanto en hardware como software, se procederá al armado de los circuitos que forman cada uno de los módulos de hardware, así como su integración con el software. Asimismo se informará acerca de las pruebas a las que el equipo desarrollado fue sometido para su correcta puesta a punto.

## CAPÍTULO 3

# CONSTRUCCIÓN Y PRUEBAS

**E**l siguiente paso en el desarrollo de cualquier sistema electrónico, una vez que fue diseñado, es su realización práctica. Sin embargo, antes de construirlo en forma definitiva es necesario elaborar un prototipo y realizarle una serie de pruebas que nos permitan ajustar el funcionamiento del sistema de acuerdo a las especificaciones de diseño. El presente capítulo está dedicado a describir la construcción del prototipo, así como las pruebas que le fueron realizadas a cada uno de los módulos de *hardware* y *software* que componen el sistema.

### 3.1. Armado del prototipo

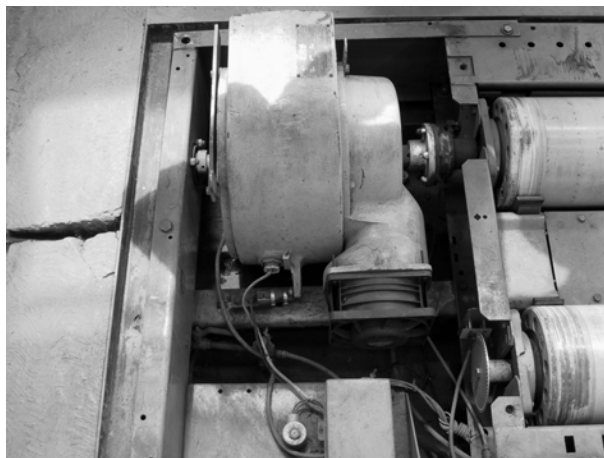
En esta parte del desarrollo del sistema se armaron los prototipos electrónicos de cada uno de los módulos de *hardware* que componen al sistema, con excepción del analizador de gases, el cual ya había sido armado por el fabricante y el cual sólo fue integrado mediante *software*.



La construcción de los prototipos electrónicos se llevó a cabo utilizando placas perforadas (*through hole*) destinadas para este fin, en ellas se insertaron los componentes en los orificios y se fijaron mecánicamente a la tarjeta mediante soldadura. Para las conexiones fue necesario utilizar cables conductores y realizarlas con soldadura punto a punto.

Los circuitos de acondicionamiento de señales que se armaron en las placas perforadas son los correspondientes a los siguientes módulos:

- *Circuito de control de carga aplicada a la PAU.* La construcción de este circuito se dividió en dos secciones: la primera, que se encuentra en la tarjeta perforada, corresponde al detector de cruce por cero, el generador de diente de sierra, los circuitos de control para el disparo de cada uno de los tiristores, así como las etapas de aislamiento eléctrico; la segunda sección corresponde a la etapa de potencia, constituida por el rectificador semicontrolado, fue construida en una tarjeta de circuito impreso y se colocó en un tablero de control independiente de la tarjeta de acondicionamiento de señales. La salida del rectificador semicontrolado se conectó directamente a las terminales de la PAU, mostrada en la figura 3.1.

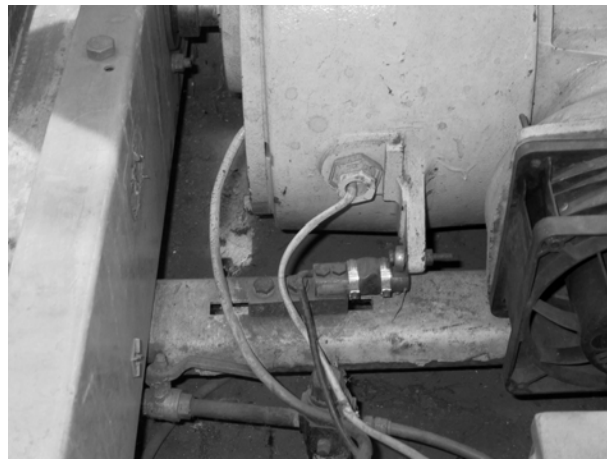


**Figura 3.1.** PAU acoplada a uno de los rodillos del dinamómetro.

- *Circuito de control para sujetar los rodillos del dinamómetro.* El armado de este módulo también se dividió en dos partes, en la primera se tiene el sistema de

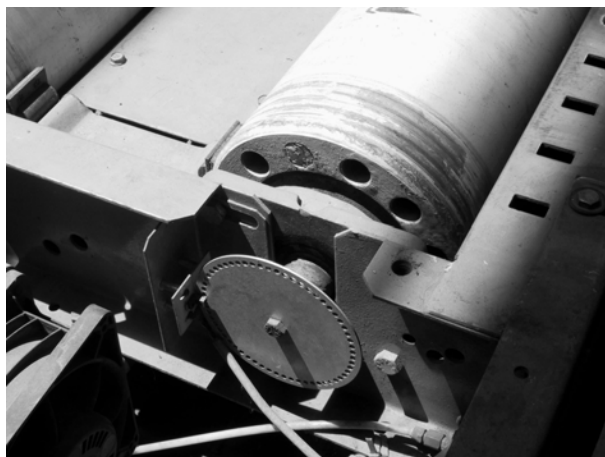
control construido en la misma tarjeta de acondicionamiento y la segunda parte, la etapa de potencia correspondiente al MOSFET, también colocado en el tablero de control.

- *Circuito de acondicionamiento de la celda de carga para la medición del par.* Este circuito fue íntegramente construido en la tarjeta de acondicionamiento de señales, mientras que la celda de carga fue montada en un soporte para cargar el brazo de la PAU, figura 3.2.



**Figura 3.2.** Celda de carga para la medición del par.

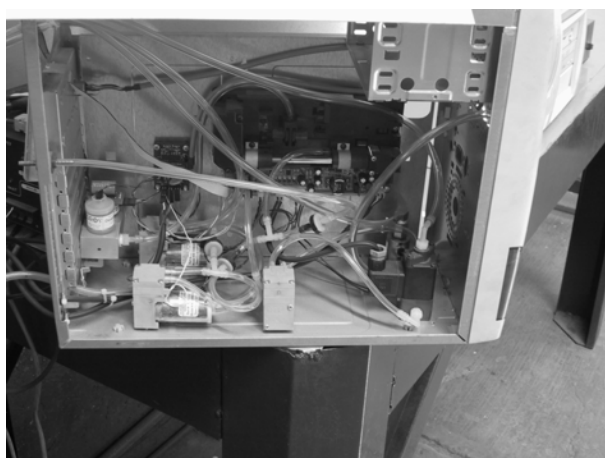
- *Circuito de acondicionamiento de la señal de velocidad.* La construcción de este módulo se dividió en dos partes: una tarjeta de circuito impreso para la colocación del arreglo optoelectrónico, montado en un soporte para poder interactuar con el disco perforado acoplado a los rodillos, y la segunda, correspondiente a la parte del restaurador del tren de pulsos, así como el conversor frecuencia a voltaje armados en la tarjeta de acondicionamiento de señales.



*Figura 3.3. Arreglo para la medición de la velocidad.*

- *Fuentes de alimentación.* Para el correcto funcionamiento de los módulos antes mencionados, se construyeron las fuentes de alimentación de voltaje necesarias en tarjetas perforadas adicionales, independientes, debido a que en algunas partes se requiere de aislamiento eléctrico entre secciones.

La integración del analizador de gases, mostrado en la figura 3.4 se realizó en un gabinete para PC tipo torre, en donde se conectaron a la banca óptica de análisis de gases los sensores electroquímicos para medición de oxígeno y óxido de nitrógeno y se realizaron todas las conexiones neumáticas necesarias para su correcta operación.



*Figura 3.4. Analizador de gases.*

Una vez armados los prototipos, se procedió a realizar las pruebas de operación y a ponerlos a punto. Se realizaron pruebas tanto al *hardware* como al *software*.

### 3.2. Pruebas modulares

Para la realización de las pruebas modulares, primero se realizó el ajuste de los módulos de *hardware* sin estar conectados a la TAD y posteriormente se ajustaron los módulos conectados a la TAD, interactuando todo el conjunto con el software de control y adquisición.

#### 3.2.1. *Hardware*

Estas pruebas se realizaron con la finalidad de ajustar los circuitos de acondicionamiento de las señales, tanto de control como de adquisición de datos, para lograr el correcto funcionamiento del sistema de acuerdo a los requisitos de diseño.

##### 3.2.1.1. Módulo de control de carga aplicada a la PAU

Para probar el funcionamiento de este módulo se utilizó una fuente de voltaje variable, para simular el voltaje de control proveniente de la TAD. Una vez conectado el circuito de alimentación a la PAU, se procedió a variar el voltaje de control desde 0 hasta 10 (V) y se midió el voltaje en las terminales de alimentación de la PAU, obteniéndose los datos mostrados en la tercera columna de la tabla 3.1, los cuales se compararon con los datos teóricos de la segunda columna obtenidos a partir de la ecuación 2.1 que define el comportamiento ideal del rectificador semicontrolado .

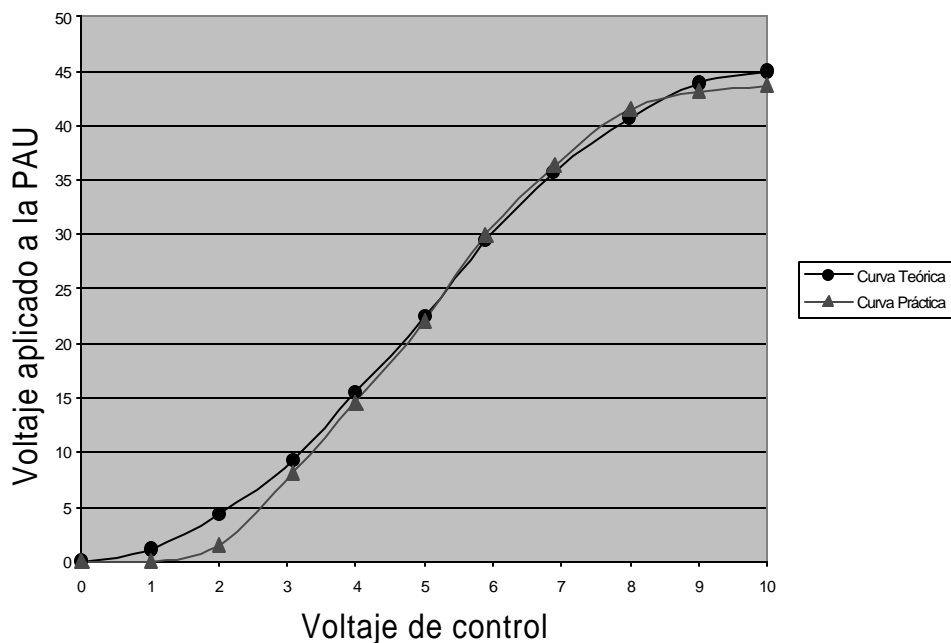
Voltaje de Control (Volts)	Voltaje aplicado a la PAU (Teórico)	Voltaje aplicado a la PAU (Práctico)
0	0	0
1	1.10	0
2	4.29	1.47

**Tabla 3.1.** Voltaje en las terminales de la PAU.

Voltaje de Control (Volts)	Voltaje aplicado a la PAU (Teórico)	Voltaje aplicado a la PAU (Práctico)
3	9.27	8.14
4	15.54	14.61
5	22.50	22.16
6	29.45	30.00
7	35.72	36.40
8	40.70	41.47
9	43.89	43.14
10	45	43.63

**Tabla 3.1.** Voltaje en las terminales de la PAU.

Con base en las mediciones realizadas se procedió a realizar la gráfica correspondiente, cuyo resultado se muestra en la figura 3.5. En la figura también se muestra un comparativo entre al comportamiento real del sistema de control de carga de la PAU y la gráfica de la curva teórica obtenida con base en la ecuación 2.1.



**Figura 3.5.** Voltaje aplicado a la PAU, curvas teórica y práctica.

Al realizar la comparación de ambas curvas vemos que el comportamiento real del circuito es bastante aproximado a la respuesta teórica, razón por la cual aceptamos que el comportamiento del voltaje en las terminales de la PAU si está definido por la ecuación 2.1, sin embargo también observamos que existe un voltaje de control de umbral, a partir del cual comienza a aumentar el voltaje en la PAU, en consecuencia el control del voltaje no se realiza desde los cero volts, sino en el intervalo de 2 a 10 volts.

### **3.2.1.2. Módulo para sujetar los rodillos del dinamómetro**

Para poder introducir de forma segura las ruedas motrices de un vehículo en los rodillos del dinamómetro, es necesario que estos se encuentren sujetos y no puedan girar libremente.

Así, para garantizar el correcto funcionamiento del circuito electrónico que nos permite sujetar los rodillos se realizaron una serie de pruebas a este módulo para las cuales se utilizó como señal de control el voltaje proveniente de una fuente de alimentación de 5 V.

El funcionamiento del circuito de control fue satisfactorio, pues al aplicarse el voltaje de control, los rodillos se sujetaron correctamente y al dejar de aplicar este voltaje los rodillos se liberaron, sin importar el intervalo de tiempo que estuviera operando.

### **3.2.1.3. Módulo de medición del par**

Para la puesta a punto de este módulo primero se realizó una calibración estática del conjunto celda-tarjeta de acondicionamiento. Se conectó la celda de carga al circuito de acondicionamiento y se procedió a ajustar el voltaje de alimentación de la celda de carga, ajustando el balance de cero sin cargar a la celda.

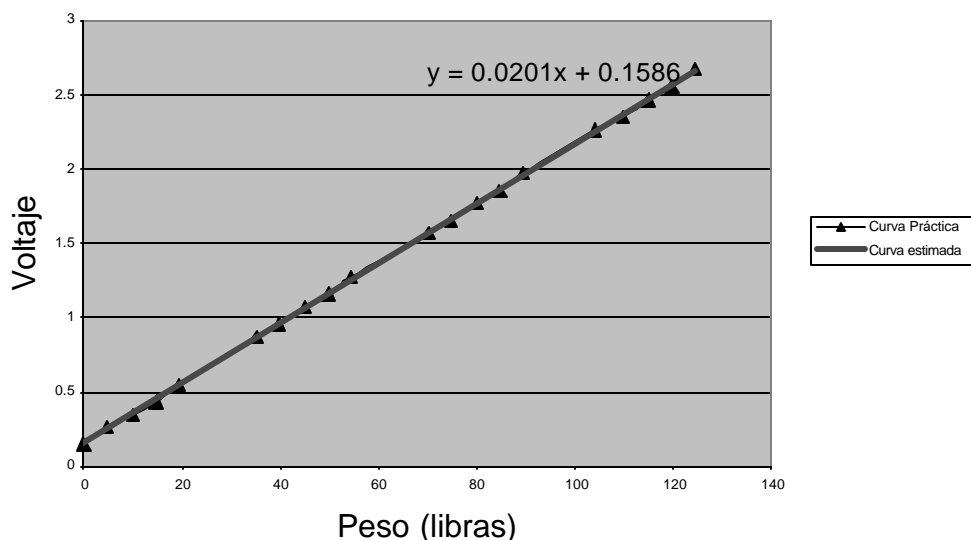
Una vez realizado el ajuste anterior, se colocó la celda de carga en un porta pesas, para obtener la curva de calibración de la celda de carga en conjunto con el circuito de acondicionamiento. Teniendo en cuenta que el circuito acondicionador de señal de la celda de carga fue diseñado para dar una salida de 10 volts, ante una fuerza aplicada de 500 libras, se calculó el voltaje de salida para la fuerza máxima que se aplicaría con las pesas de que se dispone para realizar esta prueba, las cuales sumaron 124.37 libras. Así se

midieron los valores de voltaje que el circuito de acondicionamiento entrega a su salida para distintos valores de fuerza, en el intervalo de 0 a 124.37 libras, y se registraron en la tabla 3.2.

Fuerza (libras)	Voltaje (Volts)
0	0.15
4.75	0.261
9.88	0.348
14.63	0.435
19.37	0.551
35	0.87
39.75	0.957
44.88	1.073
49.63	1.16
54.37	1.276
70	1.566
74.75	1.653
79.88	1.769
84.63	1.856
89.37	1.972
104	2.262
109.75	2.349
114.88	2.465
119.63	2.552
124.37	2.668

**Tabla 3.2.** Datos para obtener la curva de calibración de la celda de carga.

A los datos obtenidos de las mediciones anteriores, se les realizó una regresión lineal por medio del método de mínimos cuadrados y se obtuvo la curva de calibración para la celda de carga en conjunto con el circuito de acondicionamiento mostrada en la figura 3.6.



**Figura 3.6.** Curva de calibración de la celda de carga.

En la gráfica anterior observamos que el sistema de medición, que relaciona la fuerza aplicada en la celda de carga con el voltaje de salida del circuito de acondicionamiento, tiene un comportamiento lineal, definido mediante la siguiente ecuación:

$$V = 0.201 * F + 0.1586 \quad (3.1)$$

donde:

V: Voltaje de salida del circuito de acondicionamiento

F: Fuerza aplicada en la celda de carga

Una vez realizada la curva de calibración, se montó la celda de carga en el brazo de la PAU, donde se observó que a la salida del circuito de acondicionamiento se presentaba un voltaje de *offset*, producto de la carga que ejerce el brazo de la PAU en la celda. Dicho voltaje se trató de ajustar en el circuito, sin embargo no fue posible compensarlo completamente, por lo que dicho ajuste se hará mediante el software, ya que es necesario



que en las lecturas de la fuerza aplicada en la celda de carga se tenga un valor de cero cuando no haya presencia de carga.

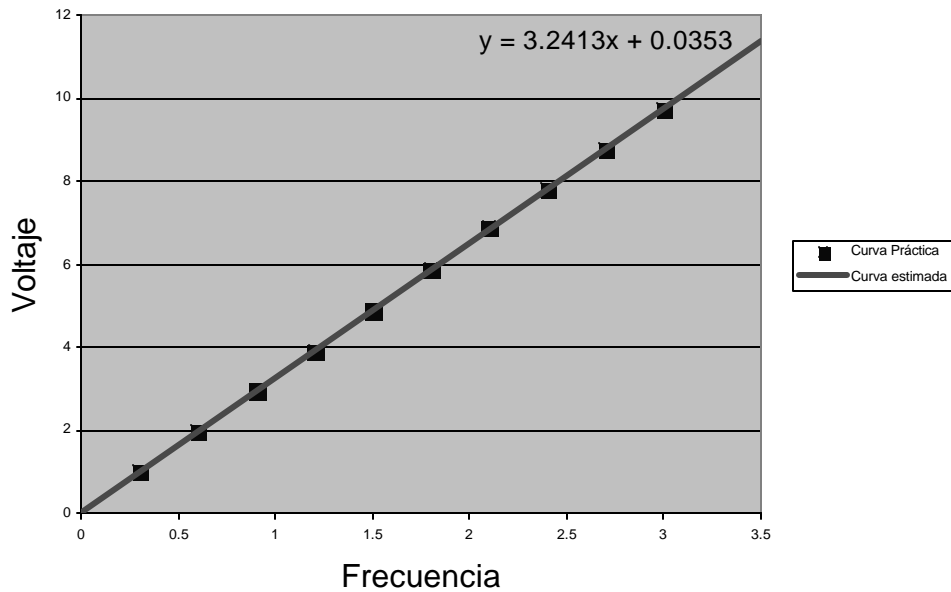
#### 3.2.1.4. Módulo de adquisición de la señal de velocidad

Para ajustar el funcionamiento del circuito de acondicionamiento de la señal de velocidad, se emuló el tren de pulsos obtenido por la interacción del disco perforado con el arreglo optoelectrónico, utilizando a la entrada del optointerruptor el generador de señales e introduciendo una señal cuadrada con una frecuencia de 3 kHz, para obtener 10 volts a la salida del conversor frecuencia voltaje. Una vez ajustado el circuito para funcionar con los valores de operación antes mencionados, se varió la frecuencia de la señal de entrada entre 0 y 3 kHz, en intervalos de 300 Hz, midiendo el voltaje de salida del conversor. Los datos obtenidos en la prueba se muestran en la tabla 3.3.

Frecuencia (kHz)	Voltaje (Volts)
0.3	0.99
0.6	1.99
0.9	2.98
1.2	3.96
1.5	4.94
1.8	5.96
2.1	6.92
2.4	7.94
2.7	8.92
3	9.98

**Tabla 3.3.** Datos obtenidos en las pruebas al circuito de medición de velocidad.

A los datos de la tabla 3.3 se les aplicó el método de mínimos cuadrados para obtener la curva de calibración que define el comportamiento del sistema para la medición de velocidad, la cual se muestra en la figura 3.7.



**Figura 3.7.** Curva de calibración del sistema para medir la velocidad.

La ecuación que define el comportamiento del sistema es la mostrada a continuación:

$$V = 3.2413 * X + 0.0353 \quad (3.2)$$

donde:

V: Voltaje a la salida del conversor frecuencia voltaje

X: frecuencia del tren de pulsos obtenida del arreglo optoelectrónico.

Para obtener una ecuación que defina el comportamiento del voltaje de salida del conversor en función de la velocidad desarrollada por un vehículo en los rodillos del dinamómetro, utilizamos la relación de diseño obtenida en el apartado 2.5.4, que nos indica que para una velocidad de 100 km/h tendremos una frecuencia de 2.61 kHz. Con base en esto último y en la ecuación 3.2, la ecuación que define la relación voltaje de salida-velocidad del vehículo está dada por:

$$V = 0.0842738 * u + 0.0353 \quad (3.3)$$

donde:

V: Voltaje a la salida del conversor frecuencia voltaje

u: velocidad desarrollada por el vehículo en km/h

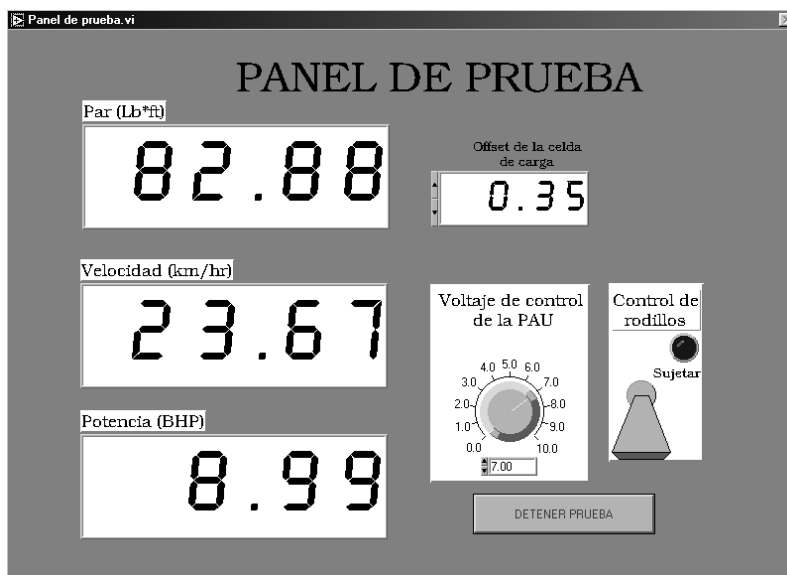
Para verificar el comportamiento anterior se conectó el sistema completo y se hizo correr un vehículo en los rodillos del dinamómetro a diferentes velocidades midiendo el voltaje a la salida del conversor voltaje/frecuencia.

Una vez que se realizaron las pruebas de funcionamiento a cada uno de los módulos de *hardware* del sistema, se proseguirá a realizar las pruebas al sistema conectando la tarjeta de acondicionamiento a la TAD y observando su interacción con los módulos de medición y control programados en el *software*.

### **3.2.2. Software**

Las pruebas realizadas al *software* nos permitieron asegurar el correcto funcionamiento del sistema de acuerdo a los requerimientos especificados y corregir errores de programación.

La primera prueba fue para comprobar el correcto funcionamiento de la TAD por medio del *software* controlador de la TAD y con apoyo de fuentes de voltaje externas, así como de aparatos de medición. Posteriormente se conectó la tarjeta de los circuitos de acondicionamiento a la TAD para realizar pruebas a cada uno de los módulos pero ahora teniendo el control de los dispositivos desde el panel virtual mostrado en la figura 3.8.

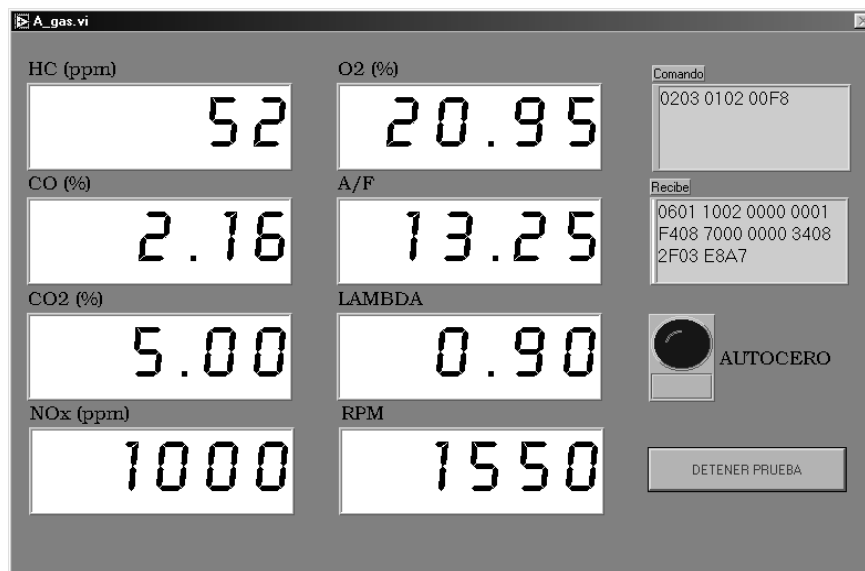


*Figura 3.8. Panel de prueba para el dinamómetro.*

Como podemos observar en el panel, se pueden realizar pruebas a todos y cada uno de los módulos de *hardware* construidos. Las pruebas realizadas por medio de este panel consistieron en primer lugar en observar el comportamiento del módulo para sujetar los rodillos y permitir colocar en los rodillos un vehículo que nos auxiliaría en la pruebas para los demás módulos. Una vez que se pudo colocar el vehículo, los rodillos se liberaron y se continuó con la medición de la velocidad del vehículo para lo cual se le hizo correr libremente en los rodillos comparando las lecturas presentadas en la pantalla con las del velocímetro del propio vehículo.

La siguiente etapa de las pruebas consistió en hacer correr nuevamente el vehículo pero ahora variando el nivel de carga de la PAU y observando si el comportamiento del vehículo se alteraba en función de la carga aplicada, además se realizó la medición de los parámetros del vehículo como son el par y la potencia desarrollados. Después de que fueron ajustados todos los parámetros involucrados para lograr un correcto funcionamiento de los módulos del sistema del dinamómetro, se continuó con las pruebas al *software* diseñado para el analizador de gases.

En el caso del analizador de gases las funciones más importantes que realiza son la adquisición de los valores de cada uno de los gases y de la señal proveniente del medidor de RPM, así como el procedimiento de ajuste de cero del analizador. Las pruebas a este equipo fueron realizadas con el apoyo del panel virtual mostrado en la figura 3.9.



*Figura 3.9. Panel de control del analizador de gases.*

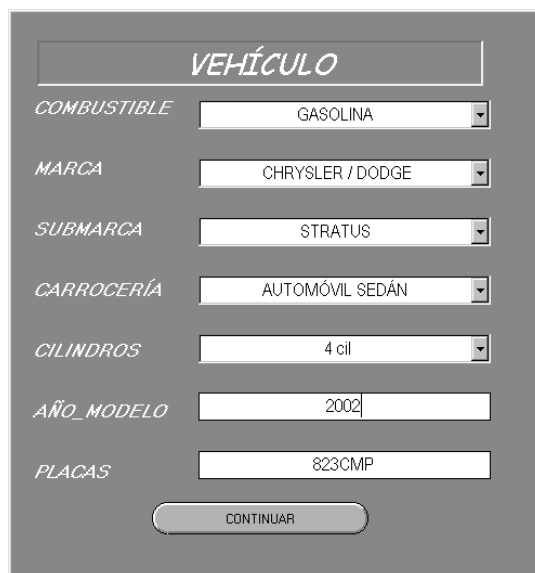
Por medio de este panel se introdujeron los distintos códigos de los comandos de control del analizador y se comparó la respuesta de éste a la obtenida cuando se utiliza el software de prueba que el fabricante proporciona, obteniéndose el mismo comportamiento en ambos casos.

Dentro de las pruebas que se realizaron al *software* se encuentran además las pruebas dedicadas a verificar el funcionamiento de creación y actualización de los archivos de datos de los vehículos sometidos a prueba con este sistema, así como de la correcta generación de los reportes de estas pruebas de acuerdo al formato requerido.

### 3.3. Pruebas del sistema completo

Una vez terminadas las pruebas realizadas a cada uno de los módulos, continuamos con las pruebas al sistema completo.

Las pruebas fueron realizadas a un automóvil *Dodge Stratus* modelo 2002, el cual fue sometido a pruebas en el dinamómetro y de análisis de gases y cuyas características se pueden observar en la figura 3.10.



Formulario de datos del vehículo con los siguientes campos:

VEHÍCULO	
COMBUSTIBLE	GASOLINA
MARCA	CHRYSLER / DODGE
SUBMARCA	STRATUS
CARROCERÍA	AUTOMÓVIL SEDÁN
CILINDROS	4 cil
AÑO_MODELO	2002
PLACAS	823CMP
CONTINUAR	

**Figura 3.10.** Datos del vehículo bajo prueba.

Una vez que se capturaron los datos del vehículo, se continuó con la etapa de la pruebas, para lo cual se seleccionó como primera prueba la correspondiente al dinamómetro de chasis, que consistió en hacer correr el vehículo a una velocidad constante (en este caso 40 km/h) y aplicarle distintos valores de carga a la PAU. En la figura 3.11 se muestra la pantalla correspondiente a la prueba a una velocidad de 40 km/h, en esta prueba se varía la intensidad de carga en la PAU, se miden los valores de velocidad, par y potencia, y se almacenan para su posterior análisis.

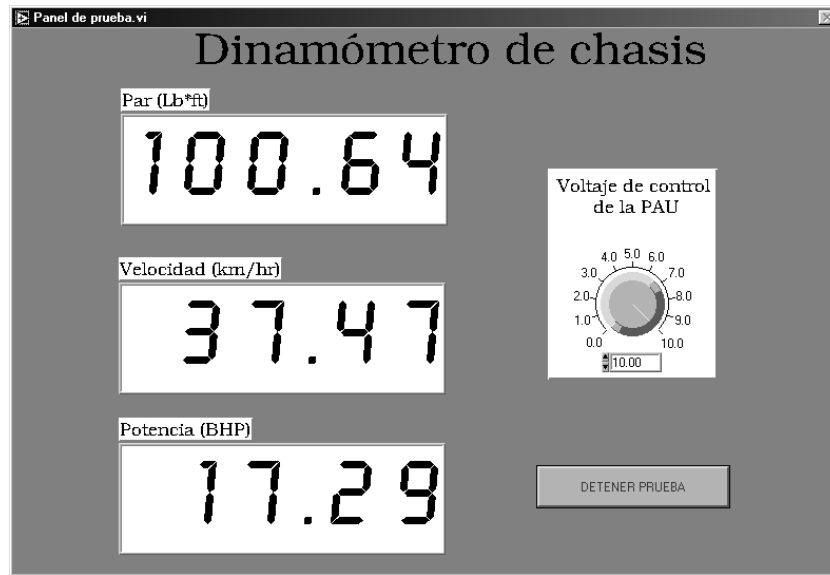


Figura 3.11. Prueba en el dinamómetro de chasis.

Una vez finalizada la prueba y con los resultados almacenados, se obtuvo la gráfica de la figura 3.12, correspondiente a la prueba de medición de par y potencia desarrollados por el vehículo a velocidad constante con carga variable.

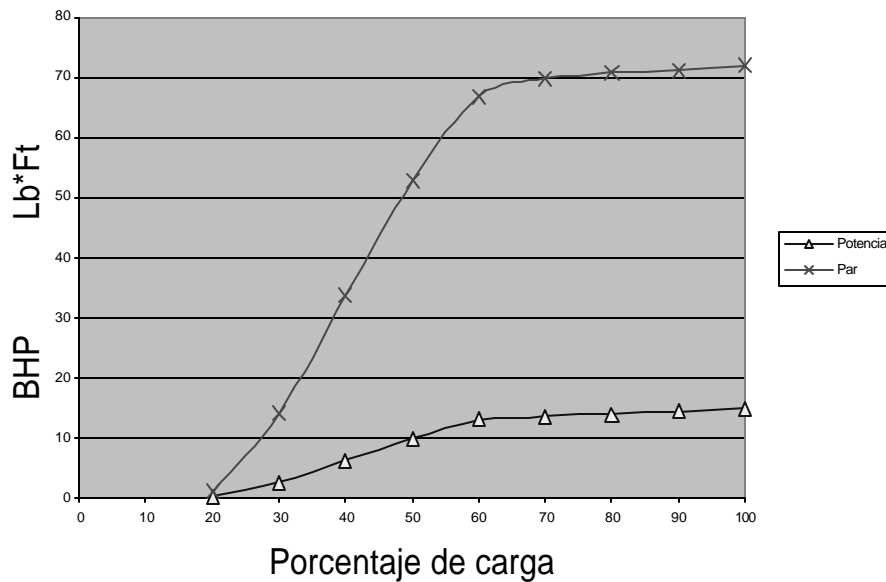


Figura 3.12. Resultados de la prueba en el dinamómetro.

En la gráfica podemos observar que la potencia es un valor derivado del par, sin embargo los valores anteriores dependen de la velocidad a la que sea realizada la prueba, por lo que la importancia de realizar este tipo de pruebas a velocidad constante radica en que para cada velocidad o engrane, el par y potencia serán variables, sobre todo si nos interesa conocer sus valores máximos.

Una vez finalizada la prueba en el dinamómetro, la siguiente prueba fue la correspondiente a la medición de emisiones contaminantes del vehículo en cuestión. Para tal efecto, el software seleccionó el tipo de prueba a realizar así como el valor de la carga aplicada a partir de las características del vehículo, mostradas en la figura 3.13.

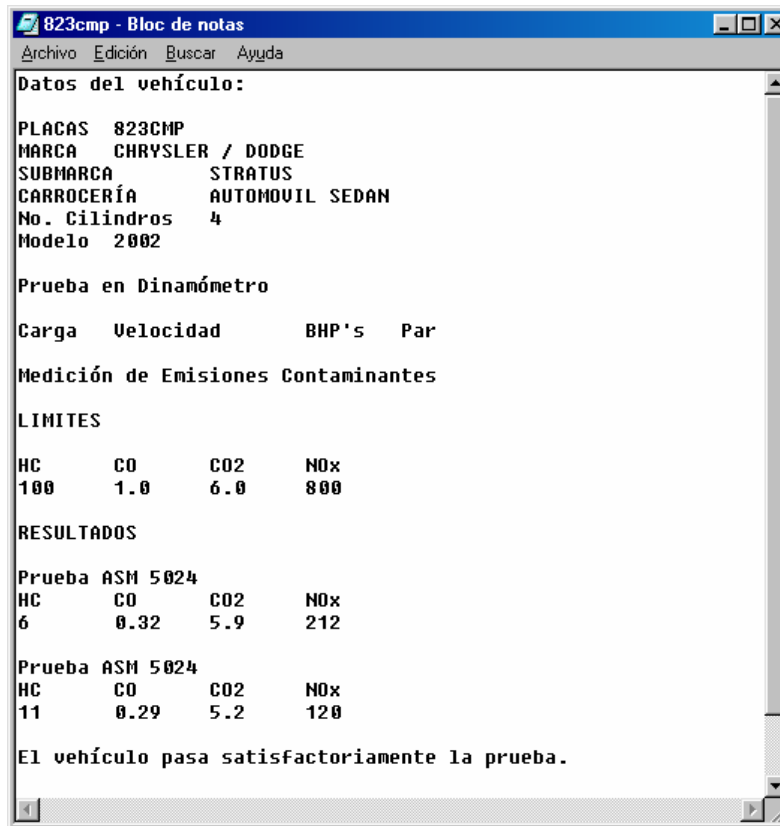
El procedimiento de prueba se llevó a cabo según lo indicado en el apartado 2.6.7.2, que corresponde a una prueba dinámica con aceleración simulada, siendo una de sus etapas la mostrada en la figura 3.13.



**Figura 3.13.** Prueba de medición de contaminantes.

Una vez finalizadas las etapas de la prueba de aceleración simulada para medición de contaminantes, se generaron los resultados de dicha prueba en el archivo creado para tal fin, los cuales se muestran en la figura 3.14.





*Figura 3.14. Reporte de las pruebas generado por el sistema.*

Habiendo finalizado la descripción del proceso constructivo e integración del sistema, así como de las pruebas que le fueron realizadas, el siguiente capítulo estará dedicado a presentar los resultados y las conclusiones obtenidos de este trabajo.

## CAPÍTULO 4

# RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Una vez finalizadas las pruebas de laboratorio al prototipo, para verificar su correcto funcionamiento, se presentan en este último capítulo los resultados y conclusiones obtenidos del sistema. Además al final se mencionan una serie de mejoras que en un futuro pudieran realizarse al mismo.

### 4.1. Resultados

Para poder mencionar los resultados del presente trabajo debemos recordar las características de diseño del prototipo para establecer si hemos o no cumplido con los objetivos planteados al inicio del presente trabajo. Así, algunas de las características más importantes son las siguientes:

- Control de la carga aplicada por la PAU desde la PC.
- Medición del par desarrollado en las ruedas del automóvil.

- Medición de la velocidad del vehículo.
- Cálculo de la potencia desarrollada en las ruedas motrices del vehículo bajo prueba.
- Medición de los gases emitidos por el automóvil (NO<sub>x</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, HC, O<sub>2</sub>).
- Medición de las revoluciones en el motor, así como la temperatura y presión atmosférica por medio del analizador de gases.
- Sujeción / liberación de los rodillos del dinamómetro.
- Facilidad de manejo del *software*.
- Programación de los protocolos de pruebas estáticas y dinámicas para medición de gases contaminantes.
- Capacidad de almacenamiento de los resultados de las pruebas realizadas.

Tomando en cuenta las características de diseño, así como las pruebas realizadas, podemos mencionar los resultados obtenidos para el sistema.

El sistema desarrollado presenta algunas dificultades para el control exacto de la carga aplicada por la PAU, esto es debido a un comportamiento no ideal del rectificador semicontrolado y al desconocimiento de algunas características del dinamómetro de chasis; sin embargo, el control de la carga a partir de un voltaje de control generado desde la PC cumple con los requisitos de diseño y se realiza en un intervalo de 0 a 19 kW, con una resolución de 0.1kW, aplicando un voltaje de control de entre 2 y 10 volts. El principal problema que se presentó en el control de la carga aplicada a la PAU, fue el no conocer las curvas características de par y potencia de ésta, ya que el propietario del equipo no cuenta con alguna información adicional que la que se encuentra en la placa de la PAU y no existe soporte técnico por parte de los fabricantes ya que es un producto discontinuado.

Para la medición de la fuerza aplicada a la celda de carga se cumple con las necesidades de medición planteadas en el diseño de dicho módulo, pudiéndose en consecuencia obtener mediciones de hasta 500 lb con una resolución de 1 lb, valores necesarios para la medición del par desarrollado por los vehículos sometidos a prueba.

En cuanto a la medición de la velocidad desarrollada por los vehículos, el módulo diseñado para este fin puede realizar mediciones de hasta 100 km/hr, con una resolución de 0.1 km/hr, de acuerdo a los requisitos de diseño definidos.

Para el cálculo de los valores de potencia los resultados obtenidos indican que las mediciones están dentro de los límites establecidos, de 0 a 25 BHP con una resolución de 0.1 BHP.

Los resultados de las pruebas de análisis de gases tanto estáticas como dinámicas fueron comparados con los resultados obtenidos en un equipo de medición de un verificentro oficial, obteniéndose un error máximo del 3% en la medición de HC, lo cual nos permite decir que la medición de los gases cumple con los requisitos de diseño.

Para el control de los rodillos no se presentó problema alguno y la sujeción y liberación de éstos se realizó de forma correcta.

El software desarrollado cumple con los requisitos de diseño, es de fácil manejo y permite el almacenamiento de los resultados de las pruebas.

## **4.2. Conclusiones**

Tomando en cuenta los objetivos y las características del sistema planteadas al principio de esta tesis, y en función de los resultados obtenidos, se puede establecer que el funcionamiento que presenta el sistema es adecuado y cumple con los objetivos planteados en este trabajo.

Al cumplir con los parámetros de diseño especificados, este sistema se convierte en una herramienta muy importante para el mantenimiento tanto preventivo como correctivo de los automotores que sean sometidos a prueba con este sistema.

Con el presente desarrollo, el realizar las mediciones de los distintos parámetros en forma electrónica, así como almacenar los resultados en una PC permite a la empresa contar con más elementos para realizar el correcto diagnóstico de los vehículos sometidos a prueba y así ser más eficientes en cuanto a las reparaciones o mantenimiento que requieran dichos vehículos.

También se obtuvo un beneficio económico para la empresa propietaria de este equipo, ya que gracias a este proyecto no se tuvo que adquirir equipo nuevo, toda vez que se logró rescatar un equipo cuya operación ya no era posible, debido a que no existía una interfaz de control para el conjunto de dinamómetro y analizador de gases.

Así, el poder desarrollar un proyecto de este tipo, me permitió adquirir experiencia en el campo del diseño en ingeniería y aprender que para obtener un equipo de calidad y que cubra las necesidades de operación requeridas no siempre es necesario adquirir equipo nuevo.

#### **4.3. Recomendaciones**

Si bien se comentó que el funcionamiento del sistema es adecuado, no podemos descartar se puedan realizar mejoras para obtener un funcionamiento óptimo, por lo que a continuación se mencionan algunas de las modificaciones que pueden realizarse para mejorar el funcionamiento del sistema.

A pesar de que una vez que están sujetos los rodillos es posible situar con seguridad las ruedas motrices del vehículo a prueba, es necesario que para realizar cualquier prueba en el dinamómetro se coloque algún dispositivo que permita sujetar el vehículo al dinamómetro para garantizar que el vehículo no se desplace a lo largo de los rodillos y pueda salir de éstos, evitando así algún accidente.

Debido a que las mediciones de temperatura y presión atmosférica, así como las revoluciones del motor, se hacen mediante el analizador de gases, convendría realizar estas mediciones en forma independiente, sin necesidad de utilizar el analizador de gases. Lo anterior resultaría muy útil en el caso de realizar mediciones de par y potencia, ya que

para realizar la corrección de éstos es necesario conocer los valores de temperatura y presión atmosféricas.

Finalmente, en un futuro próximo el sistema contará además con un módulo para el diagnóstico de frenos de los automóviles.

## BIBLIOGRAFÍA

1. Beckwith, Thomas G. Mechanical measurements. Addyson-Wesley publishing Company Inc. USA, 1990.
  2. Carreras Planel, Ramón., et al. Motores de Combustión Interna. Fundamentos. Ediciones UPC. España, 1993.
  3. Collet, C.V. Mediciones en Ingeniería. Ediciones Gustavo Gili. Barcelona España, 1976.
  4. Crouse, William H. Motores de Automóvil. Alfaomega Grupo Editor. México, 1996.
  5. Crouse, William H. Anglin, Donald L. Puesta a punto y rendimiento del Motor. Alfaomega grupo editor. México, 2002.
  6. Driscoll, Frederick F., et al. Data Acquisition and Process Control with the M68HC11 Microcontroller. Macmillan Publishing Company. USA, 1994.
  7. Figliola, Richard S. Beasley, Donald E. Theory and design for mechanical measurements. John Wiley & Sons Inc. USA, 2000.
  8. Giacosa, Dante. Motores Endotérmicos. Ediciones Omega S.A. Barcelona España, 1988.
  9. Pallás Areny, Ramón. Sensores y Acondicionadores de señal. Alfaomega Marcombo 3ª Edición México 2001.
  10. Pérez Belló, Miguel Ángel. Tecnología de Motores. CIE Inversiones Editoriales Dossat 2000. España 2003.
  11. Rashid, Muhammad H. Power electronics / Circuits, Devices and applications. Prentice Hall Inc., 2<sup>nd</sup> Edition. USA, 1993
  12. Skoog, Douglas A. Principios de Análisis Instrumental. Mc Graw Hill 5ª Edición España 2001.
  13. Webb, John. Greshock, Kevin. Industrial Control Electronics. Macmillan Publishing Company.
-

## BIBLIOGRAFÍA

---

14. Webster John G. *Mechanical variables Measurement / Solid Fluid and Thermal.*  
CRC Press USA.
15. Wolf, Stanley. *Guía para mediciones electrónicas y prácticas de laboratorio.*  
Prentice Hall, 2ª Edición México, 1992





## APÉNDICE A

# FACTORES DE CORRECCIÓN DE POTENCIA

La potencia de un motor de combustión interna debería ser más o menos la misma independientemente del lugar geográfico donde se mida, sin embargo, el funcionamiento del motor de combustión interna es sensible a las condiciones atmosféricas. En la medición de la potencia de un motor influyen de manera muy importante las condiciones ambientales en el momento de la medición; la presión atmosférica, la humedad y la temperatura.

Un motor de explosión es una máquina que se alimenta de aire y de combustible. Del aire toma el oxígeno, y con ese oxígeno logra generar calor mediante la oxidación o combustión del combustible.

La potencia y el par de un motor dependerán fundamentalmente de la cantidad de combustible que se logre quemar en cada ciclo del motor, y de las RPM a que haga girar dicho motor. La cantidad de oxígeno que es

posible hacer ingresar a un cilindro dependerá de la densidad del aire que ingrese. Por ejemplo, el volumen de aire aumentará con el incremento de temperatura, considerando que la presión permanece constante, de acuerdo a la ley de los gases ideales el mismo se hace menos denso. Por consiguiente, el aire contiene menos moléculas de oxígeno en el mismo volumen a altas temperaturas que a bajas temperaturas y la cantidad de oxígeno afecta significativamente a la combustión.

Con respecto a la presión atmosférica, a menor presión el aire se torna menos denso, reduciéndose así la cantidad de oxígeno en los cilindros durante cada ciclo, en consecuencia bajan el par y la potencia del motor.

La humedad afecta directamente el desempeño de motor porque el vapor de agua disuelto en el aire ocupa volumen. Este volumen es en definitiva volumen que se resta al del aire puro. Es decir que a una mayor humedad del aire estas partículas de agua están ocupando espacio del aire que podría contener más oxígeno, disminuyendo así la potencia desarrollada por el motor.

En consecuencia, los motores producen mas potencia con el aire frío y seco (y con alta presión atmosférica) que funcionando con altas temperaturas y con gran humedad.

Para poder comparar las mediciones de potencia realizadas en tiempos y condiciones atmosféricas distintas, es necesario compensarlas para estas diferentes condiciones. Como la atmósfera no puede ser influenciada por el hombre es necesario algún recurso para corregir la potencia del motor llevándolo a algunas condiciones normales, por lo que se utilizan los factores de corrección para compensar la potencia del motor para las distintas condiciones atmosféricas durante las pruebas de medición realizadas al motor.

Un factor de corrección es una estimación para corregir el valor de potencia de un motor bajo diferentes condiciones atmosféricas. Los factores de corrección son necesarios porque el mismo motor puede producir más o menos potencia bajo diferentes condiciones atmosféricas.

Para salvar estos inconvenientes se han establecido condiciones estándar de referencia que especifican presión, temperatura y humedad a las que deben referirse todas las mediciones en los motores para poder hacer repetibles estos ensayos, haciéndolos comparables con otras mediciones también corregidas. De esta manera se pueden comparar valores obtenidos en condiciones climáticas y geográficas muy diferentes.

Estos estándares están especificados por distintas organizaciones de normalización internacionales, entre las que se destacan las siguientes:

- SAE (Sociedad de Ingenieros Automotores), E.U.A.
- ECE (Comunidad Europea), Europa
- JIS (Instituto japonés para Normalización), Japón
- DIN (Normas Industriales Alemanas), Alemania
- ISO (Organización Internacional de Normalización), mundial

La norma SAE es la norma SAE J1349. La potencia se corrige para las condiciones de referencia de 99 kPa de aire seco y 25°C. Esta norma asume una eficiencia mecánica de 85%, esto es correcto para el par máximo pero no a otra velocidad de operación del motor.

La norma STP (también llamada STD) es otra norma de corrección de potencia determinada por la SAE. Esta norma ha sido estable durante mucho tiempo y ha sido ampliamente utilizada en la industria automotriz. La potencia se corrige para unas condiciones de referencia de

103.3 kPa de aire seco y 15.5°C. Debido a que las condiciones de referencia incluyen una presión más alta y el aire más frío que la norma de SAE anterior, este factor de corrección proporcionará un valor de potencia 4 % superior que la norma SAE J1349.

La norma de ECE es similar que la SAE J1349, utiliza las condiciones de referencia de 99 kPa de aire seco a 25°C, pero no se tiene en cuenta la eficiencia mecánica.

La norma JIS corrige a 25°C, con 0% humedad y una presión barométrica de 99 KPa, pero usa diferentes curvas de corrección.

La norma DIN está determinada por la industria automotriz alemana. La potencia se corrige para las condiciones de la referencia de 101.3 kPa de aire seco y 20°C.

Actualmente existe una tendencia de todas estas normas a converger hacia una sola. Las únicas normas de corrección de potencia mundiales en este momento son las determinadas por ISO. Para los motores de combustión interna es la norma ISO 1585. La norma actual SAE J1349 y la normas de ECE son casi idénticas a la norma ISO1585.

## APÉNDICE B

### RELACIÓN AIRE/COMBUSTIBLE

La combustión óptima del combustible y la transformación correcta de los gases de escape sólo pueden ser garantizadas si el motor recibe la cantidad correcta de aire y combustible.

La relación Aire Combustible (A/F) es el número que expresa la cantidad, en masa o en volumen, de aire aspirado por un motor de combustión interna para una cantidad unitaria de combustible. Dicha relación es función del combustible, del tipo de motor, de su regulación y de la carburación.

El valor ideal o teórico de tal relación es el correspondiente a la relación estequiométrica. Los valores de la relación estequiométrica aire/combustible depende de la composición química del carburante y, esencialmente, de la proporción de las cantidades, en peso, de carbono e hidrógeno contenidas en cada molécula de combustible.

Cuando se trata de gasolina comercial, la relación estequiométrica de aire/combustible es la relación de masas teóricamente necesaria para la combustión completa, de 14.7 kg de aire respecto a 1 kg de gasolina. Sin embargo, esto ocurre en condiciones teórica o ideales, que no consideran la mayor o menor rapidez con que se desarrolla efectivamente la combustión y que los motores de pistón no son capaces de crear las condiciones de homogeneidad entre aire y gasolina para quemarla el cien por ciento.

Se ha encontrado experimentalmente que es necesaria una relación definida para obtener la máxima potencia y otra relación diferente para máxima economía. La máxima economía del motor se obtiene cuando el combustible se quema completamente, esto es cuando la mezcla contiene un 10 por ciento más de aire que en la relación estequiométrica. Para la máxima potencia, ésta se obtiene cuando existe una mezcla que presenta aproximadamente 20% menos aire que la relación estequiométrica.

La relación aire/combustible puede obtenerse con gran precisión mediante el análisis químico de los gases de escape. Sin embargo también puede determinarse efectuando las mediciones por separado del aire y del combustible suministrado al motor en un tiempo determinado.

### **Coefficiente Lambda**

El índice de aire o coeficiente lambda ( $\lambda$ ) indica hasta qué punto difiere la relación de aire/combustible respecto a la teóricamente necesaria

El coeficiente lambda se deriva de la relación estequiométrica aire combustible, la cual puede expresarse como 14.7:1 cuando está referida a la proporción aire/combustible, o bien como 1 cuando se expresa como un valor de lambda.

Se define el coeficiente Lambda como:

$$\lambda = \left( \frac{\frac{A}{F_0}}{14.7} \right) \quad (\text{B.1})$$

Siendo  $\frac{A}{F_o}$  la relación aire/combustible real que tiene el motor en ese momento y 14.7 el valor de la relación estequiométrica para la gasolina.

Así una relación lambda menor que 1, significa que la mezcla aire/combustible se esta produciendo en una condición de riqueza de combustible, mientras que una relación lambda mayor que 1, significa que la relación aire/combustible se refiere a una mezcla pobre. Sin embargo, debemos tener en cuenta que si bien un coeficiente lambda igual a 1 significa que el aire y el combustible han sido mezclados en la proporción exacta, esto no implica que el motor después quemé bien la mezcla. Lo cual puede interpretarse como que a pesar que la mezcla es correcta, el motor puede tener deficiencias y quemar mal esa mezcla.

Un método para calcular el coeficiente lambda es el que utiliza la ecuación de Brettschnider (Este método fue escrito por el Dr. Johannes Brettschnider y publicado en 1979). La ecuación es un poco compleja, pero el valor de lambda se calcula de una forma relativamente fácil a partir de los valores medidos de CO, CO<sub>2</sub>, los hidrocarburos no quemados y el O<sub>2</sub> no consumido.

$$\lambda = \frac{[CO_2] + \left[\frac{CO}{2}\right] + [O_2] + \left[\frac{NO}{2}\right] + \left( \left( \frac{Hcv}{4} \times \frac{3.5}{3.5 + \left[\frac{CO}{CO_2}\right]} \right) - \frac{Ocv}{2} \right) \times ([CO_2] + [CO])}{\left( 1 + \frac{Hcv}{4} - \frac{Ocv}{2} \right) \times ([CO_2] + [CO] + (Cfactor \times [HC]))} \quad (B.2)$$

Donde:

[CO]=Concentración de monóxido de carbono en % de volumen

[CO<sub>2</sub>]=Concentración de bióxido de carbono en % de volumen

[O<sub>2</sub>]=Concentración de oxígeno en % de volumen

[HC]=Concentración de hidrocarburos en % de volumen

[NO]=Concentración de óxido de nitrógeno en % de volumen

$H_{CV}$  = Proporción de átomos de hidrógeno con los de carbono en el combustible.

$O_{CV}$  = Proporción de átomos de oxígeno con los de carbono en el combustible.

$C_{factor}$  = Número de átomos de carbono en cada una de las moléculas de HC medidas (Hexano =6, Propano =3 y Metano =1).